

## Aplicações de modelos virtuais em problemas de bioengenharia

Giulia D. Gasparetto<sup>1</sup>, Pedro Y. Noritomi<sup>2</sup>, Leonardo M. R. Machado<sup>2</sup>  
{giulia.gasparetto, pedro.noritomi, leonardo.machado}@cti.gov.br

<sup>1</sup>Faculdade de Engenharia Mecânica  
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

<sup>2</sup> Núcleo de Tecnologias Tridimensionais – NT3D  
CTI/MCTI Renato Archer – Campinas/SP

**Abstract.** *Evaluating health research by experiment is complex for both moral and sample reasons. However, it is possible to use engineering techniques to overcome these difficulties. This article exemplifies the methodology and application of virtual models in a odontology study from a partner researcher of Núcleo de Tecnologias Tridimensionais (NT3D) of Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI). Through the Computer Aided Design (CAD) modeling method and finite element analysis, it was noted that this method provides comparative qualitative data between complex anatomical models. This is extremely relevant because it facilitates the hypothesis verification and innovative medical and dental research tests.*

**Resumo.** *Avaliar pesquisas da área da saúde por experimentos é complexo por motivos morais e amostrais. Entretanto, é possível utilizar técnicas da engenharia para superar essas dificuldades. Este trabalho exemplifica a metodologia e a aplicação de modelos virtuais em um estudo da odontologia de uma pesquisadora parceira do Núcleo de Tecnologias Tridimensionais (NT3D) do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI). Pelo método de modelagem em Desenho Assistido por Computador (DAC) e análise de elementos finitos, notou-se que esse método fornece dados qualitativos comparativos entre modelos anatômicos complexos. Fator de extrema relevância pois facilita a verificação de hipóteses e testes de pesquisas inovadoras da área médica e odontológica.*

### 1. Introdução

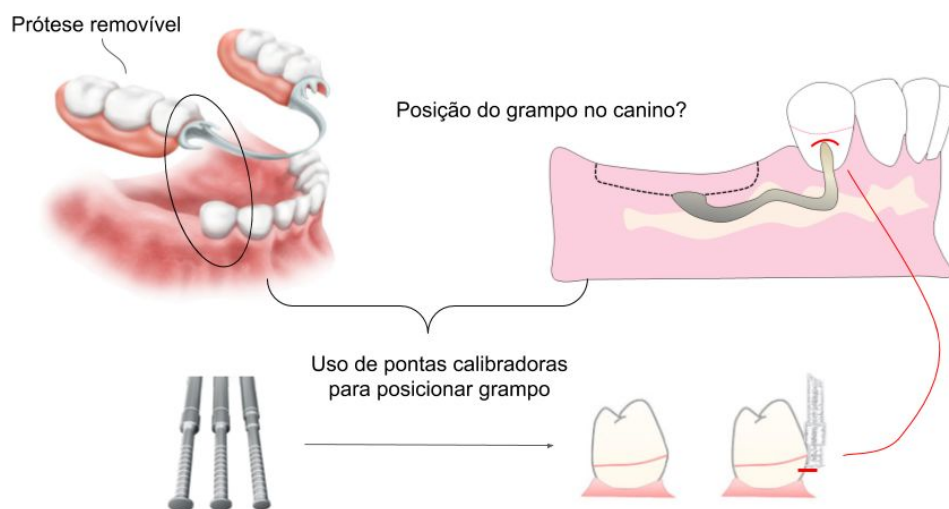
Com os avanços tecnológicos das últimas décadas, diversas áreas do conhecimento avançaram com técnicas e ferramentas inovadoras. Porém, pesquisas das ciências biológicas e médicas enfrentam dificuldades na etapa de validação de novos métodos. Além de envolver questões éticas e morais, testar teorias que envolvem sistemas anatômicos é complexo, visto que implica em experimentos minuciosamente planejados, já que o espaço amostral apresenta diversas variações de parâmetros entre

si, os quais dificilmente podem ser controlados, impossibilitando uma aplicação médica imediata [Sardenberg 1999].

Uma forma de superar essas questões é a aplicação de conhecimentos tecnológicos de outras áreas - como o uso de simulações computacionais - no campo biológico e médico. Para tanto, a aplicação de modelos virtuais - comuns da engenharia - em sistemas anatômicos constitui uma solução que a bioengenharia oferece para estudar novos métodos e mecanismos em correções médicas e ortodônticas [Antonio 2004].

Uma das técnicas utilizadas pela engenharia que tem alta aplicabilidade no ramo da saúde é a análise por elementos finitos (AEF) [Noritomi 2005]. O método consiste em dividir corpos maiores em vários pedaços menores uniformes, de forma é possível compreender o comportamento do corpo como um todo pela análise do comportamento desses pedaços menores em conjunto. Essa metodologia pode ser aplicada em diversos campos médicos, como odontologia e ortopedia [Oppermann 2016].

Neste artigo, será analisada a utilização de modelos virtuais e a AEF em um estudo de caso da odontologia: a influência de pontas calibradoras na fixação de prótese dentária removível. Essas próteses prendem-se aos dentes através de grampos, cuja posição é medida pelas pontas calibradoras, que podem ter tamanhos diferentes (figura 1). Nesse estudo, serão analisados quatro tamanhos de ponta calibradora, de 0,25 mm, 0,3 mm, 0,35 mm e 0,5 mm.



**Figura 1. Caso de estudo de pontas calibradores em prótese removível. Fonte: Autoral.**

## 2. Materiais e Métodos

Para realizar o estudo, a metodologia foi dividida nas seguintes etapas: modelagem virtual em DAC; geração de malha de elementos finitos; e simulação computacional.

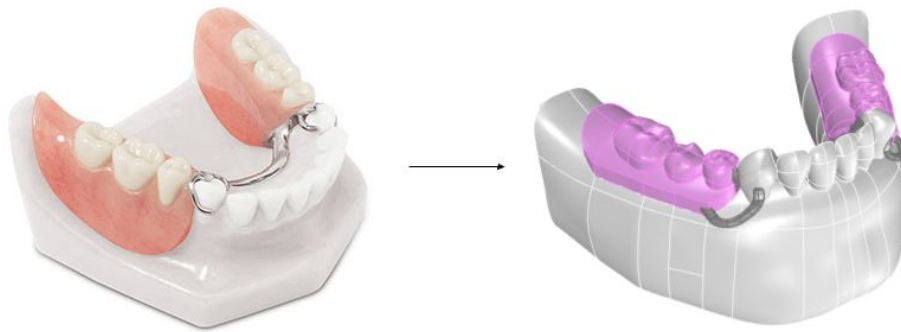
### 2.1. Modelo Virtual

Para realizar a análise, primeiro é necessário obter os modelos virtuais dos componentes envolvidos. As estruturas modeladas foram: ossos da mandíbula, ligamentos periodontais, gengiva, dentes e prótese removível (que envolve um corpo metálico e uma resina). Para a representação virtual desses componentes foi utilizado o Protocolo

BioCAD [Kemmoku *et al.* 2009], que guia a modelagem de geometrias orgânicas em NURBS (do inglês *Non Uniform Rational Basis Spline*) utilizando o *software* Mcneel Rhinoceros® (versão 5.0).

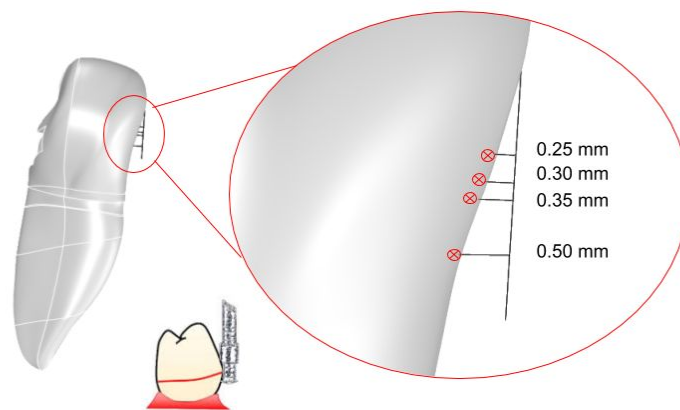
As geometrias da mandíbula, dos ligamentos periodontais e dos dentes foram importadas da biblioteca de modelos da NT3D - CTI Renato Archer. Elas representam virtualmente essas estruturas em um adulto genérico saudável. Já a gengiva foi desenhada utilizando o osso cortical da mandíbula como referência, por um *offset* de 1.4 mm.

Por fim, a prótese removível foi desenvolvida através de um molde de prótese disponibilizado para a pesquisa, assim mediu-se o molde e seu formato foi reproduzido virtualmente, conforme figura 2.



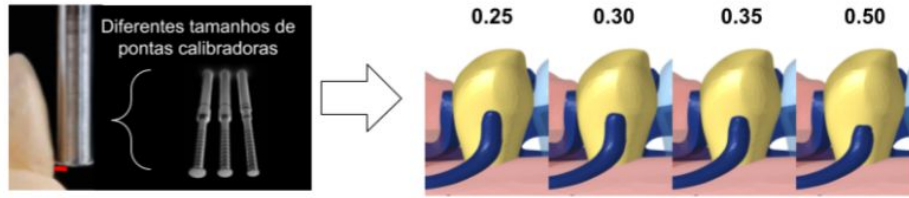
**Figura 2. Molde e adaptação virtual em DAC. Fonte: autoral.**

Para modelagem dos grampos na prótese, a posição deles nos caninos foi obtida pelas ferramentas de medida do próprio *software*, simulando o posicionamento das pontas calibradoras para marcar onde iria cada grampo (figura 3).



**Figura 3. Medida e posicionamento dos grampos. Fonte: autoral.**

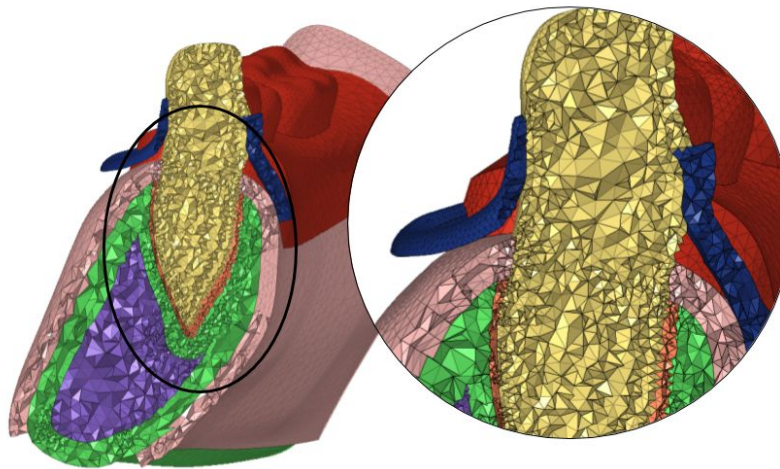
Por fim, obteve-se quatro modelos geométricos com variação nos grampos da prótese removível de cada um (figura 4).



**Figura 4. Variação dos modelos obtidos. Fonte: autoral.**

## 2.2. Malha de elementos finitos

Para a AEF, as geometrias modeladas anteriormente devem ser transformadas em malhas de elementos. Então essas geometrias foram importadas em formato STEP (do inglês: *Standard for Exchange of Product model data*) e Parasolid para o software Hypermesh (Altair, versão 2019) e - a partir das superfícies desses sólidos - geraram-se as malhas bidimensionais (2D) de elementos de formato triangular com nós nos vértices do triângulo (chamados *trias* de primeira ordem) - pela ferramenta *automesh* com os comandos *edge* e *surface deviation*. Nessa etapa também realizou-se um controle de malha, a fim de obter elementos menores em zonas de interesse e elementos maiores em zonas não tão expressivas. Assim finalizado o controle de distribuição de elementos e refinamentos, a malha 2D foi convertida em tridimensional (3D) com elementos tetraédricos de primeira ordem com a ferramenta *tetramesh* (figura 5).



**Figura 5. Malha em zona de interesse destacando refinamento e malha 3D.  
Fonte: autoral.**

As malhas dos quatro modelos foram concluídas (figura 6) e a sua qualidade foi verificada pelos parâmetros de: jacobiano - indica a distorção de elementos de seu formato original, também relaciona-se à confiabilidade da integração computacional -; *aspect ratio* - refere-se à razão entre as dimensões de um elemento (base e altura no caso) - e *skew* - mede a torção de elementos da malha [Burkhart *et al.* 2013].

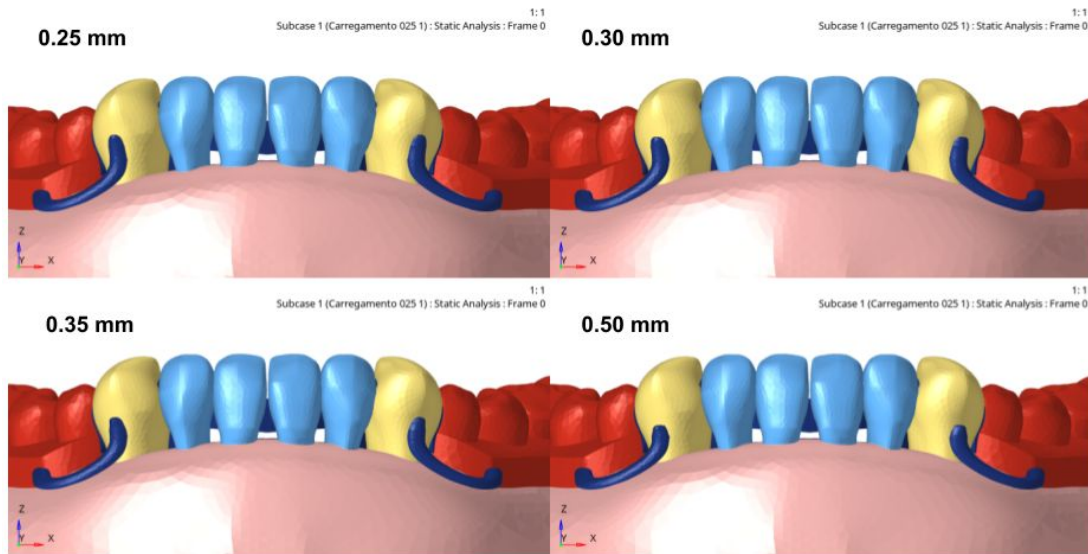


Figura 6. Malha dos modelos (comparativo). Fonte: autoral.

### 2.3. Simulação computacional

Nessa etapa é importante indicar para o *software* as condições iniciais para análise, portanto se definiram as condições de fixação e força do modelo, os contatos entre os componentes e o material de cada um. O modelo foi fixado nos planos distais da mandíbula e aplicou-se uma força de 40N em 5 pontos de compressão oclusal nos dentes em resina da prótese removível para cada modelo (3 pontos no primeiro molar e 2 pontos em cada um dos dois pré molares), totalizando 280N, simulando uma força de mordida (figura 7).

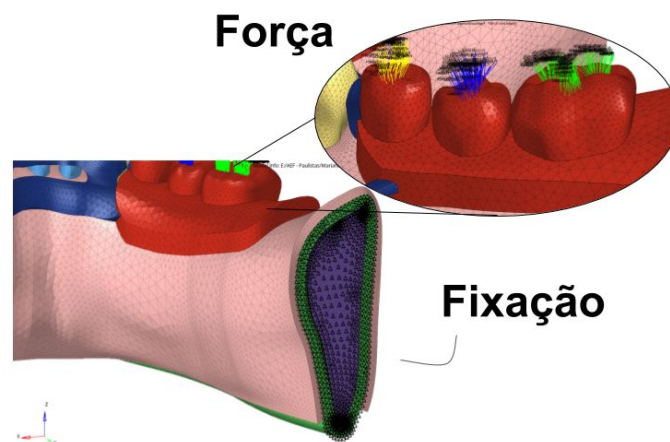


Figura 7. Fixação e força do modelo em questão. Fonte: autoral.

Os contatos entre os componentes foram criados com a ferramenta *autocontact* do *software*, formando elementos de contato. Esses contatos podem ser do tipo colados (*freeze*) ou deslizantes (*slide*). No trabalho, o contato entre as partes metálicas da prótese e os dentes foi considerado deslizante e os demais considerados colados. Os materiais utilizados em cada componente estão descritos na tabela 1.

**Tabela 1. Propriedades dos componentes. Fonte: autoral.**

Material (Card)	Card	Módulo de Elasticidade (E)	Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	Referências
Osso Cortical	PSOLID	11.760,0 MPa	0,25	[Nakamura <i>et al.</i> 2014]
Osso Esponjoso	PSOLID	1.4700, MPa	0,3	[Nakamura <i>et al.</i> 2014]
Ligamento	PSOLID	9,8 MPa	0,45	[Mizuno <i>et al.</i> 2016]
Gengiva (Mucosa do Rebordo)	PSOLID	680,0 MPa	0,45	[Verri <i>et al.</i> 2011]
Resina	PSOLID	2.450,0 MPa	0,3	[Nakamura <i>et al.</i> 2014]
Metal (Liga CoCr)	PSOLID	200.000 MPa	0,30	[Mizuno <i>et al.</i> 2016]
Dentina	PSOLID	18.600 MPa	0,35	[Nakamura <i>et al.</i> 2014]

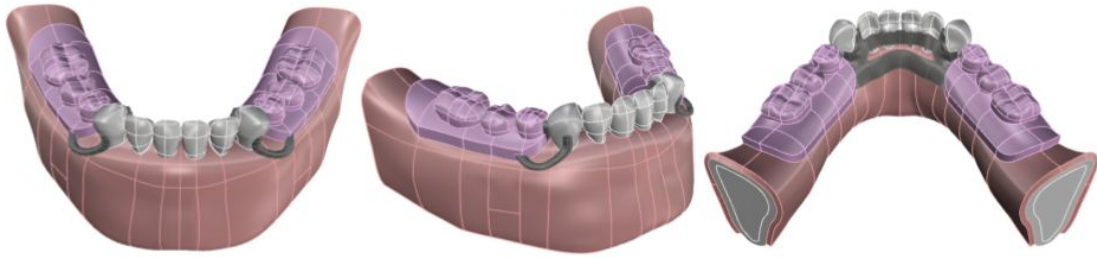
Feito isso, adicionou-se ao *solver* da análise - OptiStruct (Altair) - os parâmetros da simulação: *-core IN -i64slv -analysis -checkel NO -monitor -nt4 -optiskip*; e também os *outputs* esperados - deslocamento e tensão - e então a simulação foi realizada.

Assim que obtiveram-se os resultados da simulação, houve uma análise preliminar desses dados para diagnosticar previamente qualquer tipo de erro. Nesse momento, realizou-se uma análise de coerência dos mapas de deslocamento e conferência dos resultados de tensão, cujos valores não devem ser incoerentes, respectivamente, com relação às dimensões e ao módulo de elasticidade de cada componente.

### 3. Resultados e Discussões

Para cada etapa da metodologia, obteve-se um resultado. As geometrias virtuais em DAC modeladas (figura 8) representaram com sucesso a mandíbula de uma pessoa adulta saudável genérica e a prótese removível se aproximou bastante às reais.





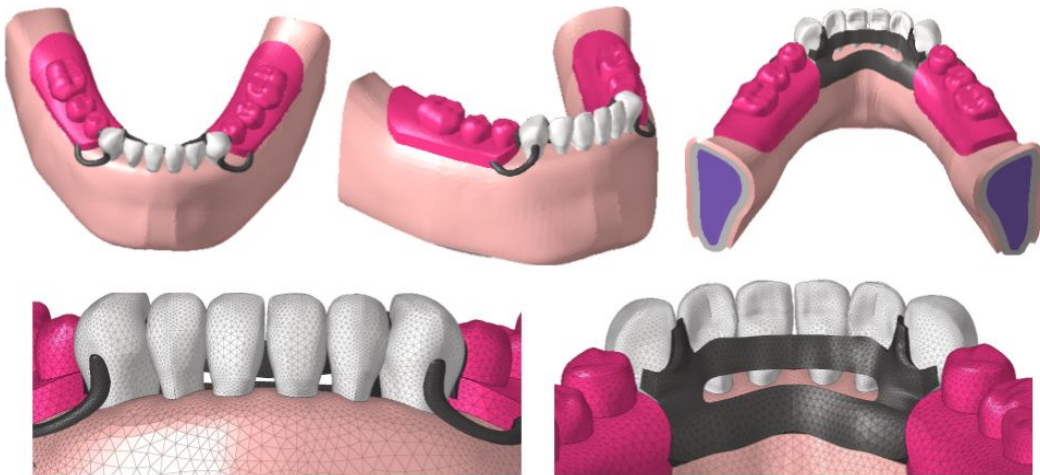
**Figura 8. Modelo virtual final (0,30 mm) em DAC. Fonte: autoral.**

Quanto aos elementos finitos, às malhas finais obtidas foram de elevada qualidade nos parâmetros descritos anteriormente. Isso contribui na precisão dos dados obtidos pela simulação computacional, visto que se tratam de métodos numéricos. Para os parâmetros verificados os índices de falha foram inferiores a 1% (tabela 2).

**Tabela 2. Quantidades de elementos e índices de falha. Fonte: autoral.**

Número médio de elementos	Número médio de nós	Falha no Jacobiano	Falha no <i>Volume Skew</i>	Falha no <i>aspect ratio</i>
~1.900.000	~400.000	0%	0,9%	1%

Enfim, os elementos das malhas modeladas apresentaram boa qualidade e foram otimizados em quantidade através das zonas de refinamento, tendo em vista o custo computacional (figura 9).



**Figura 9. Malha de elementos finitos da ponta calibradora de 0,30 mm. Fonte: autoral.**

Os resultados de deslocamento e tensão alcançados foram coerentes e representativos da realidade. Como a interpretação biológica de zonas de deslocamento, tração e compressão de cada componente não é escopo desse trabalho, essa análise não será realizada nesse artigo. Os mapas de deslocamento e distribuição de tensão estão nas figuras abaixo (figuras 10 e 11).

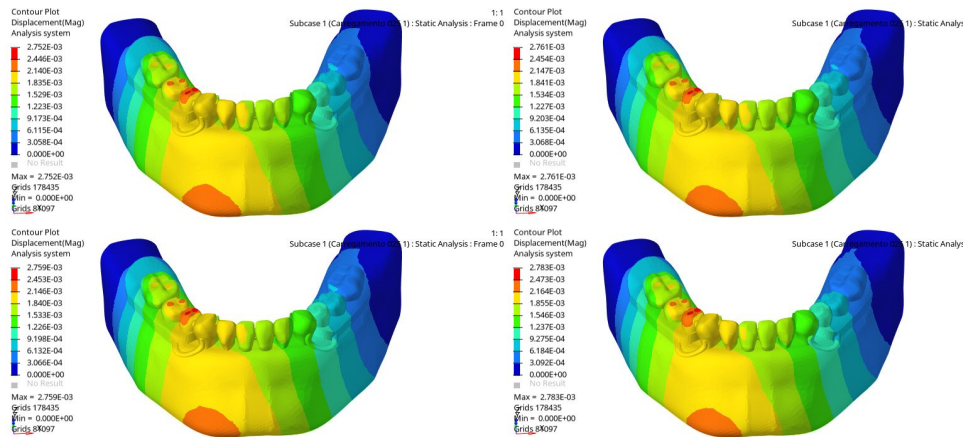


Figura 10. Mapa de deslocamento comparativo. Fonte: autoral.

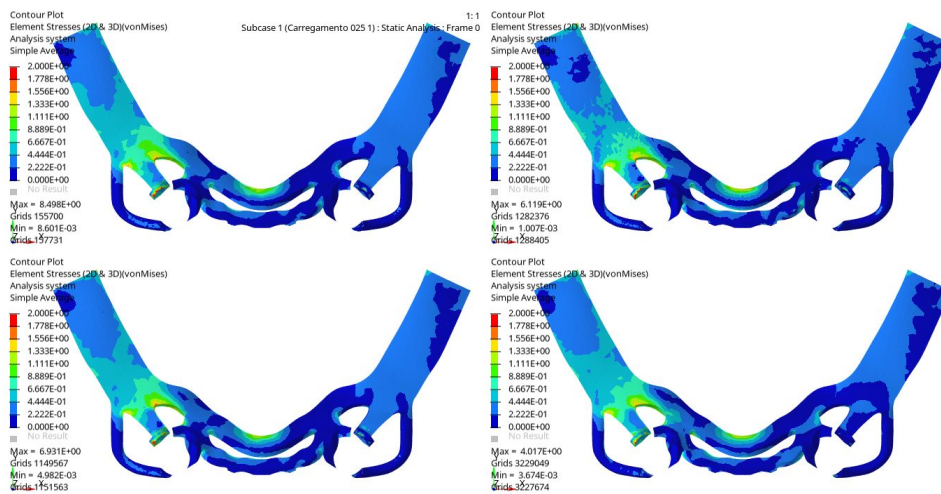


Figura 11. Mapa de distribuição de tensão de Von Mises do corpo metálico da prótese (comparativo). Fonte: autoral.

#### 4. Conclusão

Pelos resultados descritos, há mais uma vez a ratificação de que a aplicação de ferramentas da engenharia auxiliam em comparações qualitativas de pesquisas de biomedicina, em especial da odontologia. Além disso, se reforça a necessidade da interdisciplinaridade entre as áreas da saúde e exatas para o desenvolvimento de pesquisas, visto que cada área tem limitações que devem ser respeitadas para obter resultados representativos e relevantes.

Assim sendo, quanto mais as diversas áreas do conhecimento humano se associarem, maior será o desenvolvimento tecnológico e a validação de pesquisas, visto que obstáculos serão superados com maior facilidade e mais inovações serão criadas e estudadas.

#### 5. Agradecimentos

Agradeço ao professor orientador Pedro Y. Noritomi pelos ensinamentos, tanto da pesquisa quanto de experiências de vida, e também pelas oportunidades de trabalho e



crescimento pessoal, sempre confiando e investindo em seus orientados. Também sou grata a ele e ao restante dos colegas de pesquisa, em especial ao coorientador Leonardo M. R. Machado, pelas discussões de trabalho e por todos os momentos dentro e fora do laboratório, que contribuem para um ambiente de trabalho harmonioso e saudável.

Além disso, agradeço ao CTI Renato Archer, à comissão PIBIC e ao CNPq pela oportunidade de bolsa de Iniciação Científica e por toda infraestrutura disponibilizada, com elevada capacidade computacional, sem esses fatores, não seria possível a realização deste trabalho.

## 6. Referências

- Sardenberg, T. (1999) “A ética da pesquisa em seres humanos e a publicação de artigos científicos”. *Jornal de Pneumologia*, v. 25, n. 2, p. iii-iv.
- Antonio, A. M. (2004) “A bioengenharia no Brasil, século XX: Estado da arte”. Dissertação de mestrado, USP/São Carlos.
- Noritomi, P.Y. (2005) “Introdução ao Método dos Elementos Finitos para Aplicação em Bioengenharia”. Campinas. 30 slides. Documento Eletrônico.
- Oppermann, M. *et.al.* (2016) “Finite Elements as Tool for Mechanical Outputs in Lumbar Spine”. In: Thieme Revinter Publicações Ltda, Rio de Janeiro, Brazil.
- Kemmoku, D. T. *et al.* (2009) “Use of BioCAD in the development of a growth compliant prosthetic device for cranioplasty of growing patients”. In: *Innovative Developments in Design and Manufacturing*. CRC Press. p. 145-148.
- Burkhart, T.A. *et. al.* (2013) “Finite element modeling mesh quality, energy balance and validation methods: A review with recommendations associated with the modeling of bone tissue”. *Journal of biomechanics - Elsevier*.
- Nakamura, Y. *et al.* (2014) “A finite element evaluation of mechanical function for 3 distal extension partial dental prosthesis designs with a 3-dimensional nonlinear method for modeling soft tissue”. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. Volume 112, Issue 4. Pages 972-980.
- Mizuno, Y. *et al.* (2016) “Root fracture of abutment teeth for partial removable dental prostheses”. *The International Journal of Prosthodontics*, 29(5): 461-466.