

RESSALVA

Atendendo solicitação da autora, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 26/05/2025.



UNESP - Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”
Faculdade de Odontologia de Araraquara



Nicole Casalle

Avaliação do comportamento mecânico e distribuição de forças em implantes dentários híbridos e curtos comparando diferentes designs: análise por ensaios mecânicos e elementos finitos

Araraquara

2023



UNESP - Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”
Faculdade de Odontologia de Araraquara



Nicole Casalle

Avaliação do comportamento mecânico e distribuição de forças em implantes dentários híbridos e curtos comparando diferentes designs: análise por ensaios mecânicos e elementos finitos

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Odontologia, Araraquara para obtenção do título de Doutora em Odontologia, na Área de Implantodontia

Orientador: Prof. Dr. Luis Geraldo Vaz

Araraquara

2023

C334a Casalle, Nicole
Avaliação do comportamento mecânico e distribuição de forças em implantes dentários híbridos e curtos comparando diferentes designs: análise por ensaios mecânicos e elementos finitos / Nicole Casalle. -- Araraquara, 2023
105 p. : tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Odontologia, Araraquara
Orientadora: Luis Geraldo Vaz

1. Implantes dentários. 2. Análise de elementos finitos. 3. Fenômenos biomecânicos. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Odontologia, Araraquara. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Nicole Casalle

Avaliação do comportamento mecânico e distribuição de forças em implantes dentários híbridos e curtos comparando diferentes designs: análise por ensaios mecânicos e elementos finitos

Comissão julgadora

Tese para obtenção do grau de Doutor em Odontologia

Presidente e orientador: Prof. Dr. Luis Geraldo Vaz

2º Examinador: Prof. Dr. Francisco de Assis Mollo Junior

3º Examinador: Prof. Dr. Mário Augusto Pires Vaz

4º Examinador: Prof. Dr. Pedro Yoshito Noritomi

Araraquara, 26 de maio de 2023.

DADOS CURRICULARES

Nicole Casalle

NASCIMENTO: 22/09/1989 – Araraquara – São Paulo

FILIAÇÃO: Carlos Alberto Casalle
Maria Elisabete Corbi Casalle

2008/2012 **Graduação em Odontologia**
Faculdade de Odontologia de Araraquara – UNESP

2010/2011 **Estágio de Iniciação Científica na Disciplina de Dentística**
Orientador: Prof. Dr. Marcelo Ferrarezi de Andrade
Faculdade de Odontologia de Araraquara – UNESP

2010/2012 **Bolsista PIBIC de Iniciação Científica**
Orientador: Prof. Dr. Marcelo Ferrarezi de Andrade

2010/2011 **Estágio de Iniciação Científica na Disciplina de Prótese**
Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Mollo Junior
Faculdade de Odontologia de Araraquara – UNESP

2010/2012 **Bolsista FAPESP de Iniciação Científica**
Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Mollo Junior
Faculdade de Odontologia de Araraquara – UNESP

2011/2011 **Curso de Aperfeiçoamento em Cirurgia Bucal**
Centro de Pesquisa e Tratamento das Deformidades Buco-Faciais

2013/2013 **Estágio de Atualização em Cirurgia Ortognática**
JRG Odontologia

2013/2013 **Estágio de Atualização em Cirurgia de ATM**
JRG Odontologia

2012/2012 **Curso de Atualização Implantes Dentários**
Bionnovation Produtos Biomédicos

2014/2016 **Mestrado em Ciências Odontológicas, área de Diagnóstico Bucal e Cirurgia**

Faculdade de Odontologia de Araraquara – UNESP

Orientador: Prof. Dr. Cleverton Roberto de Andrade

Bolsista CNPq

2015/2015 **Curso de Aperfeiçoamento em Cirurgia Bucal**

Centro de Pesquisa e Tratamento das Deformidades Buco-Faciais

2016/2018 **Especialização em Implantodontia e Prótese sobre implante**

Associação Paulista de Cirurgiões Dentistas de São Carlos

2018/Atual **Pós-Graduação em Odontologia – Nível Doutorado**

Faculdade de Odontologia de Araraquara – UNESP

Orientador: Prof. Dr. Luis Geraldo Vaz

Bolsista CNPq

2021/2022 **Estágio de Doutorado Sanduíche**

Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade do Porto

Laboratório de Ótica e Mecânica Experimental

Porto- Portugal

Bolsista CAPES Print- 88887.570438/2020-00

Dedico esse trabalho, com muito amor, para as pessoas mais importantes da minha vida, meus pais e meu irmão, que me apoiaram em todos os momentos e permitiram a concretização de mais uma etapa da minha formação profissional.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado a vida, saúde e a oportunidade de crescer profissionalmente e alcançar meus objetivos.

Aos meus pais, Elisabete e Carlos, por terem proporcionado todo o meu estudo, nunca medindo esforços para que eu tivesse as melhores oportunidades. Amo muito vocês e serei eternamente grata!

Ao meu irmão, Carlinhos, por estar sempre presente e me apoiando em todos os momentos. Obrigada pela parceria e amizade, amo muito você!

A minha avó Maria, que mesmo ausente fisicamente, sempre estará em meu coração e me acompanhando em cada passo da minha vida.

Em especial, ao meu orientador, Prof. Dr. Luis Geraldo Vaz, pela confiança em mim depositada, por ter sido meu apoio e meu guia nessa jornada tão desafiadora, mas muito gratificante! Obrigada pela amizade, pela convivência agradável e por ter sido exemplo de como um orientador deve ser.

Ao Prof. Dr. Pedro Yoshito Noritomi e ao Leonardo, pela generosidade e paciência com que me orientaram e ao Centro de Tecnologia da Informação- Renato Archer, pela enorme colaboração com esse trabalho.

Ao Prof. Dr. Mário Augusto Pires Vaz, me faltam palavras para agradecer a oportunidade de realização do estágio de doutorado sanduíche, o acolhimento na Universidade do Porto e o excelente suporte. Muito obrigada, nunca esquecerei da cidade do Porto e dessa experiência tão engrandecedora.

A Faculdade de Odontologia de Araraquara, por ter me aberto as portas e me recebido de maneira tão maravilhosa desde a graduação. Por ser onde passei os melhores anos da minha vida e por continuar fornecendo um ensino de excelência.

A Neodent, por tão gentilmente patrocinarem esse estudo com os implantes e componentes que foram utilizados nas análises

A CAPES: O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001. Agradeço também pela concessão da Bolsa CAPES Print-88887.570438/2020-00.

Casalle N. Avaliação do comportamento mecânico e distribuição de forças em implantes dentários híbridos e curtos comparando diferentes designs: análise por ensaios mecânicos e elementos finitos [tese de doutorado]. Araraquara: Faculdade de Odontologia da UNESP; 2023.

RESUMO

O objetivo do presente estudo foi analisar o comportamento mecânico e a distribuição de forças de implantes dentários híbridos, de diferentes geometrias, instalados em região de maxila posterior, pelo método de elementos finitos (MEF). Os modelos virtuais e físicos foram inicialmente gerados a partir do software de CAD Rhinoceros 7® da McNeel, utilizando como base a estrutura óssea de um segmento posterior de maxila, desenvolvida por meio do protocolo BioCAD. Para o MEF foi confeccionada malha 3D tetragonal de primeira ordem. Implantes de duas diferentes conexões protéticas, hexágono externo (HE) e grand Morse (GM), foram simulados na análise computacional e submetidos a cargas oblíquas de 100N com angulação de 30° em relação ao longo eixo do implante. Os campos de deslocamentos e tensões foram comparados entre os implantes. O experimento de correlação digital de imagem (DIC) foi realizado nos modelos físicos para validar a análise computacional. Para a DIC, foram impressos corpos de prova em poliamida por meio da tecnologia de manufatura aditiva SLS (*Selective Laser Sintering*), pela impressora HIQ (Sinterstation), onde os implantes foram instalados e posteriormente carregados com carga oblíqua de 24N. Em outra análise de elementos finitos, implantes GM modificados na região apical, nomeados de acordo com os cortes realizados no ápice: C- controle (sem corte apical); B- bi-partido; T- tri-partido; Q- quadri-partido, foram submetidos a ação de um movimento de rotação em relação ao eixo longitudinal dos implantes. Uma análise qualitativa foi feita entre os dois experimentos, confirmando a mesma tendência de deslocamentos entre os modelos físicos e virtuais para os dois implantes analisados. Análises de deslocamentos e distribuição de tensões foram obtidas para os implantes GM e HE. Comparativamente, houve maior deslocamento na plataforma do modelo HE, obtendo valores de 1,339E-1 (0,1399 mm), em comparação com o modelo GM, onde para as mesmas condições obteve-se um deslocamento de 2,080E-2 (0,0208 mm). O modelo HE apresentou uma tensão de von Mises menos distribuída e de maior intensidade de 148,4 MPa, enquanto o modelo GM apresentou tensão de von Mises de 99,03 MPa, juntamente com maior dissipação de tensões. Os valores de Tensão Principal Máxima foram maiores para o modelo GM do que para o HE. Os implantes GM modificados também foram comparados em relação aos deslocamentos totais e as tensões de von Mises. Quanto ao deslocamento, o implante C, apresentou maior tendência a deslocar que os demais, 14,36% maior. Os implantes com os cortes, tiveram deslocamentos parecidos, sendo o menor valor evidenciado no implante T. Em relação a tensão de von Mises, o implante T apresentou o maior valor entre os implantes, já no implante C, foi possível notar diferença no padrão de comportamento mecânico em relação aos implantes com os cortes. Os resultados deste estudo mostraram que foi possível encontrar padrões semelhantes no comportamento mecânico dos implantes analisados entre o MEF e a DIC. Porém, um maior controle de ambas as técnicas deve ser tomado para que possa haver uma validação entre os métodos. Pode-se concluir que as diferentes geometrias influenciaram o comportamento mecânico dos implantes analisados.

Palavras-chave: Implantes dentários. Análise de elementos finitos. Fenômenos biomecânicos.

Casalle N. Evaluation of mechanical behavior and force distribution in hybrid and short dental implants comparing different designs: analysis by mechanical teste and finite elements [tese de doutorado]. Araraquara: Faculdade de Odontologia da UNESP; 2023.

ABSTRACT

The aim of the present study was to analyze the mechanical behavior and force distribution of hybrid dental implants with different geometries installed in the posterior maxilla using the finite element method (FEM). Virtual and physical models were initially generated using Rhinoceros 7® CAD software from McNeel, based on the bone structure of a posterior maxilla segment developed through the BioCAD protocol. A first-order tetragonal 3D mesh was created for the FEM. Implants with two different prosthetic connections, external hexagon (HE) and grand Morse (GM), were simulated in the computational analysis and subjected to oblique loads of 100N with an inclination of 30° relative to the long axis of the implant. The displacement and stress fields were compared between the implants. Digital image correlation (DIC) experiments were performed on the physical models to validate the computational analysis. For DIC, test specimens were 3D printed in polyamide using selective laser sintering (SLS) technology with the HIQ (Sinterstation) printer, where the implants were installed and subsequently loaded with an oblique force of 24N. In another finite element analysis, modified GM implants in the apical region, named according to the cuts made at the apex: C - control (no apical cut); B - bi-parted; T - tri-parted; Q - quadri-parted, were subjected to a rotational movement relative to the longitudinal axis of the implants. A qualitative analysis was conducted between the two experiments, confirming the same trend of displacements between the physical and virtual models for the two implants analyzed. Displacement and stress distribution analyses were obtained for GM and HE implants. Comparatively, there was greater displacement in the platform of the HE model, with values of 1.339E-1 (0.1399 mm), compared to the GM model, where under the same conditions, a displacement of 2.080E-2 (0.0208 mm) was obtained. The HE model exhibited less distributed and higher intensity von Mises stress of 148.4 MPa, while the GM model showed von Mises stress of 99.03 MPa, along with greater stress dissipation. The maximum principal stress values were higher for the GM model than for the HE model. The modified GM implants were also compared in terms of total displacement and von Mises stress. Regarding displacement, implant C showed a greater tendency to displace than the others, 14.36% higher. The implants with cuts had similar displacements, with the lowest value observed in the T implant. In terms of von Mises stress, implant T exhibited the highest value among the implants, whereas implant C exhibited a different pattern of mechanical behavior compared to the implants with cuts. The results of this study showed that it was possible to find similar patterns in the mechanical behavior of the analyzed implants between FEM and DIC. However, greater control of both techniques should be taken to enable validation between the methods. It can be concluded that the different geometries influenced the mechanical behavior of the analyzed implants.

Keywords: Dental implants. Finite element analysis. Biomechanical phenomena.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 PROPOSIÇÃO	18
3 PUBLICAÇÃO (ÇÕES).....	19
3.1 Publicação 1	19
3.2 Publicação 2	39
3.3 Publicação 3	60
4 CONCLUSÃO	73
REFERÊNCIAS	74
APÊNDICES	80

1 INTRODUÇÃO

A falta de um ou mais elementos dentários têm incomodado a humanidade há séculos. Perda da eficiência mastigatória, estética comprometida, diminuição do bem-estar e até mesmo dificuldades com a fala e a pronúncia, são apenas alguns dos problemas relacionados com a ausência dos dentes¹. Desde os tempos antigos, inúmeras tentativas foram feitas para substituir um dente ausente por algo que pudesse devolver a função do elemento perdido. Materiais como marfim, ossos, metais e pedras preciosas, foram inicialmente usados para replicar a anatomia e repor os dentes naturais¹.

A história da atual implantodontia começa no início do século XIX. Em 1891, Znamenski e Hillscher utilizaram implantes feitos de porcelana e preenchidos por guta percha^{2,3}. Em 1902, Payne⁴ também usou guta percha para preencher implantes feitos de cápsulas de estanho banhadas a ouro e em 1913, Greenfield⁵ inseriu implantes oclos compostos por irídio e platina. Implantes fabricados com liga de cobalto-cromo e molibdênio começaram a ser utilizados em 1940^{6,7}. Também durante este período, implantes em espiral⁸ e subperiosteais⁹ foram desenvolvidos¹.

O período de 1950-1970 foi caracterizado por uma explosão de novos desenvolvimentos, especialmente modificações nos designs dos implantes^{8,10}. Após 1970, maior interesse foi dedicado a desvendar os fatores determinantes para o sucesso clínico ou falha dos implantes dentários¹. Como consequência dessas descobertas, Brånemark¹¹ introduziu, no final dos anos 70, implantes em forma de parafusos, fabricados em titânio puro (99,7%)^{11,12}. O que propiciou o uso de titânio em implantes, foi sua alta resistência à corrosão devido à formação de uma camada inerte de óxido de titânio (TiO₂) cobrindo a superfície do metal. Branemark observou que essa camada de TiO₂ poderia ocasionar um contato direto entre osso e implante, desde que uma técnica cirúrgica cuidadosa fosse aplicada, o que ele constatou ser obtido pela combinação do design do parafuso e um restrito protocolo de instalação do implante no osso alveolar¹.

Com base em seus estudos, Branemark introduziu pela primeira vez, o termo osseointegração para descrever as evidências histológicas que sugerem um bom resultado no tratamento com implantes dentários¹³. Sendo assim, com o passar dos anos a osseointegração passou a ser definida como a união estável e funcional entre

o osso e a superfície de titânio¹⁴. Um período de cicatrização de alguns meses geralmente é necessário para que o contato entre o osso e o implante se consolide^{14,15}. A osseointegração, por sua vez, é preservada por um processo contínuo denominado de remodelação óssea, que é responsável pela manutenção adequada de osso ao longo da vida, através do equilíbrio entre a reabsorção do tecido ósseo maduro e substituição por osso recentemente formado¹⁵.

Logo que o implante dentário é instalado no osso alveolar, sua fixação irá se dar inicialmente, pela chamada estabilidade primária, que é a combinação da quantidade e qualidade do osso receptor, do design do implante e da técnica cirúrgica utilizada¹⁶. A estabilidade primária é crucial para o sucesso dos implantes e é considerada um fator determinante para a osseointegração^{16,17}. Sendo assim, os fatores que influenciam a estabilidade primária e conseqüentemente a osseointegração, estão relacionados com a superfície dos implantes¹⁸, técnica cirúrgica¹⁹, design do implante^{20,21} e qualidade e quantidade óssea^{22,23}.

Com base nas primeiras tentativas e no avanço de Branemark, testemunhamos nos últimos 50 anos, avanços significativos no desenvolvimento da implantodontia. Os implantes dentários são hoje uma parte indispensável da odontologia clínica. Embora a taxa de sucesso dos implantes dentários tenha sido relatada como superior a 90%²¹, isso também representa um desafio para o futuro. Essa preocupação está relacionada ao envelhecimento da população. Pessoas idosas estão mais expostas a fatores que comprometem sua saúde física, além disso, o aumento da perda de dentes é algo comum com o envelhecimento. Diabetes, osteoporose, obesidade e uso de medicamentos, são algumas condições médicas que podem prejudicar a regeneração óssea ao redor dos implantes dentários²⁴. Conseqüentemente, isso pode promover a falha do implante e colocar em risco as atuais taxas de sucesso.

Além disso, fatores relacionados a qualidade e quantidade óssea também podem ser comprometidos em pessoas idosas, uma vez que a ausência do elemento dentário acelera o processo de reabsorção óssea, o que pode se agravar ainda mais, se algum fator sistêmico estiver associado. Regiões anatômicas com limitações ósseas, como no caso da região de seio maxilar²⁵ e nervo alveolar, impedem a instalação de implantes mais longos e com maior diâmetro, fatores geométricos que, como mencionados anteriormente, influenciam diretamente na estabilidade primária dos implantes.

O sucesso do tratamento com implantes dentários depende de uma série de fatores biológicos e mecânicos. Mesmo quando os implantes estão totalmente osseointegrados, há um risco de reabsorção óssea nas regiões peri-implantares, que pode ser causada por infecção bacteriana ou sobrecarga devido a forças mastigatórias²⁶. A sobrecarga muitas vezes é resultado de acúmulo de tensões geradas por má oclusão, design ou posicionamento de implantes inadequados²⁷. É comprovado que uma maior área de contato entre osso e implante aumenta a estabilidade primária, favorece a osseointegração e uma distribuição de tensões mais equilibrada. Em busca desse objetivo, é que por muitos anos o uso de implantes mais longos e com diâmetros maiores foram associados a tratamentos bem-sucedidos^{16,26}.

O entendimento da biomecânica na interface osso-implante e suas consequências são fundamentais para o sucesso clínico²⁸. A literatura indica que alterações na macrogeometria dos implantes como o design, comprimento, diâmetro, características geométricas, assim como propriedades do osso de suporte e tipos de carga aplicada, são importantes no mecanismo de transferência e distribuição de tensões ao osso e ao implante²⁹⁻³².

Os primeiros implantes a serem fabricados, possuíam corpo e ápice cilíndricos, porém estudos como o de Valente et al.³³ (2015) e de Gehrke et al.^{34,35} (2015, 2016) mostraram que este design pode não ser a melhor opção em todas as situações clínicas. Assim, outros formatos de implantes foram introduzidos para alcançar uma melhor estabilidade em diferentes condições ósseas. Os implantes cônicos têm sido muito utilizados para inserção imediata em alvéolo pós-extração, pois se adaptam melhor nas paredes do sítio cirúrgico, minimizando a necessidade de procedimentos de enxerto ósseo. Além disso, alguns estudos sugerem que os implantes cônicos possam melhorar a estética, permitir sua inserção entre dois dentes adjacentes e evitar risco de perfuração devido às concavidades anatômicas³⁶⁻³⁸. Recentemente, é possível encontrar no mercado implantes denominados de híbridos, pois possuem sua macroestrutura mista, porção cilíndrica no corpo e cônica no ápice. Os implantes híbridos são indicados para as regiões em que a densidade óssea é baixa, possuem as vantagens dos implantes cilíndricos e cônicos, características que favorecem seu travamento. Entretanto, a estabilidade primária desses implantes ainda não foi completamente esclarecida, necessitando de mais estudos³⁹.

Outra condição macroscópica que também influencia o comportamento biomecânico do implante é a geometria da conexão protética presente na plataforma do implante. O hexágono externo (HE) foi o primeiro tipo de sistema de conexão adotado na implantodontia moderna por Branemark, baseado na existência de um hexágono na região de plataforma do implante (0,7 mm de altura); no entanto, essa conexão foi extensivamente modificada em termos de diâmetro, altura e torque de inserção⁴⁰. O HE facilita a inserção da prótese, proporciona um mecanismo antirrotacional, e permite que a prótese seja removida e reinstalada. No entanto, o HE não impede a formação de microgap entre a plataforma do implante e o componente protético/coroa dentária, levando a complicações quando submetido a alta carga oclusal, pois permite micromovimentos do pilar, causando instabilidade na fixação da prótese, o que pode resultar em afrouxamento do parafuso do pilar ou mesmo fraturas por fadiga⁴⁰⁻⁴⁵. As limitações do HE ficaram ainda mais evidentes quando usados para reabilitação de arcos parcialmente edêntulos ou quando submetidos às forças oblíquas, apresentando baixa resistência, sendo nesses casos, o uso de conexões internas antirrotacionais mais adequado^{41,43-46}.

Devido aos problemas com perda óssea em implantes, se iniciarem pela plataforma, maior importância tem sido dada ao tipo de conexão protética dos implantes⁴¹⁻⁴³. Estudos recentes, têm envolvido novos aspectos estruturais dos implantes dentários e sistemas de conexão protética. Dentre as conexões internas encontradas no mercado atualmente, destaca-se a do tipo cone Morse (CM)^{46,47}. A conexão CM diminui ou praticamente elimina as complicações mecânicas do HE. Melhora a forma como as tensões são transferidas para o osso adjacente, pois aumentam a absorção de carga sob uma força lateral. Isso melhora a biomecânica e reduz as complicações biológicas, como afrouxamento do parafuso, fratura e perda óssea marginal. Quanto maior a profundidade da conexão dentro do corpo do implante, uma dissipação mais homogênea das cargas oclusais irá ocorrer, pois as tensões serão distribuídas na parede do implante e, conseqüentemente, no osso que envolve todo o implante e não apenas na região de plataforma⁴⁰.

Uma característica de design exclusiva da conexão CM é a união entre duas estruturas cônicas. Essa conexão foi desenvolvida por Stephen A. Morse, em 1864, e desde então tem sido usada globalmente⁴⁸. Na implantodontia, um pilar cônico “macho” é apertado em um encaixe cônico “feminino” dentro do implante. Este design

cônico cria, internamente, uma fricção significativa através da alta propensão de paralelismo entre as duas estruturas⁴⁹. Os implantes CM têm mostrado altas taxas de sucesso com boa preservação óssea em restaurações implantossuportadas. Esse desempenho clínico pode ser explicado pela menor incidência de microgap e contaminação bacteriana. Além disso, em comparação com outras conexões, a conexão CM permite estabilidade superior da crista óssea sob cargas axiais e laterais^{41,42}. Outra vantagem associada a conexão cone Morse, é o conceito de plataforma *switching*. Este conceito refere-se ao uso de um pilar de diâmetro menor colocado em uma plataforma de implante de diâmetro maior, fazendo com que a junção implante-pilar se direcione para a porção mais central, distanciando da crista óssea alveolar e diminuindo o índice de perda óssea ao redor dos implantes⁴³.

Os implantes com conexão CM possuem paredes internas com um ângulo convergente que varia de 8° a 11°^{40,46}. Estes implantes devem ser colocados 1 a 2 mm abaixo da crista óssea, de acordo com as instruções do fabricante, para otimizar a manutenção dos tecidos moles peri-implantares ao redor do terço cervical do implante⁴⁰. Neste contexto, foram lançados recentemente ao mercado, implantes com um novo tipo de plataforma protética, denominada de grand Morse (GM). Do mesmo modo que os implantes CM, a linha GM também aplica o conceito de plataforma *switching*⁵⁰. Seguindo as mesmas características e objetivos do CM, é que a conexão do tipo GM foi desenvolvida. A conexão GM possui ângulo interno de 16°. As paredes internas mais espessas contribuem para uma maior resistência mecânica e melhores resultados, porém ainda não há estudos que tenham testado mecanicamente a eficácia desse novo modelo de plataforma e sua similaridade com a conexão do tipo CM⁴⁸.

Atualmente, estão disponíveis no mercado, implantes de diversos comprimentos. A instalação de implantes em regiões de grandes atrofia ósseas, como áreas posteriores de maxila e mandíbula, pode envolver técnicas cirúrgicas avançadas, como enxertos ósseos e levantamento de seio maxilar^{22,25}. Esses procedimentos demandam de grande habilidade do cirurgião-dentista, como também aumentam o custo e o tempo de tratamento³¹.

Para tanto, os implantes curtos (≤ 8 mm) têm sido uma alternativa cirúrgica para as regiões onde há limitação óssea, evitando procedimentos mais invasivos. Os primeiros estudos realizados mostraram que esses implantes podem trazer

complicações biomecânicas, quando comparados com os implantes de maior tamanho. Entretanto, estudos mais recentes com implantes curtos, vêm mostrando que esses implantes podem ser previsivelmente usados para suportar próteses, nas regiões onde há limitações ósseas, como área posterior de maxila e mandíbula^{31,32,51-53}.

Atualmente encontramos no mercado, implantes com diversos tratamentos de superfície que são capazes de acelerar o período de cicatrização e favorecer a osseointegração, diminuindo o tempo final de tratamento, uma vez que permitem a reabilitação com coroas sobre implantes de forma mais rápida e muitas vezes imediata. Por esse motivo, fatores macrogeométricos como o tamanho e o diâmetro dos implantes, saíram do foco dos estudos mais recentes e maior atenção vem sendo dada a outros fatores relacionados com a composição dos implantes, superfície e presença de infiltração bacteriana⁵⁴⁻⁵⁸.

Entretanto, saber como esse sistema irá se comportar biomecanicamente após o período de osseointegração, continua sendo de extrema importância para a longevidade do tratamento e irá depender exclusivamente da manutenção do osso ao redor do implante como um todo. Pensando nisso, estudar a região apical dos implantes, pode ser vantajoso, uma vez que temos na literatura alguns estudos que comprovam a influência da geometria do ápice no comportamento mecânico e também no imbricamento tardio, quando usados implantes com modificações apicais que permitem a deposição de células ósseas entre os entalhes criados no ápice, aumentando o travamento do implante no osso adjacente^{34,59-63}. Diferentes designs de ápice de implantes foram testados por alguns autores *in vivo* e *in vitro*^{59-61,64}. Sciasci et al.⁶⁴ (2018) avaliaram o comportamento mecânico *in vitro* de cortes realizados na região ápice de implantes longos e cilíndricos. Foram realizados cortes retos, bi-partidos, tri-partidos e quadri-partidos. Os autores concluíram que essas mudanças influenciaram o torque de inserção e a estabilidade primária dos implantes, sendo necessários mais estudos.

Para avaliar o comportamento biomecânico de uma reabilitação com implantes dentários, técnicas como a fotoelasticidade⁶⁴, interferometria holográfica⁶⁵, correlação digital de imagem (DIC)⁶⁶ e análise por elementos finitos⁴⁷, podem ser empregadas. A análise numérica de elementos finitos tem sido mundialmente utilizada para analisar o comportamento mecânico de reabilitações sobre implantes, por ser uma ferramenta precisa e confiável para simular o comportamento de sistemas complexos⁶⁷⁻⁷⁰. O

método é realizado para obter dados específicos sobre a magnitude e distribuição de tensões e deformações que são transmitidas ao osso adjacente através dos implantes e materiais reabilitadores^{71,72}. Diversos estudos utilizaram o MEF como ferramenta para compreender e prever como cada força atua sobre os implantes e são distribuídas para o tecido ósseo^{22,23,25,27,28,30-32,48,62-67}.

Sendo assim, novos designs de implantes têm sido desenvolvidos com a intenção de aumentar a área de contato entre o implante e o osso, favorecendo e acelerando o processo de osseointegração, bem como melhorar a dissipação de tensões e preservar o osso peri-implantar. Dentre os novos designs, destacam-se os implantes híbridos e curtos, relativamente novos no mercado e promissores por serem versáteis a diversas situações clínicas, evitando maiores procedimentos cirúrgicos. Por outro lado, faltam evidências que esclareçam de fato o comportamento mecânico desses implantes isoladamente, sem a influência dos diversos tratamentos de superfícies, que também apresentam papel na osseointegração. Também faltam evidências que tenham testado esses implantes com diferentes conexões protéticas e avaliado qual seria mais favorável do ponto de vista mecânico. Além do mais, não existe consenso na literatura sobre qual seria o melhor formato de implante a ser utilizado, assim como há poucas pesquisas sobre a influência do formato do ápice dos implantes no seu comportamento mecânico.

Com base no exposto, este trabalho se faz relevante, pois se propõe avaliar laboratorialmente o comportamento mecânico de implantes híbridos e curtos, de duas conexões protéticas diferentes, hexágono externo, utilizada em larga escala, comparando com a conexão protética do tipo grand Morse, inserida no mercado recentemente. Alterações geométricas na região de ápice dos implantes também foram realizadas, três tipos diferentes de desenhos de ápices (bi-partido; tri-partido; quadri-partido) foram testados e a influência do ápice no comportamento mecânico dos implantes foi analisada. E por fim, com o objetivo de validar a simulação da análise de elementos finitos, foi realizado o experimento de correlação digital de imagem.

4 CONCLUSÃO

Levando em consideração as metodologias utilizadas (Apêndice A), é possível concluir que:

Este estudo comparou os resultados de deslocamentos encontrados na análise de elementos finitos, com os resultados obtidos pela análise de correlação digital de imagem, usando implantes com duas conexões protéticas diferentes: hexágono externo e grand Morse. Dentro das limitações desse estudo, os resultados mostraram que foi possível encontrar padrões semelhantes no comportamento mecânico dos implantes analisados entre o MEF e a DIC.

Análise de elementos finitos realizada neste estudo, possibilitou avaliar detalhadamente a magnitude das tensões e deslocamentos ao redor do osso peri-implantar para dois diferentes sistemas de implantes, hexágono externo e grand Morse. Pode-se concluir que o design da conexão protética do implante tem influência direta na distribuição e intensidade de tensões e deslocamentos no sistema prótese-implante e que os implantes GM revelaram um melhor comportamento biomecânico quando comparados aos implantes HE, seguindo o mesmo padrão dos implantes CM.

Por fim, este trabalho também analisou a funcionabilidade de alterações apicais em implantes dentários instalados em região de maxila posterior. Dentro das limitações da análise, foi possível concluir que as modificações apicais influenciaram no comportamento mecânico dos implantes, e que cortes na região apical aumentaram o imbricamento mecânico no ápice quando submetidos a movimentos de rotação, comparados com o implante controle.

Mais investigações científicas devem ser realizadas com a finalidade de esclarecer algumas questões que não puderam ser respondidas por esse estudo (Apêndice B).

REFERÊNCIAS*

- 1- Alghamdi HS, Jansen JA. The development and future of dental implants. *Dent Mater J.* 2020; 39(2):167–72.
- 2- Znamenski NN. Implantation künstlicher Zähne. *Dtsch Monatsh Zhk.* 1891; 9: 87-107.
- 3- Hillischer HTh. Implantation künstlicher Zähne nach dr.Znamensky. *Dtsch Monatsh für Zahnheilk.* 1891; 9: 158-63.
- 4- Payne RE. Implantation of tin capsule by spreading. *Items of Interest.* 1902; 14: 125-226.
- 5- Greenfield EJ. Implantation of artificial crown and bridge abutments. *Dental Cosmos.* 1913; 55: 364-69.
- 6- Strock AE. Experimental work on a method for the replacement of missing teeth by direct implantation of a metal support into the alveolus. *Amer J Ortod Oral Surg.* 1939; 25: 467-72.
- 7- Strock AE, Strock MS. Method of reinforcing pulpless anterior teeth. *J Oral Implantol.* 1987; 13(3): 527-30.
- 8- Linkow LI, Chérchève R. Theories and techniques of oral implantology. St.Louis: CV Mosby Comp; 1970. v.1.
- 9- Goldberg NI, Gerschhoff A. The implant lower denture. *Dental Digest.* 1949; 55(11): 490-4.
- 10- Sandhaus S. Biometallurgische und Zytotoxikologische Untersuchungen bei Implantaten. *In: Münch J, editor. Möglichkeiten und Methoden der Implantologie.* München: Werk-Verlag Dr.Edmund Nanaschewski. 1976. p. 45-56.
- 11- Brånemark PI, Hansson BO, Adell R, Breine U, Lindström J, Hallèn O et al. Osseointegrated implants in the treatment of the edentulous jaw: experience from a 10-year period. *Scan J Plastic Reconstr Surg.* 1977; Suppl 16: 1-132.
- 12- Brånemark PI, Adell R, Albrektsson T, Lekholm U, Lindqvist S, Rockler B. Osseointegrated titanium fixtures in the treatment of edentulousness. *Biomaterials.* 1983; 4(1): 25-8.
- 13- Brånemark R, Brånemark P, Rydevik B, Myers RR. Osseointegration in skeletal reconstruction and rehabilitation: a review. *J Rehabil Res Dev.* 2001; 38(2): 175-82.
- 14- Gupta Y, Rohit Iyer R, Dommeti VK, Nutu E, Rana M, Merdji A et al. Design of dental implant using design of experiment and topology optimization: a finite element analysis study. *Proc IMechE Part H: J Engineering in Medicine.* 2021; 235(2):157-166.
- 15- Jafari B, Katoozian HR, Tahani M, Ashjaee N. A comparative study of bone remodeling around hydroxyapatite-coated and novel radial functionally graded dental implants using finite element simulation. *Med Eng Phys.* 2022; 102: 103775.

* De acordo com o Guia de Trabalhos Acadêmicos da FOAr, adaptado das Normas Vancouver. Disponível no site da Biblioteca: <http://www.foar.unesp.br/Home/Biblioteca/guia-de-normalizacao-atualizado.pdf>

- 16- Anitua E, Ibarra NLS, Martín IM, Rotaecche LS. Influence of dental implant diameter and bone quality on the biomechanics of single-crown restoration: a finite element analysis. *Dent J.* 2021; 9(9): 103.
- 17- Khorshidparast S, Akhlaghi P, Rouhi G, Barikani H. Measurement of bone damage caused by quasi-static compressive loading-unloading to explore dental implants stability: simultaneous use of in-vitro tests, μ -CT images, and digital volume correlation. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2023; 138: 105566.
- 18- Rigotti RLO, Tardelli JDC, Reis AC. Influence of antibacterial surface treatment on dental implants on cell viability: a systematic review. *Heliyon.* 2023; 9(3): e13693.
- 19- Yang B, Irastorza-Landa A, Heuberger P, Ploeg HL. Effect of insertion factors on dental implant insertion torque/energyexperimental results. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2020; 112: 103995.
- 20- Zapata JM, Leal E, Hunter R, Souza RF, Borie E. Biomechanical behavior of narrow dental implants made with aluminum- and vanadium-free alloys: a finite element analysis. *Materials.* 2022; 15(24): 8903.
- 21- Alemayehu DB and Jeng YR. Three-dimensional finite element investigation into effects of implant thread design and loading rate on stress distribution in dental implants and anisotropic bone. *Materials.* 2021; 14(22): 6974.
- 22- Ellendula Y, Sekar AC, Nalla S, Basany RB, Sailasri K, Thandu A. Biomechanical evaluation of stress distribution in equicrestal and sub-crestally placed, platform-switched morse taper dental implants in d3 bone: finite element analysis. *Cureus.* 2022; 14(4): e24591.
- 23- Prados-Privado M, Martínez-Martínez C, Gehrke AS, Prados-Frutos JC. Influence of bone definition and finite element parameters in bone and dental implants stress: a literature review. *Biology.* 2020; 9(8): 224.
- 24- Chakraborty A, Datta P, Majumder S, Mondal SC, Roychowdhury A. Finite element and experimental analysis to select patient's bone condition specific porous dental implant, fabricated using additive manufacturing. *Comput Biol Med.* 2020; 124: 103839.
- 25- Mohamed AMA, Askar MG, Homossany MEMBE. Stresses induced by one piece and two piece dental implants in All-on-4® implant supported prosthesis under simulated lateral occlusal loading: non linear finite element analysis study. *BMC Oral Health.* 2022; 22(1): 196.
- 26- Valera-Jiménez JF, Burgueno-Barris G, Gómez-González S, López-López J, Valmaseda-Castellón E, Fernández-Aguado E. Finite element analysis of narrow dental implants. *Dent Mater.* 2020; 36(7): 927–35.
- 27- Wu YL, Tsai MH, Chen HS, Lin CP, Wu AYJ. Effect of marginal bone integrity and aftermarket abutment screws on dental implant systems: a preliminary study with finite element method. *Materials.* 2022; 15(17): 5952.
- 28- Lee JH, Jang HY, Lee SY. Finite element analysis of dental implants with zirconia crown restorations: conventional cement-retained vs. cementless screw-retained. *Materials.* 2021; 14(10): 2666.
- 29- El-Anwar MI, El-Zawahry MM, Ibraheem EM, Nassani MZ, ElGabry H. New dental implant selection criterion based on implant design. *Eur J Dent.* 2017; 11(2): 186-91.

- 30- Zhang J, Zhang X, Chen Y, Feng W, Chen X. Novel design and finite element analysis of diamond-like porous implants with low stiffness. *Materials*. 2021; 14(22): 6918.
- 31- Bordin D, Witek L, Fardin VP, Bonfante EA, Coelho PG. Fatigue failure of narrow implants with different implant-abutment. *J Prosthodont*. 2018; 27(7): 659-64.
- 32- Kul E and Korkmaz IH. Effect of different design of abutment and implant on stress distribution in 2 implants and peripheral bone: a finite element analysis study. *J Prosthet Dent*. 2021; 126(5): 664.e1-664.e9.
- 33- Valente ML, de Castro DT, Shimano AC, Lepri CP, dos Reis AC. Analysis of the influence of implant shape on primary stability using the correlation of multiple methods. *Clin Oral Investig*. 2015; 19(8): 1861-6.
- 34- Gehrke AS, Marin GW. Biomechanical evaluation of dental implants with three different designs: removal torque and resonance frequency analysis in rabbits. *Ann Anat*. 2015; 199: 30-5.
- 35- Gehrke SA, Frugis VL, Shibli JA, Fernandez MP, Sánchez de Val JE, Girardo JL et al. Influence of implant design (cylindrical and conical) in the load transfer surrounding long (13mm) and short (7mm) length implants: a photoelastic analysis. *Open Dent J*. 2016; 10: 522-30.
- 36- Colombo DBJ, Verardi S, Rebaudi A, Rebaudi F, Makary C. Clinical osseointegration of bone level implants with conical shape and textured surface with low primary stability. *Minerva Stomatol*. 2020; 69(1): 8-13.
- 37- Dos Santos MBF, Meloto GO, Bacchi A, Correr-Sobrinho L. Stress distribution in cylindrical and conical implants under rotational micromovement with different boundary conditions and bone properties: 3-D FEA. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*. 2017; 20(8): 893-900.
- 38- Torabzadeh M, Amid R, Farhad SZ. Maximum insertion torque, stress and strain in bone during insertion of three dental implants with different macroscopic designs: a dynamic finite-element analysis. *J Long Term Eff Med Implants*. 2021; 31(2): 81-9.
- 39- Di Stefano DA, Arosio P, Perrotti V, Iezzi G, Scarano A, Piattelli A. Correlation between implant geometry, bone density, and the insertion torque/depth integral: a study on bovine ribs. *Dent J (Basel)*. 2019; 7(1): 25.
- 40- Liang R, Guo W, Qiao X, Wen H, Yu M, Tang W et al. Biomechanical analysis and comparison of 12 dental implant systems using 3D finite element study. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*. 2015; 18(12): 1340-8.
- 41- Macedo JP, Pereira J, Faria J, Pereira CA, Alves JL, Henriques B et al. Finite element analysis of stress extent at peri-implant bone surrounding external hexagon or Morse taper implants. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2017; 71: 441-7.
- 42- Almeida EO, Pellizzer EP. Biomecânica em prótese sobre implante relacionadas às inclinações das cúspides e às angulações dos implantes osseointegrados-revisão de literatura. *Revis Odont Unesp*. 2008; 37(4): 321-7.

- 43- Zhang WT, Cheng KJ, Liu YF, Wang R, Chen YF, Ding YD et al. Effect of the prosthetic index on stress distribution in Morse taper connection implant system and peri-implant bone: a 3D finite element analysis. *BMC Oral Health*. 2022; 22(1): 431.
- 44- Bittencourt ABBC, Neto CLMM, Penitente PA, Pellizzer EP, Santos DM, Goiato MC. Comparison of the morse cone connection with the internal hexagon and external hexagon connections based on microleakage: review. *Prague Medical Report*. 2021; 122(3): 181–90.
- 45- Vinhas AS, Aroso C, Salazar F, López-Jarana P, Ríos-Santos JV, Herrero-Climent M. Review of the mechanical behavior of different implant: abutment connections *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2020; 17(22): 8685.
- 46- Lemos CAA, Verri FR, Santiago Jr JF, Almeida DAF, Batista VES, Noritomi PY et al. Retention system and splinting on Morse taper implants in the posterior maxilla by 3D finite element analysis. *Braz Dent J*. 2018; 29(1): 30-5.
- 47- Mendoza EM, Cuenca RC, Suyo AD. Stress analysis and factor of safety in three dental implant systems by finite element analysis. *Saudi Dent J*. 2022; 34(7): 579–84.
- 48- Moreira GM, Peres GM, Reis TA. Different dental implant systems: a descriptive literature review. *Res Soc Dev*. 2022; 11(8): e16311830603.
- 49- Buser D, Sennerby L, Bruyn H. Modern implant dentistry based on osseointegration: 50 years of progress, current trends and open questions. *Periodontol 2000*. 2017; 73(1): 7–21.
- 50- Catálogos de produtos Neodent 2023. Curitiba: Neodent, 2023 [acesso 10 março 2023]. Disponível em: https://www.straumann.com/content/dam/media-center/neodent/pt-br/documents/catalog/product-catalog/102_neodent_institutional_catalogue_pt_br_lr.pdf.
- 51- Wu H, Shi Q, Huang Y, Chang P, Huo N, Jiang Y et al. Failure risk of short dental implants under immediate loading: A meta-analysis. *J Prosthodont*. 2021; 30(7): 569-80.
- 52- Peixoto RF, Tonin BSH, Martinelli J, Macedo AP, Mattos MGC. In vitro digital image correlation analysis of the strain transferred by screw-retained fixed partial dentures supported by short and conventional implants. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2020; 103: 103556.
- 53- Silva GAF, Faot F, da Rosa Possebon AP, da Silva WJ, Del Bel Cury AA. Effect of macrogeometry and bone type on insertion torque, primary stability, surface topography damage and titanium release of dental implants during surgical insertion into artificial bone. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2021; 119: 104515.
- 54- Barão VAR, Costa RC, Shibli JÁ, Bertolini M, Souza JGS. Emerging titanium surface modifications: The war against polymicrobial infections on dental implants. *Braz Dent J*. 2022; 33(1): 1-12.
- 55- Cunha W, Carvalho O, Henriques B, Silva FS, Özcan M, Souza JCM. Surface modification of zirconia dental implants by laser texturing. *Lasers Med Sci*. 2022; 37(1): 77-93.

- 56- Schwarz F, Alcoforado G, Guerrero A, Jönsson D, Klinge B, Lang N et al. Peri-implantitis: summary and consensus statements of group 3. The 6th EAO Consensus Conference 2021. *Clin Oral Implants Res.* 2021; 21: 245-53.
- 57- Avila ED, Oirschot BAV, Beucken JJJVD. Biomaterial-based possibilities for managing peri-implantitis. *J Periodontal Res.* 2020; 55 (2):165-73.
- 58- Dhaliwal JD, Rahman NAA, Ming LC, Dhaliwal SKS, Knights J, Junior RFA. Microbial biofilm decontamination on dental implant surfaces: a mini review. *Front Cell Infect Microbiol.* 2021; 11: 736186.
- 59- Lundgren D, Slotte C, Gröndahl K. A novel type of dental tube implant for areas with limited bone height: clinical and radiographic data from three patients with 5-year follow-up. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2013; 15(4): 509-16.
- 60- Sivan-Gildor A, Machtei EE, Gabay E, Frankenthal S, Levin L, Suzuki M et al. Novel implant design improves implant survival in multi rooted extraction sites: a preclinical pilot study. *J Periodontol.* 2014; 85(10): 1458-63.
- 61- Meirelles L, Brånemark PI, Albrektsson T, Feng C, Johansson C. Histological evaluation of bone formation adjacent to dental implants with a novel apical chamber design: preliminary data in the rabbit model. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2015; 17(13): 453-60.
- 62- Ivanoff CJ, Lindhe J, Ellner S, Johansson KJ, Abrahamsson P. An open, randomised, multi-centre study, comparing straight and tapered apex implants design, in partially and totally edentulous maxillae. *Acta Odontol Scand.* 2021; 79(7): 492-8.
- 63- Degidi M, Perrotti V, Shibli JA, Mortellaro C, Piateelli A, Iezzi G. Evaluation of the peri-implant bone around parallel-walled dental implants with a condensing thread macrodesign and a self-tapping apex: a 10-year retrospective histological analysis. *J Craniofac Surg.* 2014; 25(3): 840-2.
- 64- Sciasci P, Casalle N, Vaz LG. Evaluation of primary stability in modified implants: analysis by resonance frequency and insertion torque. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2018; 20(3): 274-9.
- 65- Brozovic J, Demoli N, Farkas N, Susic M, Alar Z, Panduri DG. Properties of axially loaded implant–abutment assemblies using digital holographic interferometry analysis. *Dent Mater.* 2014; 30(3): e17–27.
- 66- Guessasma S, Nouri H, Belhabib S. Digital image correlation and finite element computation to reveal mechanical anisotropy in 3D printing of polymers. *Materials.* 2022; 15(23): 8382.
- 67- Liu B, Xu W, Chen M, Chen D, Sun G, Zhang C et al. Structural design and finite element simulation analysis of grade 3 graded porous titanium implant. *Int J Mol Sci.* 2022; 23(17): 10090.
- 68- Roy S, Dey S, Khutia N, Chowdhury AR, Datta S. Design of patient specific dental implant using FE analysis and computational intelligence techniques. *Appl Soft Comput.* 2018; 65: 272–9.
- 69- Cervino G, Fiorillo L, Arzukanyan AV, Spagnuolo G, Campagna P, Cicciù M. Application of bioengineering devices for stress evaluation in dentistry: the last 10 years FEM parametric analysis of outcomes and current trends. *Minerva Stomatol.* 2020; 69(1): 55–62.

- 70- Marques BG , Sabater AP, Velasco AB , Lasheras FS, Calvo PL, Adrián MDG et al. A biomechanical analysis of the influence of the morphology of the bone blocks grafts on the transfer of tension or load to the soft tissue by means of the finite element method. *Materials*. 2022; 15(24): 9039.
- 71- Turker N, Alkis HT, Sadowsky SJ, Buyukkaplan US. Effects of occlusal scheme on all-on-four abutments, screws, and prostheses: A three-dimensional finite element study. *J Oral Implantol*. 2021; 47(1):18-24.
- 72- Wu AYJ, Hsu JT, Fuh LJ, Huang HL. Biomechanical effect of implant design on four implants supporting mandibular full-arch fixed dentures: in vitro test and finite element analysis. *J Formos Med Assoc*. 2020; 119(10):1514-23.