

## Projeto de estruturas biomecânicas com análise numérica pelo Método de Elementos Finitos

Otávio Galo Foster, Faculdade de Engenharia de Bauru-UNESP, otaviogalof@gmail.com  
Edson Antonio Capello Sousa, Faculdade de Engenharia de Bauru-UNESP, capello@feb.unesp.br  
Bruno Agostinho Hernandez, Faculdade de Engenharia de Bauru-UNESP, bhernandez@uol.com.br

**Resumo.** O objetivo deste trabalho é estudar modelos geométricos tridimensionais de uma prótese odontológica introduzindo elementos de contato entre os componentes da estrutura, avaliar estruturalmente os componentes biomecânicos da prótese através de um modelo de elementos finitos e comparar os resultados obtidos com os resultados dos modelos sem contato. Para esse estudo, ambos os modelos foram gerados com condições de contorno idênticas, diferindo apenas pela utilização de elementos de contato em um dos modelos. A metodologia aplicada foi: Geração da malha de elementos finitos para ambos os modelos, geração dos elementos de contato para um dos modelos e coincidência de nós (modelo colado) no outro, aplicação das condições de contorno e análise dos resultados. Foi possível concluir que o modelo com elementos de contato apresentou resultados que permitem analisar o efeito da interface no funcionamento da prótese, portanto o modelo gerado é válido para a análise estrutural da prótese odontológica.

**Palavras chave:** Prótese Odontológica, Elementos finitos, Problemas de contato, Biomecânica

### 1. INTRODUÇÃO

O MEF (modelo de elementos finitos) é um método numérico baseado na discretização em forma de malha, tendo como parâmetro base o deslocamento nodal, 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 (desenvolvendo um novo projeto para a prótese ou sugerindo outros materiais de construção), buscar verificar o sucesso dos implantes atuais no mercado, e analisar os fatores que influenciam na falha da prótese. Capello Sousa (2010), afirmam que o Método dos Elementos Finitos possui a vantagem em oferecer ao modelo diversas condições que podem ser alteradas facilmente, além de permitir medidas de distribuição de tensão/deformação em pontos opcionais que são difíceis de examinar clinicamente e/ou experimentalmente.

Segundo Skalak (1983), um dos fatores mais importantes que influenciam no sucesso ou na falha da prótese é a forma como ele recebe e transfere as tensões para o osso. Para que obtenha êxito, é necessário que os componentes da prótese não excedam as tensões limites. Akça *et al.* (2002), afirmam que a avaliação e a interpretação precisa dos carregamentos biomecânicos sobre as próteses são os principais requisitos para a previsão clínica da resposta do osso e para a longevidade de todo o sistema implanto-suportado.

O problema de contato é muito comum em diversos sistemas mecânicos e vem sendo amplamente estudado, visto que muitas falhas, desgastes e fraturas ocorrem devido a esse problema, podendo gerar tensões extremamente elevadas. No caso de próteses odontológicas, essas 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 da prótese.

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.

A análise por Elementos Finitos do problema de contato começou em 1976. No livro *Contact Mechanics*, Jonhson (1985) descreve as principais soluções analíticas para problemas de contato, tanto contato hertziano como contato não-hertziano, com ou sem atrito, além de outros problemas comuns na prática. Hoje muitos estudos são feitos no contato entre elementos de máquinas, justamente para evitar possíveis falhas mecânicas.

### 2. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são: Incorporar e utilizar os modelos geométricos tridimensionais de uma prótese odontológica em um software de análises por MEF; Gerar um modelo sem elementos de contato; Introduzir os elementos de contato entre os componentes da estrutura com uma simplificação na qual os componentes não apresentam atrito entre si; Avaliar estruturalmente os componentes biomecânicos da prótese, através de análises por MEF; Comparar os resultados obtidos com os resultados anteriores dos modelos sem contato, buscando verificar possíveis divergências entre as duas análises; Compreender o efeito do problema de contato entre os componentes da prótese.

### 3. METODOLOGIA

Existem dois tipos de reabilitações unitárias, na primeira retira-se completamente o dente e raiz e coloca-se um implante, na segunda, a raiz é mantida. O sistema é constituído de pino, coroa, revestimento da coroa, raiz do dente e osso medular. O modelo representado é relativo ao segundo método de reabilitação onde aproveita-se a raiz do dente e dentro dela coloca-se um pino, sobre o qual é confeccionada uma prótese, como pode ser visto na Figura 1, o vazio existente é devido ao processo de perfuração do osso, a profundidade alcançada pela broca é maior que o comprimento do pino em contato com o osso. O osso cortical não foi representado no conjunto, pois trata-se de um modelo inicial, onde está se testando a interação entre pino e raiz e coroa.

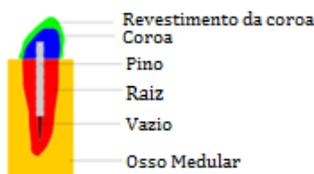


Figura 1. Vista em corte do conjunto

As propriedades mecânicas dos materiais utilizados estão dispostas na tabela 1 e foram retirados da bibliografia.

Tabela 1. Propriedades dos Materiais Utilizados

Estrutura	Material	Módulo de Young(N/m <sup>2</sup> )	Coefficiente de Poisson	Referências
Revestimento da Coroa	Porcelana Feldspática	$6,90 \times 10^{10}$	0,28	Geng ET AL. (2001)
Coroa	Prata-paládio	$9,32 \times 10^{10}$	0,33	Craig (1989)
Pino de Metal	Ti (ASTM-F67)	$1,00 \times 10^{11}$	0,34	Sakaguichi et al (1994)
Osso interno	Osso Medular	$1,37 \times 10^9$	0,30	Juodzbaly et al. (2005)
Osso externo	Osso cortical	$1,37 \times 10^{10}$	0,30	Juodzbaly et al. (2005)
Raiz	Raiz	$1,86 \times 10^{10}$	0,31	Isidor et al. (1996)

#### 3.1. MANIPULAÇÃO DA GEOMETRIA

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.

Na construção da malha, considerou-se que, no contato entre as peças coladas, os nós fossem todos coincidentes. É uma simplificação que se aproxima da condição real e que facilita o cálculo da estrutura, reduzindo também seu tempo de processamento. Para que isso fosse possível, foi necessário o trabalho com as ferramentas booleanas do *Ansys 13*. Com elas é possível combinar sólidos que estão em intersecção fazendo com que as áreas em comum sejam as mesmas e dessa forma os nós sejam também os mesmos, coincidindo-se automaticamente. A Figura 2 mostra como funciona o comando que trabalha com intersecção de sólidos no *Ansys 13*.

Na região entre pino e raiz do dente foram inseridos elementos de contato com análise não linear.



Figura 2. Processo de subtração de volumes

Para a realização deste trabalho, foi aplicada a metodologia citada acima. No modelo sem contato, quando usado o comando de subtração de volumes, algumas das regiões entre o pino e a raiz do dente eram coladas automaticamente, o que impossibilitava a aplicação dos elementos de contato na região de interesse. Para resolver este problema um parâmetro teve de ser adicionado ao comando de subtração de volumes, forçando com que as áreas do pino e da raiz

fossem diferentes. Para efeitos de comparação, o modelo totalmente colado também utilizou a separação de áreas entre pino e raiz, mas elas foram totalmente coladas posteriormente.

### 3.2. GERAÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

A escolha do elemento é um fator importante, neste trabalho foi selecionado um elemento tetraédrico, utilizado para superfícies irregulares e análises não-lineares. Ele apresenta um comportamento de deformação quadrático. A tabela (1) apresenta os elementos utilizados nas geometrias “coladas” e os elementos utilizados nas geometrias que apresentam contato. A tabela também traz as descrições dos elementos.

Tabela 2. Elementos utilizados, descrição e representação

	Descrição	Representação
Tetraedros parabólicos (SOLID187)	Elemento 3D com 10 nós e 3 graus de liberdade por nó	
Superfícies Alvo (TARGE170)	Elemento 3D com segmento de alvo	
Contato superfície-superfície (CONTA174)	Elemento 3D com 8nós, contato superfície-superfície	

Na geração da malha, alguns cuidados devem ser tomados quanto à qualidade dos elementos gerados. Distorções ou grandes diferenças de tamanho de elemento podem causar diferenças de rigidez localizadas, tornando os resultados imprecisos ou incorretos. Para garantir a qualidade da malha de elementos, a geração da malha exige a pré-segmentação de linhas para determinar a quantidade de elementos por aresta do sólido. A figura 3 mostra a aplicação desta metodologia no pino em estudo.

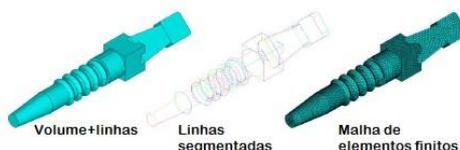


Figura 3. Metodologia para a geração de malha de qualidade no pino

### 3.3. CONDIÇÕES DE CONTORNO

Foi aplicada uma força total no valor de 200 N, dividida em quatro e aplicada em 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, restringiu-se todos os graus de liberdade da base do modelo e considerou-se restrição de simetria “S” nas laterais do osso cortical, pois dessa forma simula-se a continuidade do osso num volume não representado. As condições de contorno aplicadas estão apresentadas na Figura 4.

A condição de simetria se assemelha a continuidade de osso no arredor do modelo, representando uma parte pequena de uma região grande, assim não se induz uma condição de contorno inexistente no modelo.

A condição de contorno de engaste na base deve restringir o movimento da base da estrutura.

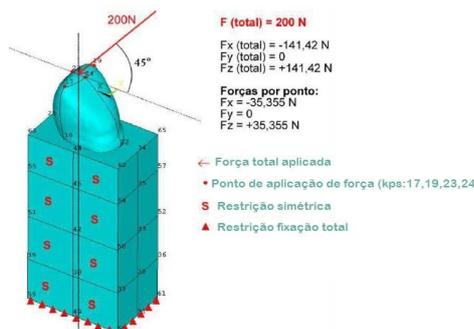


Figura 4. Condições de Contorno

#### 4. RESULTADOS

Trata-se de uma análise focada na verificação da funcionalidade de ambos os modelos com posterior comparação entre os mesmos para as tensões de Von Mises, cisalhamento e na análise qualitativa dos valores numéricos de tensão obtidos. Ambos os modelos foram gerados com sucesso, sendo possível a obtenção de resultados. Com isso, é possível estabelecer a comparação entre eles.

Pode-se observar na Figura 5 que o modelo colado apresentou o cisalhamento máximo na região ligeiramente acima da interface raiz-coroa e o corpo do pino apresentou baixos valores de tensões. Na Figura 6, o modelo com contato apresentou distribuição de tensões semelhantes, porém com valores de tensão diferentes e uma maior área de abrangência em relação ao anterior.

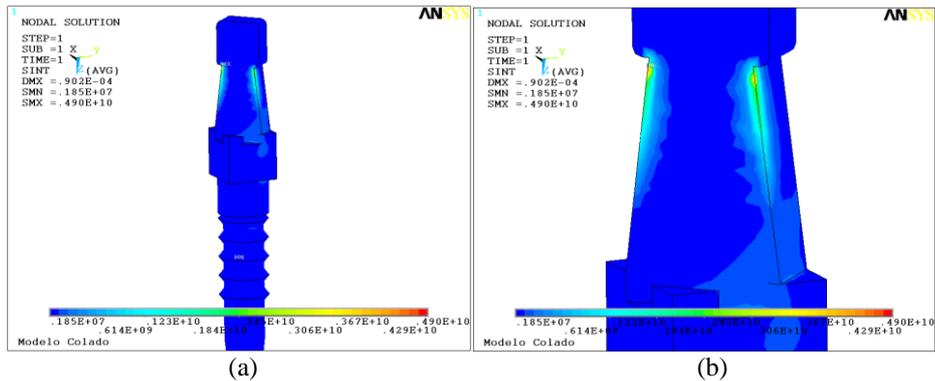


Figura 5. Cisalhamento Máximo para o modelo colado: a) Pino inteiro b) Detalhe da região mais solicitada

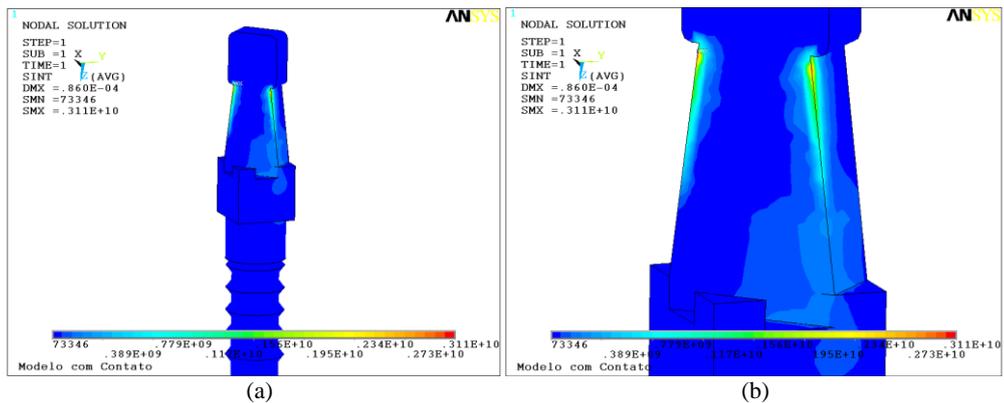


Figura 6. Cisalhamento Máximo para o modelo com contato: : a) Pino inteiro b) Detalhe da região mais solicitada

Para a tensão de Von Mises (Figura 7) os valores máximos de ambos os modelos ocorreram na região de interface entre raiz e coroa. Novamente a distribuição das tensões foi similar para os dois modelos e mais abrangente no modelo com contato, os níveis de tensões foram diferentes entre os modelos. Portanto há um diferença de comportamento da interface raiz-coroa-pino quando adiciona-se elementos de contato no modelo.

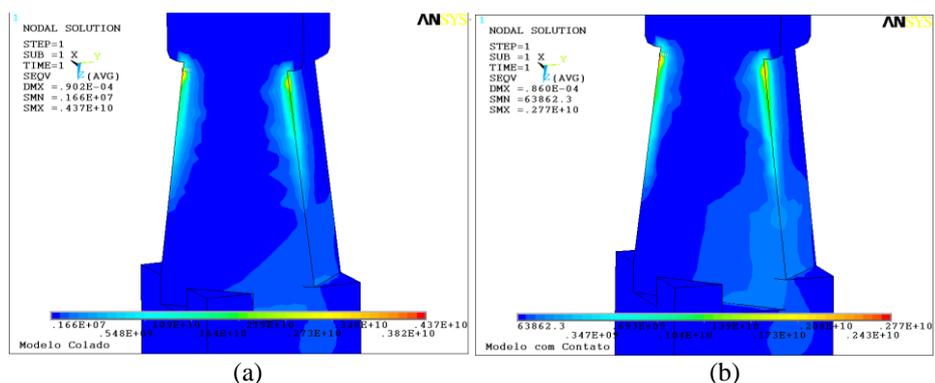


Figura 7. Tensão de Von Mises: a) Modelo colado b) Modelo com contato

## 5. CONCLUSÃO

Ambos os modelos gerados são projetos iniciais e foram capazes de serem processados e de gerar resultados. A comparação entre os modelos serve de base para verificar se há diferenças quando se adiciona elementos de contato. Os elementos de contato tornam o modelo mais realista e complexo.

O modelo com contato apresentou 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. Elementos de contato trazem uma análise quantitativa das tensões existentes, podendo evidenciar regiões de tensionadas que não podem ser reproduzidas no modelo colado devido à restrição de movimento entre os componentes do sistema. Elementos de contato trazem 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 um resina nesta interface.

## 6. REFERÊNCIAS

- CAPELLO SOUSA, E. A. C. **Análise linear de contato mecânico aplicada ao Projeto de Próteses Odontológicas através do método de elementos finitos**. 2010. Dissertação (Livre docência em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, 2010. SKALAK, R. Biomechanical considerations in osseointegrated prostheses. **The Journal of prosthetic dentistry**, v. 49, n. 6, p. 843-848, 1983.
- AKÇA, K.; CEHRELI, M.C.; A Comparison of Three-Dimensional Finite Element Stress Analysis with In Vitro Strain Gauge Measurements on Dental Implants, **International Journal Of Prosthodontics**, v. 15, p. 115-121, 2002.
- JOHNSON, K. L. Contact Mechanics. Great Britain: Cambridge University Press, 1985.
- CRAIG, R. G.; POWERS, J. M. **Restorative dental materials**. 8. ed., St. Louis etc.: Mosby, 1989.
- GENG, J-P.; TAN, K. B.C.; LIU, G-R. Application of finite element analysis in implant dentistry: a review of the literature. **The Journal of prosthetic dentistry**, v. 85, n. 6, p. 585-598, 2001.
- SAKAGUCHI, R. L.; BORGERSEN, S. E. Nonlinear contact analysis of preload in dental implant screws. **The International journal of oral & maxillofacial implants**, v. 10, n. 3, p. 295-302, 1994.
- JUODZBALYS, G.; KUBILIUS, R.; EIDUKYNAS, V.; RAUSTIA, A. M. Stress distribution in bone: single-unit implant prostheses veneered with porcelain or a new composite material. **Implant dentistry**, v. 14, n. 2, p. 166-175, 2005.
- ISIDOR, F., ODMAN, P., BRONDUM, K. Intermittent loading of teeth restored using prefabricated carbon fiber posts. *Int. J. Prosthodont.*, v.9, p. 131-6, 1996

## 7. ABSTRACT

*This paper's objective is to study an odontological prosthesis's tridimensional geometric models introducing contact elements between the components of the structure, evaluate structurally the prosthesis's biomechanical components by using a finite element model and compare the obtained results to the no contact model results. For this study, both the models were generated with identical boundary conditions, only differing by the use of contact elements in one of them. The methodology applied was: Finite element mesh generation for both models, contact elements generation for one of the models and node coincidence (glued model) on the other, boundary conditions application and results analysis. It was possible to conclude that the contact elements model showed results that allow the evaluation of the prosthesis's interface function, therefore the model is valid for the structural analysis of odontological prosthesis.*

## 8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.