

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ENGENHARIA REVERSA APLICADA NO PROJETO DE ESTRUTURAS BIOMECÂNICAS COM ANÁLISE NUMÉRICA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Jovana Santoro Nakagaki, jsnakagaki_93@hotmail.com¹
Otavio Galo Foster, otaviogalof@gmail.com¹
Alexander Paterno, alexander.paterno@hotmail.com¹
Bruno Agostinho Hernandez, bhernandez@uol.com.br¹
Gabriela Garcia Paschoeto, gabapaschoeto@gmail.com¹
Edson Antonio Capello Sousa, capello@feb.unesp.br¹

¹Faculdade de Engenharia de Bauru – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube 14-01, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil.

Resumo: O Método dos Elementos Finitos (MEF) tem se mostrado muito eficaz em simular problemas biomecânicos, além de ser amplamente utilizado na análise de próteses odontológicas no intuito de melhorar este sistema, buscar verificar o sucesso dos implantes atuais no mercado, e analisar os fatores que influenciam na falha do implante. A partir de geometrias tridimensionais, obtidas por meio de técnicas de Engenharia Reversa, este projeto tem como objetivo analisar as tensões de contato em uma prótese odontológica, utilizando o MEF, e comparar os resultados obtidos com os resultados de modelos sem contato. A estrutura real analisada é de um dente com pino intracanal e coroa, na qual três tipos de pinos foram estudados. A metodologia utilizada para avaliação estrutural do modelo em estudo incluiu processos detalhados de aquisição de dados, seleção de regiões de interesse, geração de modelos visuais tridimensionais, remodelagem sólida e, finalmente, cálculo estrutural por MEF. Primeiramente, foi gerado um modelo sem contato, sendo os componentes da estrutura inteiramente “colados” entre si. Posteriormente, foram inseridos elementos de contato na região entre o pino e a raiz do dente. A análise dos resultados consistiu na análise qualitativa dos valores numéricos de tensão de Von Mises e de cisalhamento obtidos, buscando comparar e verificar a funcionalidade de ambos os modelos (colado e com contato). Além de fornecer mais detalhes na análise de tensões da região de interesse (interface pino-raiz-coroa), os elementos de contato evidenciam regiões tensionadas que não podem ser reproduzidas no modelo colado, devido à restrição de movimento entre os componentes do sistema. Com relação aos pinos, observou-se que as máximas tensões ocorreram nas regiões de transição entre a coroa e a raiz, sendo estas as regiões mais críticas do modelo. Por fim, a remodelagem estrutural e o cálculo em elementos finitos podem ser considerados viáveis para análise de projetos biomecânicos já existentes ou para resolver problemas que possam vir a ocorrer nessas estruturas, de forma preditiva e rápida.

Palavras-chave: Biomecânica, Elementos Finitos, Prótese Odontológica

1. INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia e o aumento de pesquisas voltadas aos processos de Engenharia Reversa vêm trazendo novidades para as áreas da saúde, mais precisamente no desenvolvimento de próteses (Chen et al., 2014; Zhou et al., 2016).

Para o desenvolvimento de novos implantes é necessário estudar os implantes já existentes ou mesmo analisar o comportamento das estruturas que o receberão. Sendo assim, a aquisição de informações geométricas são importantes nesse processo, assim como métodos numéricos que forneçam resultados com boas aproximações em relação às condições reais de atuação da estrutura estudada.

Na área de cálculo estrutural, deve-se garantir que a estrutura objeto de análise não estará sujeita a falhas sob as diversas condições de operação (Alves Filho, 2013).

Os Métodos Analíticos Clássicos permitem o cálculo da resposta exata dos deslocamentos, deformações e tensões de uma estrutura em todos os seus infinitos pontos, porém essas soluções são somente conhecidas para sistemas de geometria simples, com condições de carregamento e apoio muito bem comportados. Assim, para estruturas de forma

arbitrária e complexa, como é comum na biomecânica, torna-se interessante a existência de procedimentos aproximados que possam ser aplicados em caráter geral, independente da forma da estrutura e da condição de carregamento, dentro de uma precisão aceitável (Alves Filho, 2013).

Neste contexto, surge o Método dos Elementos Finitos (MEF), método numérico de análise das tensões e deformações a partir do deslocamento nodal, que pode ser aplicado em estruturas de qualquer geometria, permitindo prever os esforços internos, distribuição de tensão, e avaliar a resistência da estrutura.

O MEF tem se mostrado muito eficaz em simular problemas biomecânicos e tem sido amplamente utilizado na análise de próteses odontológicas no intuito de melhorar este sistema (desenvolvendo um novo projeto para o implante/prótese ou sugerindo outros materiais de construção), buscar verificar o sucesso dos implantes atuais no mercado, e analisar os fatores que influenciam na falha do implante (Chang et al., 2013; Lakshmi et al., 2015; Ha et al., 2016; Güngör and Yilmaz, 2016).

Outra questão analisada neste estudo é o problema de contato. Os problemas de contato são complexos e não-lineares, devido aos seus limites em movimento e o atrito ao longo das superfícies em contato (Zheng et al., 2016). No caso de próteses odontológicas, tensões elevadas podem ocorrer em todo o corpo do pino, principalmente na região de transição entre a coroa e a raiz do dente, prejudicando o sucesso do implante.

O problema de contato mecânico foi primeiramente estudado por Hertz, em 1882, que desenvolveu os primeiros modelos analíticos conhecidos. Atualmente, dificuldades apresentadas pelo tratamento analítico do contato podem ser solucionadas computacionalmente, através de softwares de análise por Elementos Finitos, que incluem em seu código ferramentas para o tratamento de problemas de contato.

Portanto, a partir de geometrias tridimensionais, obtidas a partir de técnicas de Engenharia Reversa, este projeto tem como objetivo analisar as tensões de contato em uma prótese odontológica, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), e comparar os resultados obtidos com os resultados de modelos sem contato.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste projeto, foi simulada, através de um modelo computacional de Elementos Finitos, a estrutura real de um dente com pino intracanal e coroa, como apresentado na Figura 1.

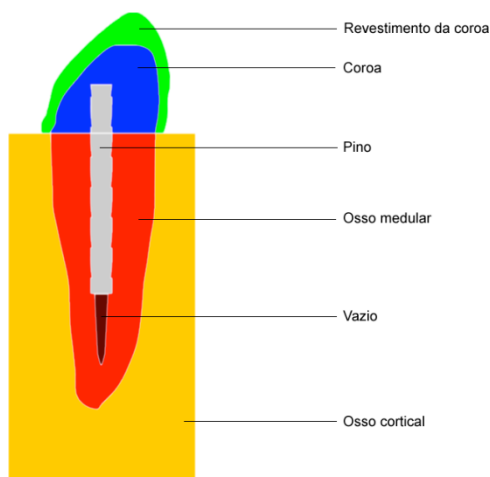


Figura 1. Vista em corte da estrutura analisada.

Além disso, foi analisada a condição em que o pino não é um sólido único junto à coroa, a partir do estudo de três tipos de pinos: pino ranhurado, pino de metal e pino liso (Figura 2).



Figura 2. Pino ranhurado, pino de metal e pino liso.

Todos os materiais utilizados neste estudo foram considerados isotrópicos, homogêneos e linearmente elásticos. As propriedades mecânicas usadas para a simulação estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades dos materiais dos componentes, utilizadas na simulação do modelo.

Estrutura	Material	Módulo de Elasticidade (N/m ²)	Coefficiente de Poisson	Referências
Revestimento da Coroa	Porcelana Feldispática	$6,89 \times 10^{10}$	0,28	Geng et al. (2001)
Coroa	Prata-Paládio	$9,32 \times 10^{10}$	0,33	Craig (1989)
Pino Ranhurado e Pino Liso	Fibra de Vidro	$4,00 \times 10^{10}$	0,26	Asmussen et al. (2005)
Pino de Metal	Ti (ASTM-F67)	$10,00 \times 10^{10}$	0,34	Akour et al. (2005)
Raiz	Raiz	$1,86 \times 10^{10}$	0,31	Isidor et al. (1996)
Osso Interno	Osso Medular	$0,137 \times 10^{10}$	0,30	Asmussen et al. (2005)
Osso Externo	Osso Cortical	$1,37 \times 10^{10}$	0,30	Asmussen et al. (2005)

A metodologia utilizada para avaliação estrutural do modelo em estudo incluiu técnicas de obtenção de imagem, modelagem tridimensional de estruturas e análise em elementos finitos.

As geometrias dos modelos odontológicos reais foram obtidas previamente no estudo realizado por Freitas et al. (2012). Em tal estudo, o modelo ortodôntico foi submetido à tomografia computadorizada (TC). As imagens tridimensionais obtidas por TC passaram por processamento e, em seguida, foram importadas para o software de modelagem geométrica *SolidWorks*, para remodelagem da geometria e geração de estrutura sólida digital. Ainda no *SolidWorks*, a geometria foi condicionada, tendo suas superfícies simplificadas, recortadas ou recosturadas de forma a garantir a qualidade do modelo sólido final.

Para o pino ranhurado, utilizou-se o projetor de perfil Mitutoyo PJ311 para verificar detalhes do se perfil e obter assim dimensões mais exatas para sua modelagem no *SolidWorks*. Para os pinos de metal e liso, por apresentarem perfis mais simples, as medidas de todas as dimensões com o auxílio de um paquímetro foram suficientes para a realização da modelagem geométrica dos pinos no software *SolidWorks*.

Com a geometria definida, a estrutura tridimensional final foi então importada para o software *Ansys* para uma avaliação estrutural dos componentes biomecânicos por meio do Método dos Elementos Finitos.

O primeiro passo da análise por MEF foi a geração da malha a partir da geometria criada. Os elementos da malha estão diretamente associados às propriedades mecânicas dos materiais, as quais estão expressas na Tabela 1.

Neste trabalho, foi selecionado um elemento tetraédrico, utilizado para superfícies irregulares e análises não-lineares. Ele apresenta um comportamento de deformação quadrático.

Para que os elementos fossem gerados de forma adequada, foi adotado um procedimento de geração de malha gradual. Ele consiste em gerar, primeiramente, a malha do volume com maiores detalhes e que exige elementos de menores dimensões. Posteriormente, é gerada a malha do volume que está em contato direto com esse primeiro volume, e assim sucessivamente. Dessa forma, a expansão dos elementos de malha é gradual e a qualidade fica dentro de padrões definidos.

Em relação a forma como os componentes interagem entre si, foram analisados dois tipos de casos.

Primeiramente, foi gerado um modelo “colado”, uma simplificação na qual os componentes não apresentam atrito entre si, ou seja, nas regiões de contato entre eles, os nós são todos coincidentes. Tal simplificação se aproxima da condição real e facilita o cálculo da estrutura, reduzindo também seu tempo de processamento.

Posteriormente, foi gerado um modelo com contato, no qual foram introduzidos, durante a geração da malha, os elementos de contato mecânico na região entre o pino e a raiz do dente, a fim de permitir uma análise estrutural mais apropriada.

A força total a ser aplicada, no valor de 200 N, foi dividida em quatro e aplicada nos quatro pontos da geometria que formam a área de contato da força nessa região. Dessa forma, o esforço é distribuído no topo do revestimento da coroa. Na ocasião da força ser aplicada em um único nó central, haveria um pico de tensão inadequado, por concentrar toda a carga em um ponto. Como fixação, foram restringidos todos os graus de liberdade da base do modelo e ainda foi considerada a restrição de simetria nas laterais do osso cortical, pois dessa forma simula-se a continuidade do osso num volume não representado.

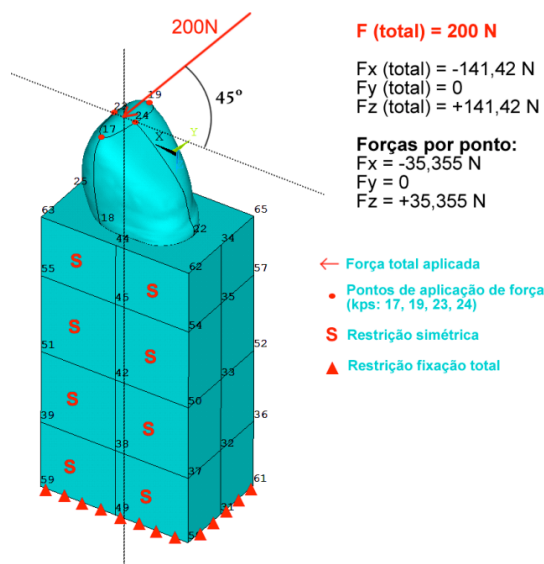


Figura 3. Condições de Contorno aplicadas no modelo.

A análise dos resultados consistiu na obtenção das tensões de Von Mises (tensões equivalentes) e cisalhamento, com posterior análise qualitativa dos valores numéricos de tensão obtidos, buscando verificar os efeitos da aplicação de carga nos níveis de tensão em todos os componentes da estrutura, especialmente no pino e na raiz. Tal procedimento foi realizada tanto para o modelo “colado” quanto para o modelo com contato, sendo possível estabelecer uma comparação entre eles.

3. RESULTADOS

Para cada tipo de pino, foram analisados um modelo colado (sem contato) e um modelo com contato. Todos os modelos gerados são projetos iniciais e foram capazes de serem processados e de gerar resultados.

3.1. Pino Ranhurado

Para ambos os modelos, o cisalhamento máximo ocorreu na região ligeiramente acima da interface raiz-coroa (Figura 4), enquanto que os máximos valores de tensão de Von Mises (Figura 5) ocorreram na região de interface raiz-coroa. Além disso, o corpo do pino apresentou baixos valores de tensão na análise de cisalhamento máximo.

Tanto para o cisalhamento máximo quanto para tensão de Von Mises, o modelo com contato apresentou distribuição de tensões semelhantes ao modelo colado, porém com valores de tensão diferentes e uma maior área de abrangência.

3.2. Pino Liso

Verificou-se que o comportamento do pino liso foi semelhante ao do pino ranhurado.

Para ambos os modelos, o cisalhamento máximo ocorreu na região ligeiramente acima da interface raiz-coroa (Figura 6), enquanto que os máximos valores de tensão de Von Mises (Figura 7) ocorreram na região de interface raiz-coroa. Além disso, o corpo do pino apresentou, novamente, baixos valores de tensão na análise de cisalhamento máximo.

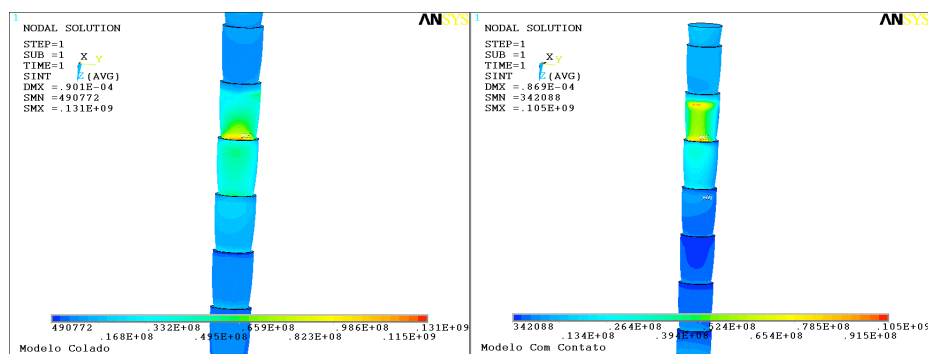


Figura 4. Pino Ranhurado: Cisalhamento Máximo para o modelo colado (esquerda) e com contato (direita).

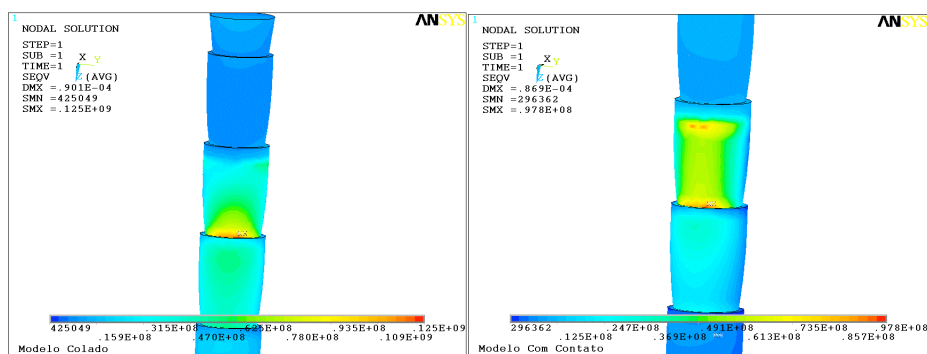


Figura 5. Pino Ranhurado: Tensão de Von Mises para o modelo colado (esquerda) e com contato (direita).

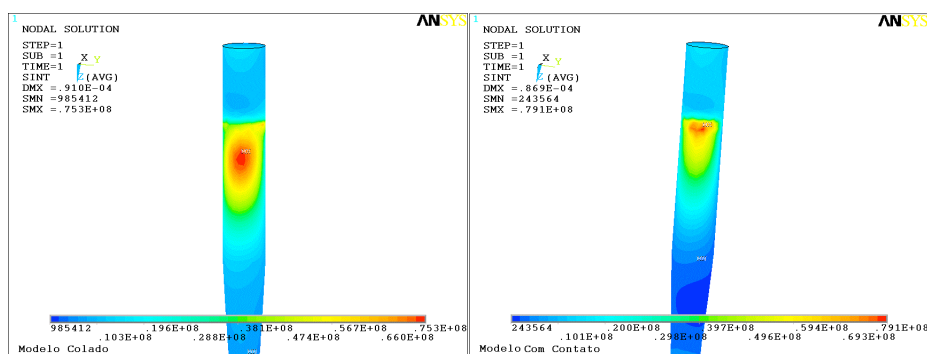


Figura 6. Pino Liso: Cisalhamento Máximo para o modelo colado (esquerda) e com contato (direita).

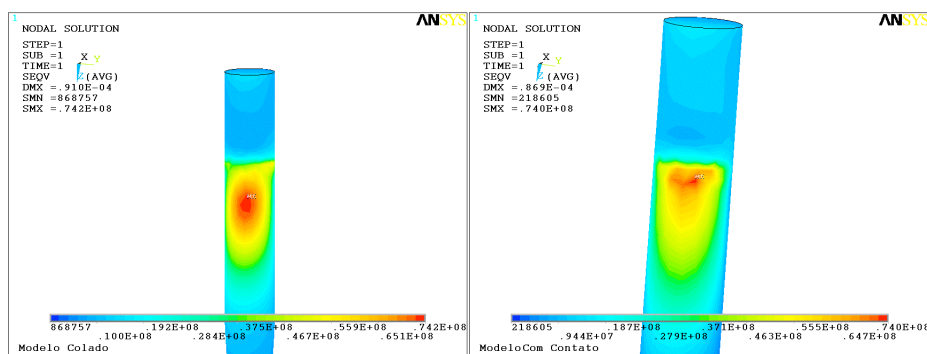


Figura 7. Pino Liso: Tensão de Von Mises para o modelo colado (esquerda) e com contato (direita).

Tanto para o cisalhamento máximo quanto para tensão de Von Mises, o modelo com contato apresentou distribuição de tensões semelhantes ao modelo colado, porém com valores de tensão diferentes e uma maior área de abrangência.

Os níveis de tensão obtidos para o pino liso foram menores do que para o pino ranhurado.

3.3. Pino de Metal

O pino de metal apresentou um comportamento semelhante aos pinos anteriores, sendo que a tensão no corpo do pino foi muito menor do que na região de interface.

Para ambos os modelos, o cisalhamento máximo ocorreu na região ligeiramente acima da interface raiz-coroa (Figura 8), enquanto que os máximos valores de tensão de Von Mises (Figura 9) ocorreram na região de interface raiz-coroa.

Novamente, tanto para o cisalhamento máximo quanto para tensão de Von Mises, o modelo com contato apresentou distribuição de tensões semelhantes ao modelo colado, porém com valores de tensão diferentes e uma maior área de abrangência.

O pino de metal apresentou os maiores níveis de tensão dentre os três pinos analisados.

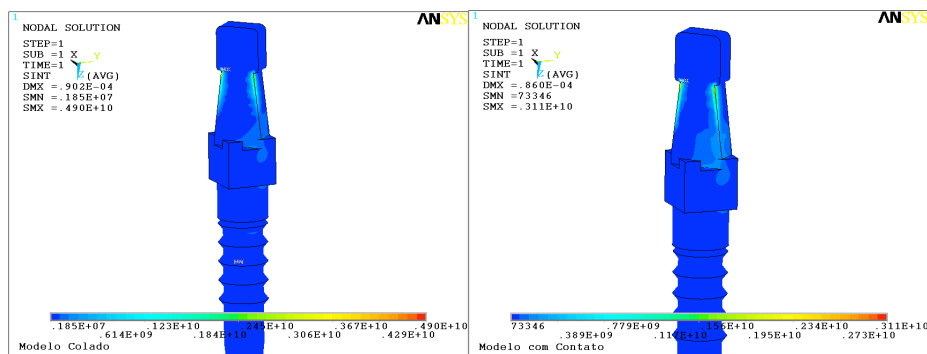


Figura 8. Pino de Metal: Cisalhamento Máximo para o modelo colado (esquerda) e com contato (direita).

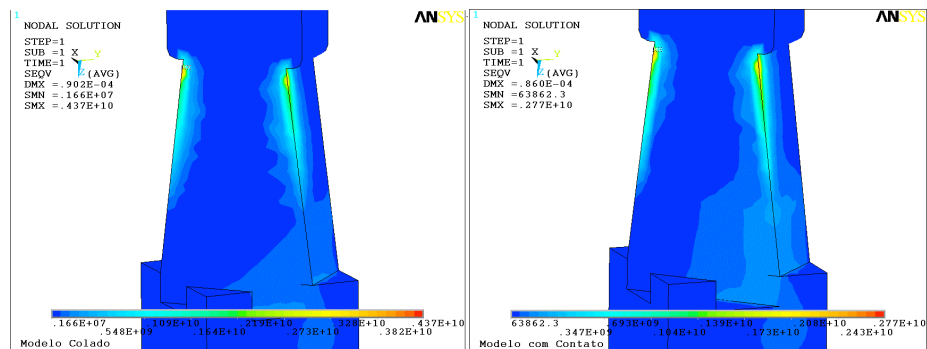


Figura 9. Pino de Metal: Tensão de Von Mises para o modelo colado (esquerda) e com contato (direita).

3.4. Comparação entre os Modelos

A comparação entre os modelos indicou que há diferença de comportamento na interface raiz-coroa-pino quando se adiciona elementos de contato. Quando comparados aos modelos colados, os modelos com contato apresentaram uma maior abrangência das tensões na região de interesse. O comportamento dos modelos foi semelhante com relação à distribuição das tensões, porém os níveis de tensões foram diferentes.

Verificou-se que elementos de contato tornam o modelo mais realista e complexo, pois evidenciam regiões tensionadas que não podem ser reproduzidas no modelo colado devido à restrição de movimento entre os componentes do sistema. Além disso, fornecem mais detalhes na análise de tensões da região de interesse (interface pino-raiz-coroa) e trazem a possibilidade de estudos futuros como a aplicação de uma resina nesta interface.

Com relação aos pinos, pode-se perceber que o comportamento dos três foi parecido com relação às distribuições de tensões. Já os níveis de tensão foram diferentes, sendo que o pino liso apresentou os menores valores e o pino de metal apresentou os maiores valores, tanto para o cisalhamento quanto para a tensão de Von Mises. Observou-se também que as máximas tensões nos pinos ocorreram nas regiões de transição entre a coroa e a raiz, sendo estas as regiões mais críticas do modelo.

Com os resultados obtidos e com uma análise mais criteriosa das regiões de possíveis falhas, é possível se desenvolver estruturas mais reforçadas e apenas substituí-las no modelo de elementos finitos para se refazer o cálculo e, posteriormente, avaliar as possíveis reduções de tensão na estrutura. Dessa forma, mantendo-se os materiais e alterando-se as geometrias, pode-se obter projetos mais rígidos e de forma mais rápida quando comparado aos processos de prototipagem real sem pré-cálculo. Há outra condição em que se pode trabalhar na reengenharia estrutural, que é a substituição de alguns materiais. Nessa condição, um fator mais crítico deve ser observado, o financeiro. Materiais mais rígidos e ao mesmo tempo biocompatíveis ainda tem valores elevados e que, dependendo da aplicação das próteses, devem ser levados em consideração na hora da escolha.

4. CONCLUSÃO

A metodologia aplicada foi considerada adequada para as condições em que se foi tratada nesse trabalho e, se comprovada a qualidade dos resultados obtidos, os processos analisados também podem ser utilizados para outras estruturas biomecânicas, garantindo assim uma maior abrangência quanto à aplicabilidade de tais técnicas no desenvolvimento de outras categorias de implantes e próteses.

Concluindo, a remodelagem estrutural e o cálculo pelo Método dos Elementos Finitos são considerados viáveis para análise de projetos biomecânicos já existentes ou para resolver problemas que possam vir a ocorrer nessas estruturas, de forma preditiva e rápida.

5. REFERÊNCIAS

- Alves Filho, A., 2013, "Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE", Ed. Érica, São Paulo, Brazil, 6 ed.
- Akour, S. N., Fayyad, M. A. and Nayfeh, J. F., 2005, "Finite Element Analyses of Two Antirotational Designs of Implant Fixtures", *Implant Dentistry*, Vol. 14, No. 1, pp. 77-81.
- Asmussen, E., Peutzfeldt, A. and Sahafi, A., 2005, "Finite Element Analysis of Stresses in Endodontically Treated, Dowel-Restored Teeth", *The Journal of Prosthetic Dentistry*, Vol. 94, No. 4, pp. 321-329.
- Chang, H.-S., Chen, Y.-C., Hsieh, Y.-D. and Hsu, M.-L., 2013, "Stress Distribution of Two Commercial Dental Implant Systems: A Three-Dimensional Finite Element Analysis", *Journal of Dental Sciences*, Vol. 8, pp. 261-271.
- Chen, J., Zhang, Z., Chen, X., Zhang, C., Zhang, G. and Xu, Z., 2014, "Design and Manufacture of Customized Dental Implants by using Reverse Engineering and Selective Laser Melting Technology", *The Journal of Prosthetic Dentistry*, Vol. 112, No. 5, pp. 1088-1095.
- Craig, R. G., 1989, "Restorative Dental Materials", St. Louis (MO): Mosby, 8 ed., p. 84.
- Freitas, J. P. O., Sousa, E. A. C., Silveira, E. C. and Cossetin, E., 2012, "Processos de Obtenção e Condicionamento de Imagens de Estruturas Biomecânicas Tridimensionais para Análise por Elementos Finitos", *Proceedings of the 7th Brazilian Congress of Mechanical Engineering*, Maranhão, Brazil.
- Geng, J.-P., Tan, K. B. C. and Liu, G.-R., 2001, "Application of Finite Element Analysis in Implant Dentistry: A Review of the Literature", *The Journal of Prosthetic Dentistry*, Vol. 85, No. 6, pp. 585-598.
- Güngör, M. B. and Yılmaz, H., 2016, "Evaluation of Stress Distributions Occurring on Zirconia and Titanium Implant-Supported Prostheses: A Three-Dimensional Finite Element Analysis", *The Journal of Prosthetic Dentistry*.
- Ha, S.-R., Kim, S.-H., Lee, J.-B., Han, J.-S., Yeo, I.-S. and Yoo, S.-H., 2016, "Effects of Coping Designs on Stress Distributions in Zirconia Crowns: Finite Element Analysis", *Ceramics International*, Vol. 42, pp. 4932-4940.
- Isidor, F., Odman, P. and Brondum, K., 1996, "Intermittent Loading of Teeth Restores Using Prefabricated Carbon Fiber Posts", *Int. J. Prosthodont*, Vol. 9, pp. 131-136.
- Lakshmi, R. D., Abraham, A., Sekar, V. and Hariharan, A., 2015, "Influence of Connector Dimensions on the Stress Distribution of Monolithic Zirconia and Lithium-di-Silicate Inlay Retained Fixed Dental Prostheses – A 3D Finite Element Analysis", *Tanta Dental Journal*, Vol. 12, pp. 56-64.
- Zheng, X., Zhang, J., Xiong, K., Shu, X. and Han, L., 2016, "Boundary Face Method for 3D Contact Problems with Non-Conforming Contact Discretization", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 63, pp. 40-48.
- Zhou, Q., Wang, Z., Chen, J., Song, J., Chen, L. and Lu, Y., 2016, "Development and Evaluation of a Digital Dental Modeling Method Based on Grating Projection and Reverse Engineering Software", *The Journal of Prosthetic Dentistry*, Vol. 115, No. 1, pp. 42-46.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

REVERSE ENGINEERING APPLIED TO THE DESIGN OF BIOMECHANICAL STRUCTURES WITH NUMERICAL ANALYSIS BY FINITE ELEMENT METHOD

Jovana Santoro Nakagaki, jsnakagaki_93@hotmail.com¹

Otávio Galo Foster, otaviogalof@gmail.com¹

Alexander Paterno, alexander.paterno@hotmail.com¹

Bruno Agostinho Hernandez, bhernandez@uol.com.br¹

Gabriela Garcia Paschoeto, gabapaschoeto@gmail.com¹

Edson Antonio Capello Sousa, capello@feb.unesp.br¹

¹School of Engineering of Bauru – Sao Paulo State University, Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube 14-01, Zip Code 17033-360, Bauru, SP, Brazil.

Abstract. *The Finite Element Method (FEM) has been very effective in simulating biomechanical problems, besides being widely used in the analysis of dental prostheses in order to improve this system, to verify the success of current implants on the market and to analyze the factors that influence implant failure. From three-dimensional geometries, obtained through reverse engineering techniques, this study aims to analyze the contact stresses in a dental prosthesis using MEF, and compare the results obtained with the contactless models results. The real structure analyzed is a tooth with intracanal post and crown, in which three types of pins were studied. The methodology used for structural evaluation of the model included detailed processes of data acquisition, selection of regions of interest, generation of three-dimensional visual models, solid remodeling, and finally FEM analysis. First, it generated a contactless model, which the components of the structure were entirely "glued" together. Subsequently, contact elements were inserted in the region between the pin and the tooth root. The analysis of the results consisted of qualitative analysis of the numerical values of Von Mises stress and shear, seeking to compare and verify the functionality of both models (with and without contact). In addition to providing more details on stress analysis of the region of interest (pin-root-crown interface), the contact elements show tensioned regions that can not be reproduced in the contactless model, due to the restriction of movement between system components. About the pins, it was observed that the maximum stresses occur in the transition regions between the crown and the root, which are the most critical regions of the model. Finally, the structural remodeling and finite element analysis can be considered viable for analysis of existing biomechanical projects or to solve problems that may occur in these structures, predictive and quickly.*

Keywords: *Biomechanics, Finite Element, Dental Prosthesis*