

Aplicação de técnicas de bioengenharia no estudo do comportamento de implantes dentários

Ana L. L. de Souza¹, Jorge V. L.², Leonardo M. R. Machado²

{ana.souza;jorge.silva;leonardo.machado}@cti.gov.br

¹Faculdade de Engenharia Mecânica
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

² Laboratório Aberto de Impressão 3D – Laprint
CTI/MCTI Renato Archer – Campinas/SP

Abstract. *Researches on biomedicine face limitations studying the behavior of structures applied directly on human bodies. However, using drawing and simulation engineering softwares allows creating virtual models that simulate the real conditions of a patient, without the need of empiric evaluations in human beings. Thus, in this work, the Holographic Interferometry experiment combined with this methodology is used to evaluate the performance of dental implants in a research coordinated by a partner researcher from the Laboratório Aberto de Impressão 3D (Laprint) of the Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI). The study's objective is to validate the results of the analysis of the software through the physical experiment, obtaining the optimized geometry for the dissipation of forces.*

Resumo. *Pesquisas biomédicas lidam com limitações no estudo de comportamentos de estruturas aplicadas no corpo humano. No entanto, com o uso de softwares de desenho e simulação computacional da engenharia, é possível recriar virtualmente modelos que simulam as condições reais de um paciente, sem a necessidade de avaliações empíricas em seres humanos. Dessa forma, no seguinte trabalho, utiliza-se o experimento de Interferometria Holográfica aliado a essa metodologia para avaliar o comportamento de implantes dentários em uma pesquisa coordenada por uma pesquisadora parceira do Laboratório Aberto de Impressão 3D (Laprint) do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI). O objetivo do estudo é validar os resultados da análise do software por meio do experimento físico, obtendo a geometria otimizada para a dissipação de forças.*

1. Introdução

A área de ciências biomédicas é um setor em constante desenvolvimento. No entanto, estudos deste cunho esbarram em questões éticas e morais quando avalia-se a necessidade de ensaios empíricos em pacientes [1]. Assim, pesquisas interdisciplinares que compilam as áreas da biologia e da engenharia surgem como alternativa para a avaliação necessária dos resultados.

Com a bioengenharia é possível utilizar modelos virtuais e simulações computacionais para analisar sistemas anatômicos sem a necessidade de submeter um paciente a ensaios por vezes agressivos [2].

A primeira etapa do estudo de casos biomédicos é a modelagem da geometria, com o objetivo de fornecer uma análise verossímil da anatomia na simulação computacional. Nesse sentido, utiliza-se softwares de desenho computacional (CAD) em conjunto com o protocolo BioCAD, uma metodologia desenvolvida pela equipe do

Centro de Tecnologia de Informação Renato Archer para estudos com imagens médicas [3]. Em seguida, as simulações virtuais são efetuadas por meio do Método dos Elementos Finitos, que recria virtualmente as condições aplicadas no modelo real e resolve matematicamente cada segmento da geometria inserida no software de simulação (CAE) [4].

Nesse contexto, o seguinte projeto busca utilizar ferramentas de modelagem e simulação computacional para auxiliar no estudo do caso referente à pesquisa de tese de doutorado “Avaliação do comportamento mecânico e distribuição de forças em implantes dentários híbridos e curtos comparando diferentes designs. Análise por ensaios mecânicos e elementos finitos” que está sendo desenvolvida pela aluna Nicole Casalle, orientada pelo prof. Luís Geraldo Vaz na Universidade Estadual Paulista (UNESP) [5].

2. Materiais e Métodos

A tese desenvolvida pela aluna Nicole Casalle tem como objetivo comparar a resposta mecânica de dois grupos de implantes dentários, com o fim de analisar a dissipação de forças ao osso subjacente. Dessa forma, para efetuar a comparação dos resultados, faz-se uso de análises efetuadas pelo métodos dos elementos finitos, que serão corroboradas pelos dados obtidos no experimento de Interferometria Holográfica realizado na Universidade do Porto, em Portugal.

Dessa forma, o caso proposto inicia-se com o desenvolvimento de um modelo de geometria anatômico através do protocolo BioCAD, além dos modelos virtuais dos implantes e da coroa protética utilizando-se o software de modelagem *Rhinoceros 7*. Posteriormente, o software *HyperMesh 2021* foi utilizado para simulação computacional pelo método dos elementos finitos, onde foi aplicado as condições de contorno adequadas, como a força e as fixações do modelo durante o ensaio mecânico. Com os resultados obtidos a partir da simulação computacional, foi possível comparar esses dados com o experimento de Interferometria Holográfica, a fim de validar os resultados exibidos pelo MEF e reafirmar o comportamento esperado dos modelos.

2.1. Modelagem CAD

Nessa conjuntura, o projeto em questão apresentava uma anatomia composta por pilares representando os ossos cortical e trabecular, além de modelos do implante, parafuso, pilar cônico e coroa. A modelagem das estruturas foi efetuada seguindo os parâmetros pré-estabelecidos pela orientanda.

2.1.1 Modelo Virtual dos Implantes

Para os implantes, utilizou-se modelos recebidos da *Neodent* com simplificações para a aplicação desejada. Assim, tem-se dois grupos de implantes dentários divididos de acordo com suas plataformas, GM e HE. Dentro de cada grupo, os implantes são separados em 4 subgrupos de acordo com a alteração apical, sendo: A o grupo controle sem modificação apical; B com ápice bi-partido; C com ápice tripartido e D com ápice quadripartido. Nesse projeto, o modelo avaliado será do subgrupo A.

2.1.2 Modelo Virtual da Coroa

Para a modelagem da coroa dentária, utiliza-se uma geometria aproximada da estrutura dentária, para a modelagem de uma coroa protética experimental semelhante àquela utilizada no experimento.

2.2. Análise pelo Método dos Elementos Finitos

O software *HyperMesh 2021* trabalha com o Método dos Elementos Finitos (MEF). Nesse método, o modelo é dividido em um número finito de pequenas geometrias, que irão processar o problema de forma mais simplificada. Para essa análise, é importante avaliarmos dois parâmetros na criação da malha estrutural de elementos para o início da simulação: o formato do elemento, a quantidade de nós necessárias, e o tamanho deste. Quanto menores os elementos, mais fiel é a malha à geometria do modelo inicial.

Dessa forma, a etapa de análise no software de CAE inicia-se com a geração de uma malha estrutural 2D na geometria a ser analisada. Esta malha estrutural engloba a superfície dos corpos, dividindo-os em elementos que representam um domínio. Cada um desses domínios contribui para que o software compreenda o fenômeno físico que está ocorrendo naquele caso. Nesse contexto, foram utilizados elementos triangulares, com uma malha mais refinada, com mais elementos, nas regiões mais críticas do projeto, como a região de aplicação da força ou pontos curvos da anatomia.

No entanto, é importante avaliar que o software *HyperMesh 2021* não realiza simulações com malhas estruturais 2D, pois estas recobrem apenas a superfície do modelo. Assim, cria-se uma malha tridimensional, dividindo o volume da geometria em pequenos elementos, possibilitando a análise do projeto em escala real.

2.3. Definição dos materiais

Em seguida, é preciso fornecer os dados dos materiais utilizados para o software, para que a simulação possua os valores numéricos mais verídicos possíveis. Desse modo, é necessário definir os valores de duas características dos materiais: o módulo de elasticidade, módulo de Young, e o coeficiente de Poisson.

De forma geral, o módulo de Young mede a resistência do material à deformação elástica, definindo se ele é mais ou menos rígido. Neste caso, se o material deforma elasticamente, a deformação não é definitiva e o material pode voltar à configuração original. Se a carga for maior que um determinado limite, o corpo sofre deformação plástica e não é possível reverter para a forma original. Se a carga aplicada no material continuar crescente, é possível a fratura.

No entanto, a análise do módulo de elasticidade apenas considera a elongação na direção da aplicação do esforço. Porém, ao esticar o material, este também apresenta uma deformação na direção perpendicular à aplicação do esforço. Nesse sentido, o coeficiente de Poisson representa a razão entre o valor de deformação nas duas direções, transversal e longitudinal.

Para este projeto, foram utilizados os valores fornecidos pela orientadora Nicole Casalle no plano de trabalho. Na tabela 1, é possível ver as características de cada material. Uma vez que o experimento de Interferometria Holográfica não será realizado

em modelos humanos, o nylon substitui as características biológicas dos ossos cortical e medular.

Tabela 1: Valores das características mecânicas dos materiais utilizados

Material	Módulo de Young [GPa]	Coefficiente de Poisson
Nylon (Osso cortical)	1.95	0.3
Nylon (Osso medular)	0.15	0.3
Titânio	110	0.35
Liga Cromo-Cobalto	218	0.33

2.4. Condições de contorno do problema

Assim que as propriedades mecânicas dos materiais foram fornecidas ao software, é necessário definir as condições sob as quais o modelo é submetido no ensaio mecânico, para que assim, o software seja capaz de replicar essas condições na análise.

2.3.1. Aplicação da carga

A aplicação de carga será realizada em uma pequena região da estrutura protética experimental. Conforme é possível perceber na figura 1, foi utilizada uma carga oblíqua de 100N, a 30°.

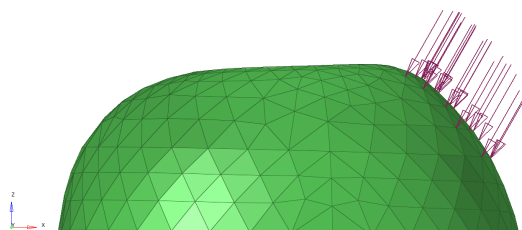


Figura 2: Detalhe da aplicação da carga oblíqua de 100 N a 30°.

2.3.2. Fixação do osso cortical

A fixação do conjunto ocorre na base do cortical, como observado na figura 3. Diante disso, como as superfícies são engastadas, isto significa que esta região não tem graus de liberdade, seja de translação ou de rotação, ou seja, elas não deslocam nem giram.

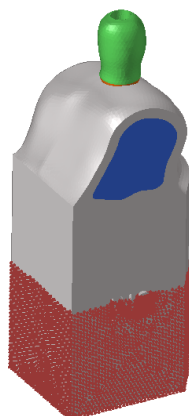


Figura 3. Fixação do modelo.

3. Resultados da simulação

3.1. Deslocamento dos modelos HE e GM

Na análise de deslocamento, é imprescindível compreender o sistema cartesiano de coordenadas que está sendo utilizado. Nas figuras apresentadas nesta seção, é apresentado o sistema OXYZ, em que o eixo Y está representado pela cor verde, o eixo X pela cor vermelha e o eixo Z, por fim, pela cor azul.

Além do sistema de coordenadas, é importante compreender a escala de cores utilizadas. As regiões em azul são aquelas que apresentam menor valor, enquanto as em vermelho são as que apresentam maior valor.

Na figura 4, é possível observar a distribuição dos deslocamentos nos modelos avaliados. Como esperado, o maior deslocamento acontece na região de aplicação da carga, na parte superior da estrutura protética de cromo-cobalto. O deslocamento mínimo, por sua vez, é zero, uma vez que a região inferior do cortical está engastada e, por isso, não possui liberdade de translação ou de rotação. Além disso, pode-se notar que os modelos apresentam um comportamento similar quanto a distribuição dos deslocamentos.

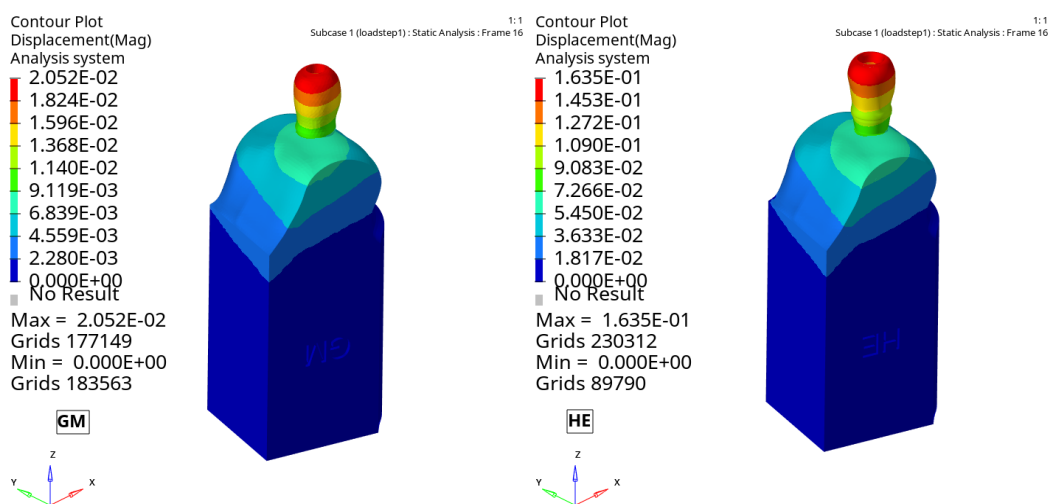


Figura 4: Deslocamento total dos modelos.

3.2. Tensão do modelo HE

Para avaliar o conjunto metálico do modelo HE, utiliza-se o critério de tensão de Von Mises. Novamente, a escala de cores varia do azul ao vermelho. Na figura 5, nota-se que no modelo HE, a região com maior distribuição de tensões é a rosca do implante. Também pode-se observar uma concentração de tensões na região de aplicação da força, conforme o esperado.

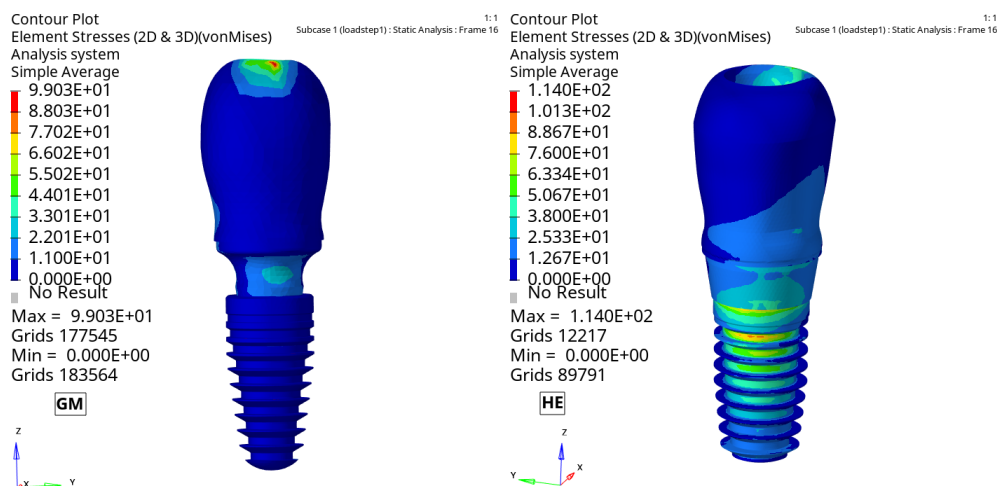


Figura 5: Análise do conjunto implante, pilar e coroa nos modelos HE e GM segundo o critério de Von Mises.

De maneira análoga, no modelo GM a maior distribuição de tensões dá-se na região de aplicação da carga. Na região do pilar, também nota-se uma concentração de tensões na lateral da estrutura, o que é coerente com o comportamento do deslocamento do pilar e a direção de aplicação da força.

4. Comparação entre MEF e o experimento de Interferometria Holográfica

4.1. Correlação Digital de Imagem (DIC)

Após as simulações, foram realizados ensaios mecânicos por meio do experimento de Interferometria Holográfica para mapear os campos de deslocamento do conjunto. Os ensaios usam a correlação digital de imagem (DIC), uma técnica sem contato usada na medição da deformação de um material. Assim, a partir de imagens capturadas antes e depois da aplicação da carga e subsequente deformação, pode-se construir um mapa de deslocamentos da estrutura, rastreando o grupos de pixels da imagem da superfície. Uma vantagem da DIC é a característica não destrutiva dessa técnica, que proporciona o levantamento dos dados sem causar danos à estrutura estudada.

Desse modo, considerando o processamento das imagens, foi realizada uma comparação entre o campo de deslocamento obtido para os modelos e os deslocamentos máximo e mínimo obtidos na simulação computacional pelo software HyperMesh.

4.1.1. Comparação para modelo HE

O modelo de implante HE foi dividido em alguns subgrupos, os quais levam em consideração a alteração apical. Para o estudo proposto, avalia-se o subgrupo de índice A, que representa o modelo padrão, sem alterações no ápice.

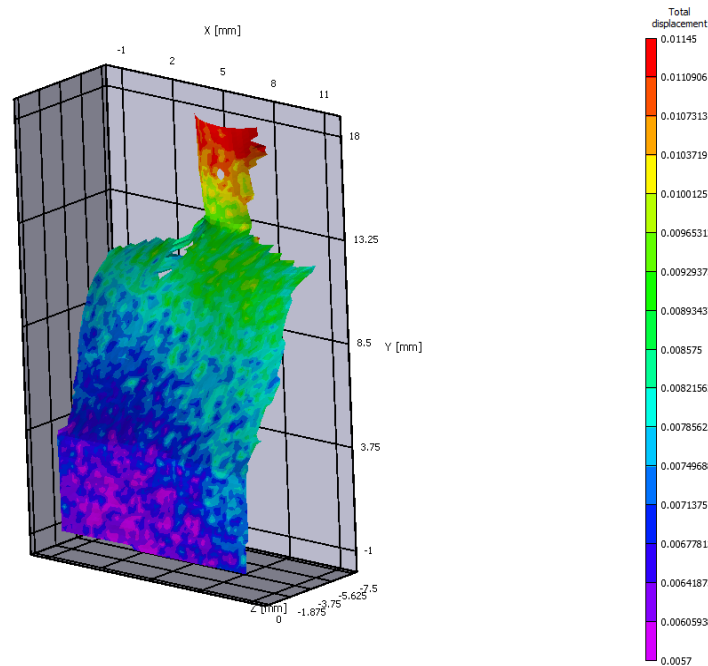


Figura 6: Campo de deslocamento total no modelo HE, subgrupo A1, carga aplicada de 1,21 kg.

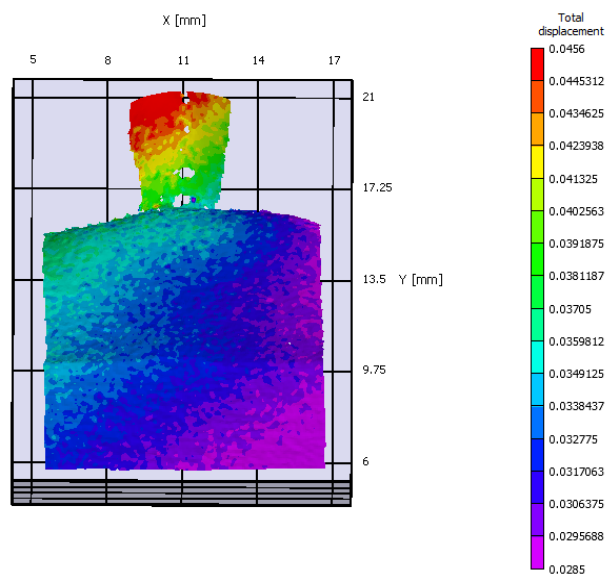


Figura 7: Campo de deslocamento total no modelo HE, subgrupo A1, carga aplicada de 2,41 kg.

Nota-se que os resultados máximos e mínimos dos deslocamentos apresentam variações para cada uma das cargas. Dessa forma, analisando as amplitudes e

estabelecendo uma relação entre as medidas, obtém-se os seguintes valores para o modelo HE.

Tabela 2: Relações obtidas para o modelo HE

Carga aplicada	Amplitude	Relação entre cargas	Razão
100 N	0,1628	100 N:1,21 kg	28,3
1,21 kg	0,0058	100 N:2,41 kg	9,5
2,41 kg	0,0171	2,41 kg:1,21 kg	3,0

Observa-se que a razão 100N:1,21 kg relaciona-se com a proporção 100N:2,41 kg por um valor aproximadamente igual à relação das cargas 2,41 kg:1,21 kg. Desse modo, pode-se inferir que a razão entre as diferenças das cargas é proporcional à diferença de intensidade entre elas. Esse resultado demonstra que os deslocamentos obtidos no experimento e na simulação computacional comportam-se linearmente, de modo que é possível afirmar que o modelo deforma elasticamente. Assim, com a aplicação de diferentes carregamentos, obtemos deslocamentos proporcionais, como é observado na tabela 1.

Logo, pode-se afirmar que os resultados obtidos pelo MEF e pelo Experimento experimento de Interferometria relacionam-se entre si e representam o comportamento esperado do modelo.

4.1.1. Comparação para modelo GM

De maneira análoga ao modelo HE, prossegue-se com a análise do campo de deslocamentos no modelo GM, subgrupo A1. As figuras 8 e 9 exibem os deslocamentos para a carga de 1,21 kg e 2,41 kg.

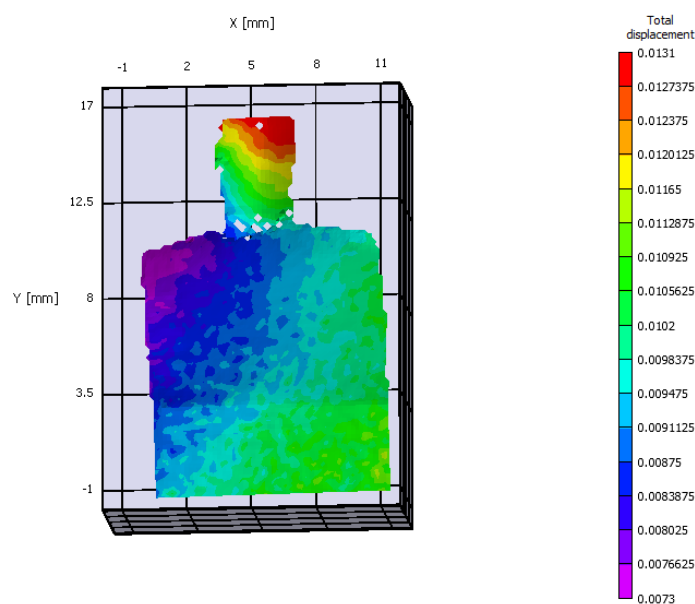


Figura 8. Campo de deslocamento total no modelo GM, subgrupo A1.

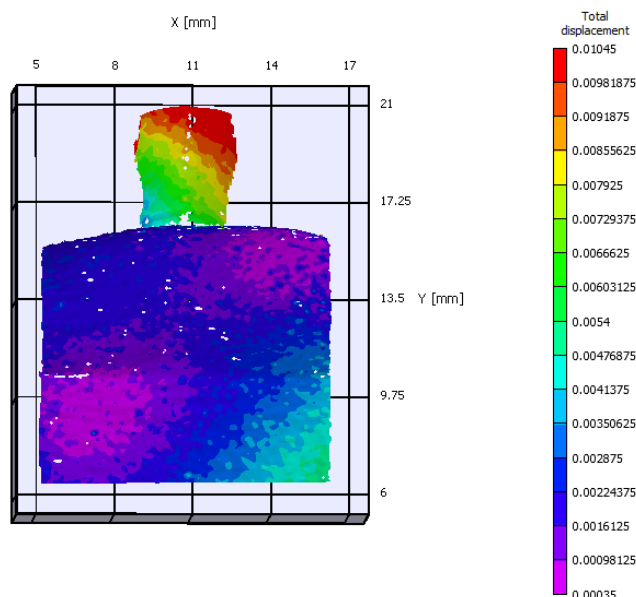


Figura 9. Campo de deslocamento total no modelo GM, subgrupo A1.

Na tabela abaixo, apresenta-se as relações para o modelo GM. Novamente, as proporções das cargas relacionam-se entre si, de forma que pode-se concluir que semelhantemente ao modelo HE, o modelo GM deforma plasticamente. Ainda, os dados obtidos pelo experimento e pelo MEF apontam para o mesmo comportamento do modelo, de modo que a análise computacional novamente é válida.

Tabela 3: Relações obtidas para o modelo GM

Carga aplicada	Amplitude	Relação entre cargas	Razão
100 N	0.0202	100 N:1,21 kg	3.5
1,21 kg	0.0058	100 N:2,41 kg	2.0
2,41 kg	0.0101	2,41 kg:1,21 kg	1.7

5. Conclusões

Os modelos apresentados neste trabalho seguem as condições de linearidade impostos pelo comportamento do material, de modo que pode-se notar uma relação proporcional na amplitude das deformações na simulação computacional e no experimento de Interferometria Holográfica. Com essas informações, também pode-se concluir que o conjunto implante-coroa não fratura durante os ensaios, uma vez que o modelo sofre apenas deformações elásticas, ou seja, reversíveis.

Ademais, comparando os resultados obtidos pelo Métodos dos Elementos Finitos e pela Correlação Digital de Imagem, é possível estabelecer parâmetros proporcionais entre os modelos, de modo que os dados relacionam-se entre si e apresentam o comportamento que era esperado dos implantes. Dessa forma, valida-se o MEF como forma de análise do caso proposto pela tese de doutorado e é possível

prosseguir com a avaliação do comportamento dos implantes híbridos utilizando os resultados de deslocamento e distribuição de tensão obtidos pela simulação computacional.

6. Agradecimentos

Agradeço ao professor orientador Jorge e ao coorientador Leonardo pela disponibilidade de ensinar conhecimentos técnicos de engenharia com aplicação no setor de bioengenharia. Também agradeço pelo ambiente leve criado no laboratório, essencial para a produtividade dos trabalhos.

Agradeço também à gestão ao CTI e ao CNPq pela oportunidade de participar da bolsa de Iniciação Científica. Também agradeço pela atenção no atendimento, disponibilidade de infraestrutura e por todo conhecimento adquirido ao longo do período de bolsa. Ainda, agradeço pelo trabalho e recursos investidos no desenvolvimento da ciência no país, que incentiva cada vez mais jovens na busca por uma carreira científica.

7. Referências

- [1] 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.
- [2] Zhang, M.; Gong, H. (2019) ”Translation of engineering to medicine: A focus on finite element analysis”. *Journal of Orthopaedic Translation*, v.20, p. 1-2.
- [3] Miziara, T., Machado, L. M. R., Niritomi, P. Y. “Estudo e Desenvolvimento de Modelos BioCAD aplicando Elementos Finitos. XXI Jornada de Iniciação Científica do CTI Renato Archer – JICC 2020, 2020.
- [4] Noritomi, P.Y. (2005) “Introdução ao Método dos Elementos Finitos para Aplicação em Bioengenharia”. Campinas. 30 slides. Documento Eletrônico.
- [5] Casalle, N. (2022) “Avaliação do comportamento mecânico e distribuição de forças em implantes dentários híbridos e curtos comparando diferentes designs. Análise por ensaios mecânicos e elementos finito”. Dissertação de mestrado, Unesp/Araraquara.