

Princípios de osseointegração em implantodontia: Uma revisão narrativa

Principles of osseointegration in implant dentistry: A narrative review

Principios de osteointegración en implantología: Una revisión narrativa

Recebido: 17/11/2023 | Revisado: 24/11/2023 | Aceitado: 25/11/2023 | Publicado: 28/11/2023

Patrick Gonçalves da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0434-2468>
Centro Universitário de Patos de Minas, Brasil
E-mail: patrickgs@unipam.edu.br

Thiago de Amorim Carvalho

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1153-0931>
Centro Universitário de Patos de Minas, Brasil
E-mail: thiagocarvalho@unipam.edu.br

Helvécio Marangon Júnior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9709-6795>
Centro Universitário de Patos de Minas, Brasil
E-mail: helveciomjr@unipam.edu.br

Resumo

A integração de implantes dentários é um dos avanços mais significativos na odontologia contemporânea, revolucionando a forma como lidamos com a perda de dentes e a restauração da função mastigatória e estética. Essa abordagem inovadora envolve a colocação de estruturas de titânio nos ossos maxilares, que servem como substitutos das raízes dentárias naturais. O sucesso desse tipo de restauração depende de um processo crucial: a osseointegração. Objetivo: O presente trabalho se propõe a realizar uma revisão narrativa da literatura sobre o mecanismo de osseointegração de implantes osseointegráveis utilizados em odontologia à luz do desenvolvimento de superfícies de implantes de titânio utilizados rotineiramente na clínica odontológica. Metodologia: O presente projeto de pesquisa de revisão narrativa da literatura, utilizou a base de dados PUBMED® para levantamento de dados através dos descritores “osseointegration”, “dental implants” e “Surface Properties”. Resultados: A qualidade da osseointegração é de grande importância para garantir a estabilidade do implante e o sucesso a longo prazo do tratamento que irá permitir que o implante restabeleça a função mastigatória e estética do paciente. O processo da osseointegração é caracterizado por distintas fases sequências e interligadas e vários fatores influenciam o sucesso. A falha na osseointegração pode resultar em graves complicações. A implantodontia moderna revolucionou os implantes dentários tornando-os uma opção confiável e duradoura para a substituição de dentes ausentes. Conclusão: A osseointegração é um processo bem estabelecido, mas em constante evolução, que continua a proporcionar benefícios significativos aos pacientes que necessitam de reabilitação oral.

Palavras-chave: Implantes dentários; Osseointegração; Propriedades de superfície.

Abstract

The integration of dental implants is one of the most significant advances in contemporary dentistry, revolutionizing the way we deal with tooth loss and the restoration of chewing function and aesthetics. This innovative approach involves the placement of titanium structures in the jawbone, which serve as substitutes for natural tooth roots. The success of this type of restoration depends on a crucial process: osseointegration. Objective: This study aims to carry out a narrative review of the literature on the mechanism of osseointegration of osseointegrable implants used in dentistry in the light of the development of titanium implant surfaces routinely used in the dental clinic. Methodology: This narrative literature review research project used the PUBMED® database to search for data using the descriptors "osseointegration", "dental implants" and "implant dentistry". Results: The quality of osseointegration is of great importance to guarantee the stability of the implant and the long-term success of the treatment that will allow the implant to restore the patient's masticatory function and aesthetics. The process of osseointegration is characterized by different sequential and interconnected phases and several factors influence success. Failure in osseointegration can result in serious complications. Modern implant dentistry has revolutionized dental implants, making them a reliable and durable option for replacing missing teeth. Conclusion: Osseointegration is a well-established but constantly evolving process that continues to provide significant benefits to patients in need of oral rehabilitation.

Keywords: Dental implants; Osseointegration; Surface properties.

Resumen

La integración de implantes dentales es uno de los avances más significativos de la odontología contemporánea, que ha revolucionado la forma de abordar la pérdida de dientes y la restauración de la función masticatoria y la estética.

Este innovador enfoque consiste en la colocación de estructuras de titanio en el hueso maxilar, que sirven como sustitutos de las raíces de los dientes naturales. El éxito de este tipo de restauración depende de un proceso crucial: la osteointegración. Objetivo: Este estudio tiene como objetivo realizar una revisión narrativa de la literatura sobre el mecanismo de osteointegración de los implantes osteointegrables utilizados en odontología a la luz del desarrollo de las superficies de titanio de los implantes utilizados habitualmente en la clínica dental. Metodología: Este proyecto de investigación de revisión narrativa de la literatura utilizó la base de datos PUBMED® para buscar datos utilizando los descriptores "osseointegration", "dental implants" e "implant dentistry". Resultados: La calidad de la osteointegración es de gran importancia para garantizar la estabilidad del implante y el éxito a largo plazo del tratamiento que permitirá al implante restaurar la función masticatoria y la estética del paciente. El proceso de osteointegración se caracteriza por diferentes fases secuenciales e interconectadas y varios factores influyen en el éxito. Un fallo en la osteointegración puede dar lugar a graves complicaciones. La implantología moderna ha revolucionado los implantes dentales, convirtiéndolos en una opción fiable y duradera para sustituir dientes ausentes. Conclusión: La osteointegración es un proceso bien establecido pero en constante evolución que sigue aportando importantes beneficios a los pacientes que necesitan rehabilitación oral.

Palabras clave: Implantes dentales; Osteointegración; Propiedades de superficie.

1. Introdução

A base científica da implantodontia moderna foi estabelecida por Perÿ Ingvar Brånemark. Em estudos sobre a microcirculação do osso em coelho, conduzido na década de 1950, Brånemark descobriu que o dispositivo da câmara utilizada para filmagem da microcirculação na pata do coelho, feito do metal titânio, se tornou permanentemente incorporado ao osso. Um pouco mais há frente na história, a ancoragem óssea direta de implantes metálicos descoberta por Brånemark em 1962, tendo sido testada em alguns experimentos com animais, foi aplicada clinicamente para implantes orais em 1965. O desenvolvimento de implantes diretamente ancorados no osso foi um avanço nas possibilidades de tratar parcial ou totalmente indivíduos edêntulos (Bosshardt, et al., 2017).

O termo osseointegração foi cunhado por Brånemark em 1976 e então definido como um contato direto, no nível de resolução do microscópio de luz, para uma conexão estrutural e funcional direta entre osso vivo ordenado e a superfície de um implante de carga. Em uma sociedade que atribui grande valor à estética e à aparência, é imprescindível que os dentes, um dos maiores atributos do sorriso, sejam saudáveis e duráveis. A substituição de dentes perdidos por implantes são atualmente o procedimento de rotina para a reabilitação oral de pacientes parcial ou totalmente edêntulos (Pandey et al., 2022).

Atualmente, o titânio é o material mais favorável e bem documentado que entra na composição de implantes osseointegráveis, sendo preferido pela maioria das empresas globais de implantes devido à combinação de suas excelentes características como a alta resistência à fadiga, alta resistência à corrosão e ao desgaste, e com a completa inércia ao ambiente corporal, caracterizando sua biocompatibilidade. Aplicados em números crescentes, atualmente tornou-se um tratamento de rotina para reabilitações protéticas mais indicado nos tratamentos odontológicos em casos de perda dentária. Com o crescimento anual do número de cirurgias de implantes, as expectativas de pacientes e profissionais estão aumentando ainda mais com o desejo de um tratamento com cicatrização rápida do implante (em direção à aplicação funcional rápida), e estabilidade a longo prazo (em direção à aplicação funcional contínua) (Li et al., 2019).

Com o desenvolvimento científico revolucionário, a pesquisa relacionada ao osso na implantodontia tem se concentrado principalmente em duas questões importantes: como o processo de osseointegração pode ser melhorado; e como os implantes dentários podem ser mantidos bem integrados no osso a longo prazo (Bosshardt, et al., 2017).

As características da superfície do implante, como microrrugosidade e nanorrugosidade são características da sua constituição química e mecânica que podem contribuir para a osseointegração precoce. Contudo, a osseointegração também deve estar permeada por vários outros parâmetros, como estabilidade protética sob cargas funcionais, aposição de novo osso sem a interposição de tecido conjuntivo, falta de mobilidade do implante em relação ao tecido circundante sob carga funcional e a formação de tecidos ósseos e medulares constitucionais normais evidentes na superfície do implante e visíveis à microscopia óptica e eletrônica (Pandey et al., 2022).

De forma geral, a integração óssea é definida como uma conexão estrutural e funcional direta entre o osso vivo e superfície do implante. Nos dias atuais, diz-se que um implante é considerado osseointegrado quando não há movimento relativo progressivo entre o implante e o osso com o qual está em contato direto. Além dos principais fatores que afetam a osseointegração, como técnica cirúrgica, qualidade / quantidade óssea, inflamação, infecção pós-operatória, tabagismo, material e superfície do implante dentre outros fatores, devem ser levados em consideração, o estado imunológico e nutricional do paciente que irá receber o tratamento (Migliaccio et al., 2020).

Em relação à estabilidade a longo prazo dos implantes osseointegráveis, a perda óssea marginal em torno da base de implantes de titânio pode representar um risco para a sobrevivência do implante. O mecanismo dessa reabsorção óssea não é bem compreendido ainda nos dias atuais. A cicatrização óssea ao redor dos implantes de titânio continua sendo um processo complicado. Sabe-se que esse processo fisiológico é dinâmico, caracterizado por respostas celulares e estímulos locais. Uma das razões sugeridas para a ocorrência do fenômeno de reabsorção marginal é a transferência de carga inadequada do corpo do implante dentário para o osso circundante. As forças de mordida axiais médias em humanos normais sem implantes podem chegar a 500 N (Newtons) nos caninos, 600 N na região pré-molar e 800 N na região molar, que são aproximadamente iguais aos valores característicos da prótese em situação após a terapia com implantes. Portanto, a transferência de carga mecânica através da interface entre os implantes dentários e o tecido ósseo circundante é uma questão muito relevante e questionada quanto a cicatrização pós-operatória. Para se obter uma osseointegração rápida, um grande número de tentativas para corrigir e aperfeiçoar a osseointegração foram feitas em implantes à base de materiais de titânio. O tempo de cicatrização sugerido de implantes de titânio comuns é de três a seis meses antes que o carregamento se torne clinicamente viável, o que está longe das expectativas atual dos pacientes, que buscam a reabilitação com implantes e prótese quase sempre de maneira imediata (Li et al., 2019).

Os estudos sobre os processos biológicos da osseointegração ou aposição de matriz óssea calcificada sobre a superfície de um material sintético, implantado através de técnicas específicas de cirurgia, constituiu-se em uma das descobertas mais importantes da Odontologia clínica do século XX. Embora apresente tópicos ainda não totalmente compreendidos, envolvendo principalmente bioquímica da formação óssea, resposta celular e mecanismos reguladores de neoformação-reabsorção óssea, os resultados de pesquisas laboratoriais e estudos longitudinais em humanos recomendam a possibilidade de sua utilização clínica. Atualmente, a osseointegração proporciona aos profissionais de reabilitação oral a oportunidade de criarem, artificialmente, apoio para aparelhos protéticos em áreas onde a ausência de elementos dentários limita ou impede sua confecção do ponto de vista estético-funcional. Pesquisas foram direcionadas, também, para a viabilização mais rápida dos implantes osseointegrados para uso clínico, na tentativa de reduzir ou até eliminar o período de cicatrização óssea livre de carga funcional (Teixeira, 2004).

Pelo fato da osseointegração representar um avanço significativo na Odontologia moderna, com aplicações em diversas áreas, como a Implantodontia, a Prótese Dentária, a Ortodontia e a Periodontia, trata-se de um princípio biológico de grande interesse e relevância para a Odontologia, com potencial para contribuir significativamente para o avanço e aprimoramento da prática clínica em diferentes especialidades. É de grande interesse que cirurgiões-dentistas dominem esse princípio e o empreguem de maneira rotineira. O presente trabalho se propõe a realizar uma revisão narrativa da literatura sobre o mecanismo de osseointegração de implantes osseointegráveis utilizados em odontologia à luz do desenvolvimento de superfícies de implantes de titânio utilizados rotineiramente na clínica odontológica.

2. Metodologia

Trata-se de uma revisão narrativa de literatura, retrospectiva. Foram utilizadas as bases de dados Pubmed e Scielo, com as palavras-chave “osseointegration”, “dental implants”, “implant dentistry”, associados pelo operado booleano “E”, bem

como seus correspondentes em inglês. Foram selecionados artigos sem limitação de ano de publicação acerca da temática, e incluídos os artigos publicados em inglês e português disponíveis na íntegra. Foram utilizados trabalhos acadêmicos do tipo tese, dissertação, monografia, trabalho conclusão de curso e capítulo de livro no intuito de amplificar a abrangência desta revisão.

3. Resultados e Discussão

3.1 História da osseointegração e conceito

A introdução do conceito de osseointegração está sob extensa pesquisa desde 1952. O conceito surgiu de estudos microscópicos na medula óssea da fíbula de coelho, por meio de cirurgia de menor invasividade inspecionada em alta resolução sob um microscópio intravital modificado na pata do coelho. No início da década de 1960, estudos avaliaram a reação da medula óssea e do tecido articular a lesões teciduais mecânicas, químicas, térmicas e reológicas. Sendo a possibilidade de osseointegração evidente na maioria dos estudos, Branemark, em uma investigação voltada para estudos de revisão da microcirculação, observou tecido ósseo crescendo em espaços estreitos no titânio em meio ao dispositivo de filmagem que se incorporaram ao tecido ósseo de forma indissociável (Pandey et al., 2022).

Devido à falta de métodos e recursos que permitissem a preservação de osso intacto ao redor de espécimes metálicos, a evidência histológica da osseointegração permaneceu inadequada e secundária até o início dos anos 1970. Então, em meados da década de 1970, foi pela primeira vez que Schroeder demonstrou histologicamente a evidência de osseointegração em implantes, provando com sucesso um contato direto osso-implante. Mais tarde com os avanços de estudos e pesquisas (Niznick,2000). Cameron em 1973 sugeriu que o osso cresce em um material biocompatível apenas quando não acontece o movimento do osso e do implante na superfície (Cameron et al., 1973).

A osseointegração é um conceito introduzido por Per-Ingvar Branemark e que ampliou o espaço para opções de reabilitação em pacientes parcial e totalmente edêntulos. O renomado Branemark inicialmente definiu a osseointegração como “uma conexão estrutural e funcional direta entre o osso vivo ordenado e a superfície de um implante endósseo de carga no nível microscópico óptico”. Então, o termo osseointegração foi cunhado por Branemark em 1976 e definido como um contato direto, no nível de resolução do microscópio de luz, para uma conexão estrutural e funcional direta entre osso vivo ordenado e a superfície de um implante de carga (Pandey et al., 2022).

De acordo com a Academia Americana de Odontologia de Implantes (American Academy of Implant Dentistry) em 1986, a osseointegração é definida como “contato estabelecido sem a interposição de tecido não ósseo entre osso remodelado normal e um implante, acarretando uma transferência sustentada e distribuição de carga do implante para e dentro do tecido ósseo”. Em contrapartida o glossário de termos protodônticos-8 (GPT-8) definiu-a como “a fixação direta aparente ou conexão de tecido ósseo a um material inerte e aloplástico sem tecido conjuntivo interveniente”. Clinicamente, a osseointegração corresponde à estabilidade e anquilose na superfície de contato do osso e implante dentário (Albrektssö & Zarb,1993).

3.2 Fatores que afetam a osseointegração

A tendência demográfica em países industrializados resulta no aumento constante de pacientes idosos que apresentam condições clínicas avançadas, como deficiência óssea em termos de qualidade ou quantidade, bem como outras doenças concomitantes desafiadoras. A capacidade de osseointegração pode ser comprometida em pacientes que sofrem de diabetes mellitus, osteoporose, fazem uso de bifosfonatos ou foram submetidos à radioterapia. Esses pacientes representam um desafio significativo no campo da implantodontia odontológica, e requerem alterações na superfície dos implantes que promovam uma osseointegração mais rápida após a inserção. Além disso, o objetivo central da pesquisa biomédica voltada para modificações

na superfície dos implantes é acelerar a osseointegração para permitir protocolos de carga precoce mais convenientes. O foco principal dessas modificações é facilitar a osseointegração precoce e garantir um contato duradouro entre o osso e o implante, minimizando a perda de osso ao longo do tempo (Smeets et al., 2016).

Um estudo conduzido pelo instituto Latino-Americano de Pesquisas Odontológicas no Brasil, para identificar atores associados ou determinantes da falha do implante, concluíram que a maioria das falhas do implante (75%) não tinha causa clínica aparente. Os autores identificaram condições iatrogênicas, como técnica cirúrgica, contaminação e/ou trauma oclusal (17,5%), má qualidade e quantidade óssea (3%) e peri-implantite (1%), como as causas das falhas. Os autores não puderam determinar a causa da falha do implante nos 3,5% restantes da amostra avaliada no estudo, devido à falta de dados (Guglielmotti et al., 2019).

A saúde do osso, estrutura na qual os implantes são colocados, é um dos determinantes mais críticos da osseointegração. Ossos que foram irradiados ou apresentam deteriorações como a osteoporose têm pouca habilitação à osseointegração. Portanto, defende-se permitir algum atraso após a irradiação para colocação de implantes ou melhoraria das condições de cicatrização com oxigenoterapia hiperbárica para os fatores de interferência citados. Outros impedimentos esqueléticos do hospedeiro incluem histórico de tabagismo ou doenças sistêmicas, como diabetes ou hipertensão. Além disso, o aumento do rebordo alveolar ou enxerto ósseo deve ser realizado para abordar a reabsorção do rebordo alveolar ou volume insuficiente para alcançar a osseointegração adequada. Entre os fatores intraoperatórios, é ideal a minimização do dano tecidual, e a manutenção da temperatura óssea abaixo de níveis críticos, por meio de perfuração cirúrgica de baixa velocidade a fim de se evitar osteonecrose não intencional (Ruggiero et al., 2014).

O carregamento do implante para osseointegração suficiente é alcançável com uma estabilidade primária do implante completamente estabelecida. Estudos mostraram que não é comprovado que a prevenção de contatos oclusais, durante a fase de osseointegração, seria um evento benéfico. Dessa mesma forma, comparando a eficácia do carregamento imediato versus convencional do implante, estudos concluíram que o carregamento imediato poderia alcançar taxas de sobrevivência de implantes comparáveis em comparação com o carregamento precoce, mas não quando comparado ao carregamento convencional. As taxas de sobrevivência a longo prazo dos implantes permaneceram excelentes. Apesar das altas taxas de sucesso em pacientes edêntulos, falhas podem ocorrer durante ou após a osseointegração em uma pequena quantidade de pacientes. A falha primária do implante devido à osseointegração insuficiente ocorre em 1-2% dos pacientes. A falha secundária é frequentemente causada por peri-implantite vários anos após a osseointegração bem-sucedida em cerca de 5% dos pacientes. Em pacientes com diabetes mellitus, osteoporose, em uso de bisfosfonatos ou em radioterapia, a osseointegração é ainda um desafio para a reabilitação com implantes dentários. Novas tecnologias como modificações na superfície do implante são necessárias para melhorar a osseointegração após a inserção. As particularidades da superfície dos implantes dentários promovem processos biológicos durante a osseointegração, mediando a interação direta com osteoblastos hospedeiros na formação óssea (Albrektsson & Wennerberg, 2019).

O acúmulo de biofilme e a presença de um patógeno anaeróbico específico são identificados como a causa principal da perda óssea. Por mais de dez anos, a peri-implantite foi abordada por meio de procedimentos de limpeza mecânica e uso de agentes antimicrobianos, que eram semelhantes aos métodos utilizados para tratar a periodontite, uma doença gengival que afeta dentes naturais e apresenta características similares, como acúmulo de biofilme, sinais de inflamação nos tecidos moles, aumento na profundidade/sangramento ao sondar a bolsa gengival e destruição do osso de suporte. No entanto, a falta de sucesso em adaptar eficazmente as estratégias de tratamento da periodontite para a peri-implantite ressalta a necessidade de distinguir os agentes patogênicos associados à peri-implantite daqueles relacionados à periodontite (Kligman et al., 2021).

3.3 Superfícies e topografia de implantes dentários e o processo de osseointegração

Várias mudanças de superfície foram aplicadas em implantes por subtração e métodos aditivos, incluindo método físico (torneamento, jateamento); método químico (ataque ácido, álcali); método eletroquímico (anodização por eletropolimento); método por deposição (pulverização de plasma, sol-gel) e método bioquímico (proteínas). Os avanços no processo de osseointegração de implantes dentários foram obtidos através do tratamento de superfície e do estabelecimento de rugosidade da superfície do implante (por exemplo, jateamento, ataque ácido). Além disso, alterações visando aumentar a resistência à corrosão (odização), alteram a energia superficial, além disso, modificações da composição de superfície pela adição de diferentes elementos têm sido relacionado a propostas de melhoria (Berglundh et al., 2007).

Com base nos estudos e a relação com a escala, a topografia do implante dentário pode ser dividida em macro, micro e nanoescala. As pesquisas científicas foram enfatizadas principalmente em micro e nanogeometria de superfícies. A topografia de superfície é fundamental para a adesão e diferenciação dos osteoblastos no estágio inicial da osseointegração. A macrotopografia de um implante é baseada em sua geometria visível (escala milimétrica). Uma macrogeometria adequada associada ao preparo adequado do orifício de perfuração do implante dentário é fundamental para o sucesso e qualidade na implantodontia. A microtopografia está relacionada à microrrugosidade em escala micrométrica (1–100 µm). Nas últimas décadas, os implantes dentários tinham principalmente superfícies usinadas, o que indica um processo de fabricação torneado, fresado ou polido. Nessas superfícies, as irregularidades permitem que as células osteogênicas se unam e depositem osso, produzindo a interface osso-implante. Dependendo da posição anatômica e da qualidade óssea, o tempo de cicatrização dos implantes usinados é de cerca de 3 a 6 meses. A microtopografia da superfície do implante atua no nível celular da osseointegração (Albrektsson & Wennerberg, 2019).

Mudanças na superfície do implante em nanoescala foram desenvolvidas, e a nanotopografia pode influenciar a orientação, alinhamento, diferenciação, migração e proliferação celular, regulando o comportamento celular. Nos implantes dentários, a nanotopografia afeta a interação entre células e implantes nos níveis celular e proteico, conseguindo uma melhor e mais rápida osseointegração ao atuar na diferenciação dos osteoblastos. Alterações na nanotopografia produzem efeitos em nível físico, químico e biológico, resultando em aumento da adesão de células osteogênicas e potencialmente estimulando a osseointegração. No entanto, pesquisas são necessárias para verificar se as topografias de superfície em escala nanométrica melhoram a osteogenicidade dos implantes de titânio (Pachauri et al., 2014).

A rugosidade é um fator importante na determinação da osseointegração do implante dentário. Além disso, superfícies ásperas aumentam o contato osso-implante, sendo que alguns resultados mostraram uma relação entre a rugosidade da superfície e o comportamento celular. No entanto, a rugosidade ideal da superfície para osseointegração e estabilidade primária ainda permanece incerta (Albrektsson & Wennerberg, 2019).

Considerando que a osseointegração depende da adesão bioquímica, as superfícies torneadas originais foram substituídas por superfícies com rugosidade moderada por proporcionarem melhor ancoragem óssea. Num estudo comparando superfícies, a rugosidade microscópica confirmou os efeitos benéficos de superfícies moderadamente rugosas na diferenciação e migração de osteoblastos. Pesquisas atuais sobre rugosidade de implantes dentários mostram que superfícies isotrópicas e moderadamente rugosas estão bem documentadas e têm um bom histórico de sucesso (Andrukhov et al., 2016).

A nanotecnologia tem ganhado ampla atenção na mídia científica e pode ser definida como a ciência envolvida no projeto, síntese, caracterização e aplicação de materiais e dispositivos cuja menor organização funcional está na escala nanométrica (um a cem nanômetros; um bilionésimo de metro). Superfícies nanoestruturadas são capazes de induzir adesão de células ósseas, crescimento e diferenciação das mesmas, promovendo interações de proteínas específicas. As nanoestruturas podem ser aplicadas em um implante de superfície com hidroxiapatita nanométrica ou partículas de TiO₂. Resultados mostraram que as nanoestruturas também podem aparecer espontaneamente em superfícies de titânio. Pesquisas *in vitro* e *in vivo*

vivo apresentaram mais células ósseas para proliferar e maior integração do tecido ósseo quando os implantes contêm essas nanoestruturas. Apesar disso, há controvérsias na literatura e a relevância clínica permanece não revelada. Alguns benefícios da nanorugosidade em implantes dentários de titânio incluem aumento da área de superfície, melhoria da fixação celular e interface biomecânica do implante com o osso. Os estudos verificaram que o titânio na superfície dissecada aumenta significativamente a retenção de coágulos sanguíneos e a nanorugosidade, favorecendo a óssea integração (Albrektsson & Wennerberg, 2019).

Foi introduzida tecnologia de revestimento através da qual hidroxiapatita e fosfato de cálcio são aplicados na superfície do implante. As nanohidroxiapatitas possuem superfícies nanoestruturadas com maior área superficial e maior reatividade, permitindo que se liguem ao osso para formar um revestimento biomimético nos implantes. No entanto, devido à interação de células e superfícies de biomateriais após a cirurgia de implante dentário, são necessárias mais pesquisas para desenvolver implantes eficazes. Apesar dos contínuos avanços tecnológicos em nanoescala, ainda faltam evidências clínicas de nanorugosidade e osseointegração em superfícies de implantes dentários. Descobertas inovadoras sobre nanorugosidade são de grande valor nas áreas de implantologia, cirurgia maxilofacial ou ortopédica, superfícies de implantes e implantes cardiovasculares em contato permanente com o sangue do paciente (Yazdani et al., 2018).

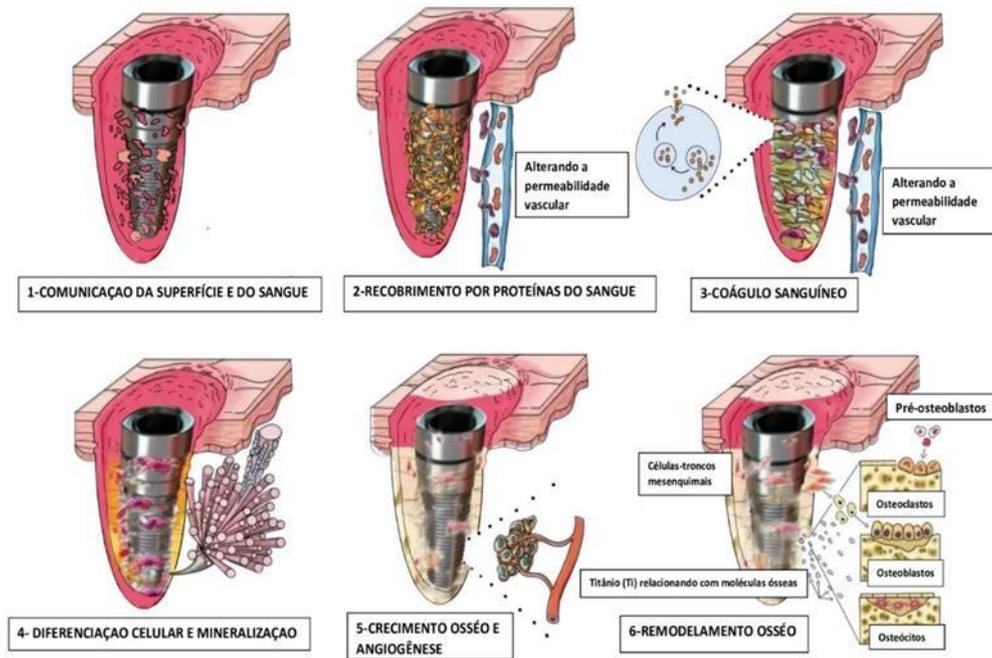
3.4 Mecanismo da osseointegração

A fisiologia celular e molecular da osseointegração é um evento fisiológico durante a integração do osso e do implante, que está associado com o processo de consolidação óssea primária. Tal evento começa quando o implante é colocado no osso e a água forma uma camada ao redor em nanossegundos, facilitando a absorção de proteínas e outras moléculas essenciais. Através desta camada de proteína, inicia-se a adesão, a migração e a diferenciação celular, facilitando a interação celular com a superfície do implante por horas ou dias. No entanto, além da identidade química e liberação de íons, esse evento será sintonizado e introduzido por proteínas da matriz extracelular (MEC), proteínas do citoesqueleto, proteínas de ligação da superfície celular e topografia de ligação. As proteínas da MEC transmitem dados decodificáveis para células e estruturas coesivas, determinando forma, fluidez, polaridade, expressão gênica, sobrevivência e proliferação celular. Essa forma de transferência de dados ocorre em diversas proteínas, como colágeno tipo I, fibronectina, osteopontina, osteonectina, osteoadesina, sialina óssea, além de proteínas plasmáticas específicas (Ratner & Bryant, 2004).

Quando o titânio é exposto ao ar, uma fina camada de óxido de titânio se forma na superfície, protegendo a superfície de titânio altamente reativa da bioerosão, além de melhorar a resistência ao desgaste. No entanto, essa camada também afeta a biomineralização, permitindo que Ca^{2+} e PO_4 sejam adsorvidos na superfície. Uma vez ativada, a osseointegração segue eventos biológicos comuns e é dividida em três fases: a integração do implante ao osso através da formação de tecido ósseo, a adaptação da massa óssea (osso lamelar e fibras paralelas) à carga e, finalmente, a fase em que a estrutura óssea (remodelação óssea) se adapta à carga (Pandey et al., 2022).

A osseointegração está associada à consolidação óssea e interligada a conhecimentos de fratura (Figura 1). Já foi documentado que o processo de osseointegração é semelhante ao da consolidação da fratura, em que o osso lamelar substitui o tecido ósseo inicialmente formado e as células progenitoras no local da osseointegração são completamente diferentes daquelas no local da consolidação da fratura. Elas se diferenciam em osteoblastos e, em seguida, a ossificação intramembranosa prossegue, enquanto a população celular não se diferencia em condroblastos e contribui para a ossificação endocondral. Outra grande diferença é a presença de um implante e a sua superfície. Ao contrário dos locais de fratura, a maior parte da lacuna óssea é preenchida com o implante, minimizando a área para novo preenchimento ósseo. Além disso, as propriedades da superfície do implante e os novos tratamentos de superfície provocaram ainda mais respostas osteoblásticas (Colnot et al., 2007).

Figura 1 - Processos de osseointegração da superfície dos implantes dentários



Fonte: Autores (2023).

Imagem I: Processo de osseointegração e adsorção de proteínas plasmáticas adesivas e melhoramento da quimioatração de células indiferenciadas.

3.5 Tipos de implantes osseointegráveis

No ano de 1986, os pesquisadores da Sociedade Europeia de Biomateriais elaboraram um documento, conceituando biomaterial como "todo material não-viável usado em aparato médico, desenvolvido para interagir com sistemas biológicos". Existem quatro grupos diferentes de biomateriais utilizados em ciências biomédicas: (I) os metais e as ligas metálicas, representando o grupo mais usado comercialmente; (II) os cerâmicos, também com ampla aplicação; (III) os polímeros sintéticos, representados pelos derivados de compostos de poliuretano, politetrafluoretilenos, polimetilmetacrilatos; (IV) os materiais naturais. Existem aproximadamente 1.300 sistemas de implantes com forma, dimensão, volume e material de superfície distintos, design de rosca, conexão implante-pilar, topografia e composição química de superfície, molhabilidade e modificação de superfície (Matos, 2020).

O uso moderno de implantes metálicos e poliméricos para aplicações nas práticas odontológicas vem evoluindo nos últimos 60 anos, com grandes avanços vindos da área de implantes dentários. Originalmente, esperava-se que os implantes endósseos realizassem sua função simplesmente através de uma ancoragem mecânica com osso. Os primeiros esforços tiveram taxas de falha relativamente altas, em parte devido a uma camada de tecido conjuntivo fibroso que cresce entre o osso e o implante. A formação da cápsula fibrosa, considerada uma consequência inevitável do procedimento de implantação, pode iniciar um ciclo vicioso de micromovimento e inflamação ao redor do implante que eventualmente leva à osteólise e à falha do implante. Para alcançar resultados duradouros e bem-sucedidos, é necessária uma interação forte e direta entre o osso e a superfície do implante. Esse contato direto entre o osso e a superfície do implante define a osseointegração e é o objetivo atual de um procedimento de implantação óssea bem-sucedido (Gittens et al., 2014).

No campo da engenharia de tecidos ósseos, os biomateriais utilizados devem atender a várias características essenciais para desempenhar seu papel de maneira eficaz. Eles precisam ser biocompatíveis, o que significa que não devem causar

reações adversas no corpo, osteoindutores, capazes de promover a formação óssea, osteocondutores, que oferecem um suporte físico para o crescimento do osso, osteopromotores, que estimulam a atividade das células ósseas, além de serem porosos para permitir a migração de células, e mecanicamente compatíveis com o osso hospedeiro para fornecer a estabilidade necessária. Esses materiais desempenham um papel crucial, fornecendo locais onde as células podem se ancorar e garantindo a estabilidade mecânica. Além disso, eles atuam como uma espécie de estrutura guia que oferece uma interface adequada para responder aos estímulos fisiológicos e às mudanças biológicas. Isso permite que a matriz do material seja remodelada ao longo do tempo para promover a integração com o tecido hospedeiro, facilitando assim o processo de engenharia de tecidos ósseos (Guglielmotti et al., 2019).

Os polímeros sintéticos e os materiais naturais não são apresentados nesta revisão devido ao completo abandono destes materiais pelos fabricantes de sistemas de implante dentário, e os naturais por serem usados somente em situações de enxerto tecidual. Ligas como cromo-cobalto-molibdênio, ferro-cromo-níquel, aço inoxidável e metais como ouro, platina e prata foram testados como possíveis alternativas para Implantodontia, conforme os avanços clínicos cirúrgicos no passar dos anos. Reações como o encapsulamento fibroso das peças implantadas, ligada a grande e significativa reabsorção óssea peri-implantar, foram descritas em uma porcentagem de casos. No grupo dos metais e ligas metálicas, até hoje o titânio comercialmente puro (CP) e a liga de titânio-alumínio-vanádio (Ti6Al4V) são os elementos com maior base de pesquisa científica, com sucesso comprovado a longo prazo para uso em Implantodontia. As vantagens como o custo relativamente baixo do metal em relação aos metais nobres, a alta estabilidade química da camada superficial de óxidos (TiO, TiO₂, Ti₂O₃), formada durante o corte da peça de titânio, e a "biocompatibilidade" do titânio têm sido confirmados por diversos estudos. No entanto, a condutividade térmica e elétrica, inerente a todos os metais, e a menor resistência em comparação com outros metais e ligas também foram listadas como desvantagens do titânio como biomaterial. Uma propriedade chamada bioinércia ou passividade do metal em relação ao tecido ósseo adjacente também foi atribuída ao titânio, em oposição a outros chamados materiais bioativos, que fornecem ligação química e mecânica com o osso adjacente no nível do osso na interface osso-implante (Teixeira, 2004).

Os materiais cerâmicos usados em Implantodontia podem ser classificados em dois grupos: os derivados de fosfato de cálcio e os não-derivados. Dentro dos derivados de fosfato de cálcio, os elementos mais utilizados até hoje foram a hidroxiapatita sintética [Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂]; o tri-cálcio fosfato[Ca₃(PO₄)₂(OH)] e o penta-cálcio-hidroxi-tri-fosfato. No grupo dos não-derivados, destacam-se a cerâmica de alumina (Al₂O₃), a cerâmica de zircônia (ZrO₂) e o cristal de safira (Al₂O₃) entre outros. A função crucial dos cerâmicos é de apresentam biocompatibilidade, atoxicidade, atuarem como excelentes isolantes térmicos e elétricos e apresentarem baixa solubilidade em meio orgânico quando sintetizados em fase densa com alto percentual de cristalinidade. Contudo, eles apresentam maiores desvantagens em relação a serem mais friáveis, possuem baixa resistência à tração e ao cisalhamento, quando utilizados como cobertura de superfície para implantes metálicos. De acordo com os estudos e pesquisas, além dessa possível união químico-mecânica a cerâmica nos revela maior percentual inicial de contato ósseo com a superfície do implante, resultando na diminuição do tempo de tratamento. Entretanto, aspectos fundamentais como a longevidade e real aplicabilidade clínica desses materiais carecem de maiores comprovações científicas (Teixeira, 2004).

Avanços recentes no desenvolvimento de biomateriais de implantes dentários direcionados a metais e suas ligas têm ocorrido, principalmente relativo as suas biocompatibilidade e propriedades físicos e químicas aceitáveis. Titânio e ligas de titânio têm sido os biomateriais de escolha quando se trata de implantes dentários. Materiais à base de cerâmica (por exemplo, zircônia, alumina endurecida por zircônia e zircônia endurecida por alumina) também estão ganhando popularidade como biomateriais para implantes dentários. A zircônia tem melhor resistência à flexão, maior tenacidade à fratura e libera menos íons do que o titânio. Além disso, os implantes de zircônia apresentam melhor osseointegração e propriedades estéticas em

comparação aos implantes de titânio (Pandey et al., 2022).

O tântalo é outro metal que atualmente está sendo estudado como biomaterial para implantes dentários. O tântalo poroso aumentou a resistência à corrosão e tem sido usado com sucesso como material de implante em cirurgia ortopédica para melhorar a angiogênese e a cicatrização de feridas. Existem poucos estudos sobre o uso do tântalo como biomaterial para implantes dentários. Alguns estudos *in vitro* concluíram que o tântalo poroso tem uma maior capacidade de osseointegração do que os implantes de titânio lisos ou rugosos atualmente disponíveis. Em um estudo retrospectivo, os implantes de tântalo-titânio porosos trabeculares reforçados com metal mostraram significativamente menor perda óssea peri-implantar em comparação com os implantes regulares convencionais de titânio (Edelmann et al, 2019).

O Polieterecetercetona (PEEK) é um polímero orgânico que está ganhando popularidade como biomaterial para implantes dentários e dentaduras. Comparado ao titânio, o PEEK tem um módulo de elasticidade maior, o que permite distribuir as forças mastigatórias uniformemente quando usado como implante dentário. Além disso, o PEEK tem melhor estabilidade de cor e maior resistência à abrasão do que a zircônia. No entanto, na ausência de qualquer modificação de superfície, o PEEK não produz osseointegração; a interface PEEK-osso forma apenas um intertravamento mecânico. Portanto, para melhorar a osseointegração, a modificação da superfície foi realizada usando sprays de hidroxiapatita, óxido de titânio e fosfato de magnésio (Mishra & Chowdhary, 2019).

3.6 O papel das técnicas cirúrgicas no processo de osseointegração

Outra das premissas do protocolo de Branemark, aparentemente agora questionada pelo mesmo e por seus grupos de estudo, é a carga diferida. Durante anos, foi universalmente aceito que os implantes deveriam ser colocados totalmente submersos e deixados durante o período da osseointegração absolutamente livres de carga. O tempo variava de três meses para os tipos de ossos I e II e de seis ou mais meses para os tipos ósseos III-IV e de recente formação. Hoje, a mudança representada pelo comportamento distinto do osso em relação à superfície tratada do implante põe em dúvida este conceito. Ao que parece, nos ossos de boa qualidade se poderia falar de carga prematura (ou implantes de meio tempo), ou ainda de carga imediata em ossos do tipo I com excelentes resultados clínicos em tempo relativamente curto (Cafesse, Chaves, 2004).

Um importante trabalho clínico multicêntrico sugeriu que a carga funcional positiva dos implantes dentais com superfície tratada (98,5%) é possível aos dois meses seguintes à colocação sem complicações. Entretanto, os autores ressaltaram que ainda que os altos índices de êxito tenham sido alcançados neste estudo, são necessárias pesquisas adicionais para a completa avaliação do impacto clínico da carga prematura. Até agora, nada definitivo foi comprovado sobre o tema. Os estudos são escassos e de médio ou curto prazo. Falta saber o que ocorre e qual é o comportamento dos implantes submetidos à carga funcional a longo prazo. Somente o tempo, a pesquisa clínica e o seguimento longitudinal poderão avaliar seu comportamento através dos anos. Também não se pode negar o fato de que os estudos a médio prazo indicam, irrefutavelmente, o êxito desta nova mudança no protocolo cirúrgico (Teixeira, 2004).

Relevante trabalho conduzido por Randow e Ericsson em 1999, utilizando implantes em osso tipo I, com ancoragem bicortical e comprimento não inferior a dez mm, evidenciou os seguintes resultados relativos à realização de carga imediata para a amostra testada: não houveram perdas de implantes; todos os implantes dentários se apresentavam estáveis ao final do período observacional; à análise radiográfica, a perda média de suporte ósseo foi de 0,4 mm no grupo experimental e de 0,8 mm no grupo controle. Os autores concluíram que é possível realizar com sucesso implantes de titânio de forma imediata, após sua instalação, através de prótese fixa parafusada no arco mandibular em osso do tipo I. Não obstante, até o momento, nada parece indicar que se pode encurtar o tempo da carga protética em ossos de baixa qualidade (tipo IV) ou de geração recente (Cafesse & Chaves, 2004).

4. Conclusão

A osseointegração de implantes dentários é um tema de extrema relevância na odontologia, e ao longo deste trabalho, exploramos em profundidade os conceitos, técnicas e avanços relacionados a esse processo. A osseointegração não apenas revolucionou a prática da odontologia, mas também melhorou significativamente a qualidade de vida dos pacientes que buscam a substituição de dentes ausentes ou comprometidos. Através da análise dessa revisão de literatura ficou claro que a osseointegração é um fenômeno complexo que envolve uma interação precisa entre o implante e o osso alveolar. Os avanços nos materiais e nas técnicas cirúrgicas têm desempenhado um papel crucial na melhoria da taxa de sucesso dos implantes dentários. No entanto, também é evidente que a manutenção de uma higiene oral adequada e o acompanhamento a longo prazo são igualmente cruciais para o sucesso a longo prazo do tratamento com implantes.

Concluimos, portanto, que a osseointegração é um processo bem estabelecido, mas em constante evolução, que continua a proporcionar benefícios significativos aos pacientes que necessitam de reabilitação oral. Como pesquisadores e profissionais da odontologia, é fundamental estarmos atualizados com as últimas descobertas e técnicas para oferecer o melhor atendimento aos nossos pacientes. Além disso, a educação contínua e a pesquisa são ferramentas essenciais para aprimorar ainda mais a osseointegração e, assim, melhorar a qualidade de vida dos pacientes. À medida que avançamos, esperamos que novas inovações e descobertas continuem a moldar o campo da implantodontia, tornando a osseointegração ainda mais previsível, duradoura e acessível a um número cada vez maior de pessoas.

Os autores recomendam fortemente que trabalhos prospectivos sejam construídos em observação ao processo de osseointegração de acordo com o desenvolvimento de novas superfícies de implantes osseointegráveis e protocolos cirúrgicos de instalação desses implantes. O acompanhamento de casos clínicos de acordo com essas variáveis é condição essencial para a mensuração do sucesso clínico de tratamentos reabilitadores com implantes osseointegráveis.

Referências

- Albrektsson T., & Zarb G. A. (1993). Interpretações atuais da resposta osseointegrada: significado clínico. *Int J Prosthodont.* 6, 95–105.
- Andrukhov O., Huber R., & Shi B. (2016). Proliferação, comportamento e diferenciação de osteoblastos em superfícies de diferentes microrugosidade. *Dent Mater.* 32(35), 1374–1384.
- Berglundh, T., Abrahamsson, I., Albouy, J.-P., & Lindhe, J. (2007). Bone healing at implants with a fluoride-modified surface: an experimental study in dogs. *Clinical Oral Implants Research*, 18(2), 147–152.
- Bosshardt, D. D., Chappuis, V., & Buser, D. (2016). Osseointegration of titanium, titanium alloy and zirconia dental implants: current knowledge and open questions. *Periodontology 2000*, 73(1), 22–40.
- Cafesse, R. G., Chaves, R. H (2004). *Implantes Osseointegrados: cirurgia e prótese*. São Paulo: Editora Artes Médicas Ltda, 515 p.
- Cameron, H. U., Pilliar, R. M., & Macnab, I. (1973). The effect of movement on the bonding of porous metal to bone. *Journal of Biomedical Materials Research*, 7(4), 301–311.
- Colnot, C., Romero, D. M., Huang, S., Rahman, J., Currey, J. A., Nanci, A., Brunski, J. B., & Helms, J. A. (2007). Molecular Analysis of Healing at a Bone-Implant Interface. *Journal of Dental Research*, 86(9), 862–867.
- Dinato, J. C., & Polido, W. D. (2001). Implantes osseointegrados: cirurgia e prótese. *Implantes Osseointegrados: Cirurgia E Prótese*, 529–529.
- Edelmann A. R., Patel D., Allen R. K, Gibson C. J., Best, C. M., & Bencharit, S. (2019). Análise retrospectiva de implantes dentários de titânio reforçados com metal trabecular de tântalo poroso. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 121(3), 404–410.
- Gerald, A., Niznick. (2000). Atingindo a osseointegração em ossos moles: a busca por melhores resultados. *Oral Health*, 90, 27–32.
- Gittens, R. A., Olivares-Navarrete, R., Schwartz, Z., & Boyan, B. D. (2014). Implant osseointegration and the role of microroughness and nanostructures: Lessons for spine implants. *Acta Biomaterialia*, 10(8), 3363–3371.
- Guglielmotti, M. B., Olmedo, D. G., & Cabrini, R. L. (2019). Research on implants and osseointegration. *Periodontology 2000*, 79(1), 178–189.
- Li, J., Jansen, J. A., Walboomers, X. F., & van den Beucken, J. J. (2020). Mechanical aspects of dental implants and osseointegration: A narrative review. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 103, 103574.
- Matos, G. R. M. (2020). Surface Roughness of Dental Implant and Osseointegration. *Journal of Maxillofacial and Oral Surgery*.

- Mishra, S., & Chowdhary, R. (2018). PEEK materials as an alternative to titanium in dental implants: A systematic review. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 21(1), 208–222.
- Nastri, L., Moretti, A., Migliaccio, S., Paoletta, M., Annunziata, M., Liguori, S., Toro, G., Bianco, M., Cecoro, G., Guida, L., & Iolascon, G. (2020). Do Dietary Supplements and Nutraceuticals Have Effects on Dental Implant Osseointegration? *A Scoping Review Nutrients*, 12(1).
- Pachauri, P., Bathala, L. R., & Sangur, R. (2014). Techniques for dental implant nanosurface modifications. *The Journal of Advanced Prosthodontics*, 6(6), 498.
- Pandey, C., Rokaya, D., & Bhattarai, B. P. (2022). Contemporary Concepts in Osseointegration of Dental Implants: A Review. *BioMed Research International*, 2022, 1–11.
- Ratner, B. D., & Bryant, S. J. (2004). Biomaterials: Where We Have Been and Where We Are Going. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 6(1), 41–75.
- Ruggiero, S. L., Dodson, T. B., Aghaloo, T., Carlson, E. R., Ward, B. B., & Kademani, D. (2022). American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons' Position Paper on Medication-Related Osteonecrosis of the Jaws—2022 Update. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 80(5), 920–943.
- Salvatore, L. R., et al (2014). Documento de posição da Associação Americana de Cirurgiões Orais e Maxilofaciais sobre Osteonecrose da Mandíbula Relacionada a Medicamentos. *Jornal de Cirurgia Oral e Maxilofacial: Jornal Oficial da Associação Americana de Cirurgiões Orais e Maxilofaciais*. 72 (10).
- Smeets, R., Stadlinger, B., Schwarz, F., Beck-Broichsitter, B., Jung, O., Precht, C., Kloss, F., Gröbe, A., Heiland, M., & Ebker, T. (2016). Impact of Dental Implant Surface Modifications on Osseointegration. *BioMed Research International*, 2016, 1–16.
- Teixeira, E, R (2004). *Implantes Osseointegrados: cirurgia e prótese*. São Paulo: Editora Artes Médicas Ltda, 515 p.
- Yazdani, J., Ahmadian, E., Sharifi, S., Shahi, S., & Maleki Dizaj, S. (2018). A short view on nanohydroxyapatite as coating of dental implants. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 105, 553–557.