

Pré-carga em biomodelos: Desenvolvimento de protocolo para aplicação em elementos finitos

**Pedro Henrique Martins Lopes Silva¹, Leonardo Mendes Machado Ribeiro²,
Marcelo Fernandes de Oliveira²**

{pasilva, lmachado, mfolivei}@cti.gov.br

**¹Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM)
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) – Campinas/SP**

**²Divisão de Tecnologias para Produção e Saúde - DITPS
CTI/MCTI Renato Archer – Campinas/SP**

Abstract. *The use of finite element analysis in various fields has been growing remarkably in recent years. In particular, dentistry has embraced it as a significant tool for materials and methods analysis, especially in implantology for studying prostheses and implants. As the forces applied during the assembly process are crucial for the proper functioning of the implant complex, which represents a screw-fastened union of multiple components, it is essential to study the preloads present in this complex. Thus, the objective of this work is to study the types of preload application in the Hypermesh® software and develop an optimized protocol for applying this boundary condition in bioengineering models.*

Resumo. *O uso da análise de elementos finitos em diversas áreas vem crescendo notavelmente nos últimos anos. Em especial, a odontologia a tomou como uma importante ferramenta na análise de materiais e métodos, como a implantodontia no estudo de próteses e implantes. Assim, como as forças aplicadas no processo de montagem são essenciais para o funcionamento do complexo de implantes e como este representa a união parafusada de vários componentes, é fundamental estudar as pré-cargas presentes neste complexo. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é estudar os tipos de aplicação de pré-carga no software Hypermesh ® e desenvolver um protocolo otimizado de aplicação desta condição de contorno em modelos de bioengenharia.*

Palavras-chave: *Elementos finitos, pré-carga, Hypermesh, simulação computacional, bioengenharia, implantodontia.*

1. Introdução

Por muitas vezes, na prática de problemas reais de engenharia, as estruturas e corpos são muito complexos para serem analisados pelas técnicas clássicas, uma vez que não atendem às hipóteses simplificadoras e às considerações físicas necessárias para a utilização dos métodos analíticos clássicos, como a teoria de vigas e a teoria da elasticidade - que fornecem respostas exatas das tensões e deformações dos infinitos pontos que compõem os corpos [1].

Dessa forma, mostra-se adequado e necessário o desenvolvimento de métodos que possam aproximar o comportamento mecânico exato dos corpos. Nesse sentido, um caminho natural é a discretização da estrutura, isto é, a subdivisão do corpo em pequenos componentes finitos, cujo comportamento pode ser analisado e entendido - assim, em vez de serem considerados os infinitos pontos constituintes da matéria, é considerada uma quantidade finita de elementos contínuos interligados por finitos pontos que, em quantidade suficiente, aproximam o comportamento geral das estruturas [2]. Este procedimento define o método dos elementos finitos (MEF).

No entanto, apesar de o procedimento do MEF permitir a resolução de problemas de estruturas complexas, a solução depende de grandes quantidades de cálculos matemáticos simultâneos, o que dificulta ou até mesmo impossibilita a resolução manual destes pelos seres humanos. Assim, o verdadeiro início da análise por elementos finitos (AEF) se deu quando os computadores digitais apareceram para substituir os analógicos nos anos 60 ao apresentarem a capacidade de realizar milhares de operações por segundo [3]. Deste modo, com o desenvolvimento dos computadores e com a evolução da capacidade de processamento destes até os dias atuais, tornou-se possível desenvolver softwares de simulações computacionais - que são reproduções de situações ou processos do mundo real a partir de modelos matemáticos operados em um ambiente computacional [4] - as quais, quando bem configuradas, utilizam o MEF para trazer aproximações cada vez mais acuradas, fornecendo, assim, informações úteis e confiáveis.

Nesse sentido, a utilização da AEF através de simulações computacionais se mostra amplamente difundida, podendo ser encontrada nas indústrias aeronáutica, automotiva, civil, naval, nuclear, bem como em aplicações de mecânica dos fluidos e transferência de calor [5]. Além disso, é importante destacar que, atualmente, a AEF tem sido extensivamente utilizada em problemas de bioengenharia, uma vez que é de grande importância e utilidade estudar, por exemplo, os estados de tensão e deformação e o comportamento mecânico de tecidos - como o da aorta para o tratamento de aneurisma da aorta abdominal -, de implantes, que podem ser utilizados no tratamento de aterosclerose - no caso de stents - e até mesmo na substituição completa de estruturas biológicas comprometidas para recuperar suas funções, entre outros [6]. Em especial, a Odontologia tem tomado a AEF como uma importante ferramenta de pesquisa para entender o comportamento de vários materiais e técnicas, sendo aplicada em todas suas áreas, sobretudo na implantodontia [7].

Todavia, para que a AEF possa ser utilizada em problemas de qualquer área citada anteriormente, é fundamental que sejam fornecidas ao software utilizado as condições de contorno do determinado problema. Uma condição de contorno se refere à

aplicação de forças e restrições sobre os corpos - que podem ser exercidas de diferentes formas, como forças concentradas, forças distribuídas, torques, pressões e restringimentos de graus de liberdade [8]. Em especial, pode-se citar uma importante condição de contorno para componentes mecânicos e biomecânicos, uma vez que parafusos são encontrados em diversas aplicações - a pré-carga.

A pré-carga se refere à definição de um valor de torque sobre parafusos roscados para apertar e fixar as juntas. Este torque causa uma força interna no parafuso, que determina um estado de tensão anterior aos principais carregamentos sob os quais os componentes estarão sujeitos [9]. Em geral, parafusos pré-tensionados são utilizados quando é necessário que uma conexão carregada axialmente não deslize quando forças forem aplicadas [10]. E, em especial, este é o caso de implantes dentários, uma vez que o complexo de implantes se trata de um conjunto de múltiplos componentes que formam uma união mecânica parafusada e, portanto, as forças aplicadas no processo de montagem são essenciais para a manutenção da capacidade de funcionamento do sistema de implante antes de apoiar uma prótese dentária [11].

Dessa maneira, sendo de grande importância e utilidade estudar o comportamento mecânico de próteses e implantes dentários em softwares de análise de elementos finitos, torna-se fundamental estudar as formas mais eficientes e práticas de se aplicar a pré-carga nestes.

Portanto, o objetivo deste projeto é estudar os tipos de pré-carga disponíveis no software *Hypermesh*[®], desenvolvendo e determinando um protocolo otimizado de aplicação de pré-carga para problemas e casos reais de bioengenharia e, mais especificamente, de implantodontia.

2. Metodologia

Para o desenvolvimento do projeto, foi realizada, inicialmente, a modelagem computacional de um componente mecânico no software *Rhinoceros*[®], com o objetivo de ser um modelo introdutório à aplicação de pré-carga, consistindo de um fixador em “U” com 14mm de comprimento por 20mm de altura e 15mm de largura, além de um furo passante para fixação de um parafuso sextavado de 4mm de diâmetro, preso por uma porca. O formato do fixador e a existência de apenas um parafuso foram adequados para o estudo da aplicação da ferramenta de pré-carga, uma vez que foi necessário aplicá-la apenas uma vez e o comportamento do fixador já era previsto - redução da abertura de “U” -, de modo que a análise do funcionamento da ferramenta foi facilitada. A figura 1 ilustra o modelo preliminar desenvolvido.

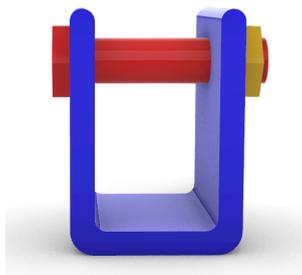


Figura 1 - Imagem do modelo preliminar

Os métodos de configuração da simulação e geração de malhas a seguir foram baseados nos treinamentos da *Altair*[®] e nos protocolos do laboratório LPrint do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer.

2.1. Configurações da simulação

Com o modelo exportado no formato STEP para o software *Hypermesh*[®], foi possível determinar as configurações da simulação. O modelo de simulação estudado foi a linear estática não transiente.

Em primeiro lugar, foram criados e definidos os materiais dos componentes. Para isso, foram necessárias três propriedades fundamentais - o módulo de elasticidade, a densidade e o coeficiente de Poisson. Foram configurados o aço e o alumínio e foram criadas propriedades para armazená-los. Para o fixador, foi atribuída a propriedade com alumínio e, tanto para o parafuso quanto para a porca, a propriedade com aço.

	Módulo de elasticidade (GPa)	Densidade (g/cm ³)	Coeficiente de Poisson
Aço	210	7.85	0.3
Alumínio	68	2.70	0.3

Tabela 1 - Propriedades dos materiais

Neste modelo, foi considerado que o fixador possuía uma face engastada, isto é, uma face que permaneceria completamente estática mediante a aplicação de carga. Esta foi selecionada como sendo esta a face externa do fixador na qual não há passagem do parafuso.

Por fim, foi criado um “*load step*”, no qual foi selecionado o tipo de simulação a ser executada - linear estática - e em que foram selecionados os resultados desejados, como estado de tensão, estado de deformação e deslocamento.

2.2. Pré-carga em parafuso unidimensional

Feitas as configurações gerais, pôde-se partir para os casos de aplicação de pré-carga no conjunto. Nesse sentido, foi desenvolvida, primeiramente, a aplicação unidimensional dessa condição de contorno.

Primeiramente, foram criados nós nos vértices das extremidades hexagonais do parafuso e da porca. Com estes nós, foram criadas linhas auxiliares que permitiram a separação das superfícies planas do fixador em duas partes: as que não estão em contato com os sextavados e as que estão em contato com eles.

Isto feito, para a aplicação da pré-carga 1D, os modelos tridimensionais do parafuso e da porca não são necessários, de modo que podem ser ocultos ou até mesmo excluídos, pois, posteriormente, são substituídos por elementos unidimensionais nos quais é aplicada a pré-carga. Dessa forma, a única malha a ser construída é aquela do

fixador. Com isso, inicialmente, foi elaborada a malha 2D do componente a partir da utilização da ferramenta “*surface deviation*”. Como parâmetro de construção da malha, foi necessário atribuir o tamanho desejado dos elementos e o tipo destes elementos. Nas superfícies curvas do fixador e nas superfícies hexagonais que estão em contato com os sextavados, foi selecionado um tamanho de elemento menor, de 0.4, a fim de obter um melhor detalhamento e refinamento nessas regiões fundamentais. No restante das superfícies, foi utilizado um tamanho de elemento maior, de 1. Em todas as superfícies, o tipo de elemento selecionado foi triangular. A figura 2 esclarece o formato e o tamanho dos elementos da malha do fixador.

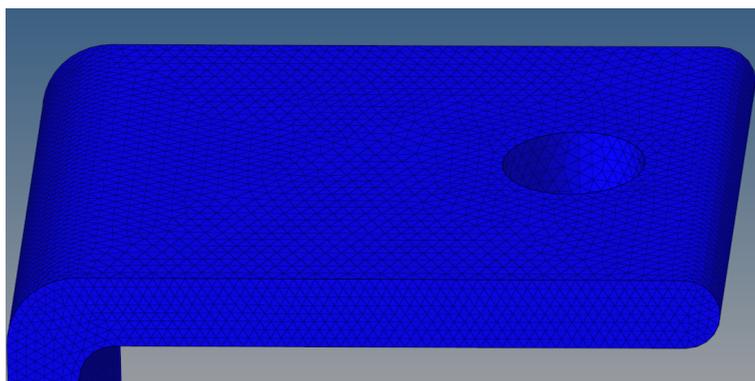


Figura 2 - Malha do fixador

Utilizando a ferramenta “*Tetramesh*”, foi gerada a malha tridimensional utilizando, como referência, os elementos bidimensionais previamente criados. Com a malha 3D pronta, pôde-se excluir a malha 2D.

Para simular a aplicação da pré-carga, foram criados, então, os elementos unidimensionais citados anteriormente que substituem a porca e o parafuso. Primeiramente, foram criados elementos “*rigids*” para representar a conexão rígida da cabeça do parafuso e da porca com o fixador. Utilizando a configuração “*multiple nodes*”, foram selecionados todos os nós encontrados nas regiões de contato, definidos como dependentes. Em seguida, utilizando a opção “*calculate node*”, foi gerado um único nó independente a partir dos nós selecionados previamente, finalizando a caracterização das regiões de contato. A separação prévia dessas superfícies foi fundamental para selecionar os nós corretamente, garantindo que fossem criados precisamente nas linhas dos hexágonos, permitindo uma seleção precisa da região de contato. Em seguida, foi criado o elemento “*cbeam*”, que é caracterizado a partir dos nós independentes para representar o corpo do parafuso. Foi criada uma “*beam section*” circular com o mesmo diâmetro do parafuso no *HyperBeam View*[®], definindo a seção transversal do corpo do parafuso.

Feito isso, foi utilizada a ferramenta “*pretension manager*” para adicionar a pré-carga ao elemento unidimensional. Na ferramenta, foi selecionado o tipo de carregamento como força, aplicando uma magnitude de 50N. Além disso, foi criado um vetor paralelo ao eixo do parafuso para direcionar a aplicação da pré-carga.

Enfim, a pré-carga foi adicionada ao “*load step*” como condição de contorno, completando a configuração da simulação.

Tipo	Quantidade	Ordem
Tetraédrico (de malha)	139671	Primeira
Rigid	2	Primeira
Cbeam	1	Primeira

Tabela 2 - Elementos para pré-carga 1D

2.2. Pré-carga em parafuso tridimensional

Por outro lado, para a aplicação da pré-carga 3D, é necessário utilizar os modelos tridimensionais da porca e do parafuso, de modo que foi preciso, portanto, construir as malhas de ambos.

Para a porca, foi utilizada somente a ferramenta “*surface deviation*”, com tamanho de elemento 0.4 de tipo triangular. Já para o parafuso, antes de desenvolver a malha, foi necessário construir uma superfície plana equivalente à seção transversal do parafuso na altura do ponto médio de seu corpo. Isto foi feito criando dois nós diametralmente opostos na determinada altura do corpo do parafuso com os quais foi possível separar as superfícies laterais, gerando duas linhas. A partir destas linhas, pôde-se criar a superfície circular equivalente à seção transversal, ilustrada na figura 3.

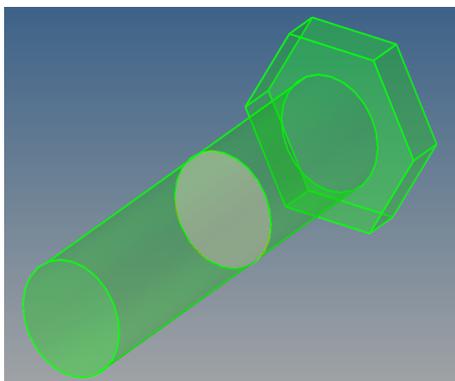


Figura 3 - Imagem da seção transversal criada

Com isso, foi criada a malha 2D da parte superior do parafuso, a partir da nova superfície criada. No entanto, o *software* considera livres as extremidades da superfície circular, de modo que a malha não é fechada. Foi necessário utilizar a ferramenta “*find edges*” para determinar todas as extremidades livres e, em seguida, foi utilizada a ferramenta “*equivalence*”, conectando os nós corretamente e fechando a malha. Em seguida, foi criada a malha 2D da parte inferior do parafuso. A figura 4 elucida esse processo, mostrando, à esquerda, a malha da parte superior do parafuso - que foi criada primeiro - e, à direita, a malha do parafuso como um todo.

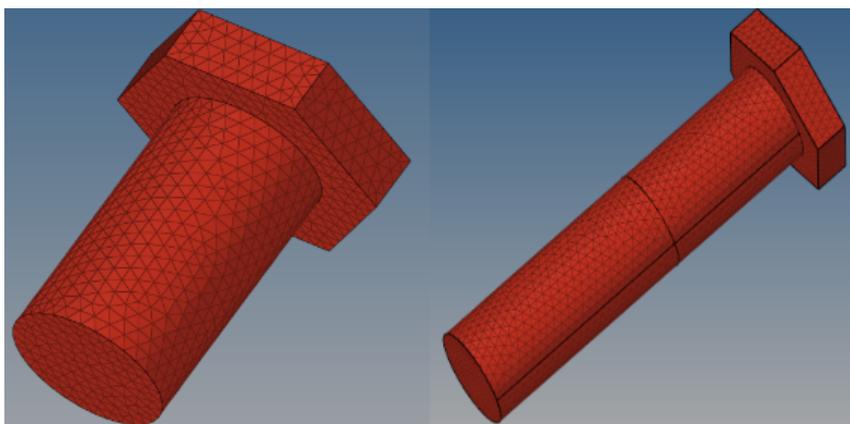


Figura 4 - Malha da parte superior e malha completa

Da mesma forma que descrito no caso anterior, após a criação da malha tridimensional pela ferramenta “*tetramesh*”, a malha bidimensional foi excluída.

Dessa forma, foi necessário configurar os contatos entre os elementos de cada componente. Para isso, foi acessada a aba “*contact browser*”. Em sequência, foram selecionados os três componentes e foi utilizada a ferramenta “*AutoContact*”, com uma tolerância de proximidade de 1 e de tipo “*slide*”.

Configurados os contatos, pôde-se partir para a aplicação da pré-carga tridimensional pela ferramenta “*pretension manager*”. Foram utilizadas as mesmas configurações da pré-carga unidimensional, com diferença que, neste caso, a pré-carga não foi aplicada a um elemento unidimensional, mas sim, no conjunto de elementos que formam a superfície plana transversal ao corpo do parafuso, que foi definida no início desta seção. Isto feito, a pré-carga foi adicionada ao “*load step*” como condição de contorno, concluindo as configurações para a execução da simulação.

Tipo	Quantidade	Ordem
Tetraédrico (de malha)	170698	Primeira

Tabela 3 - Elementos para pré-carga 3D

3. Resultados

Empregando a metodologia descrita acima, as simulações de aplicação de pré-carga puderam ser executadas devidamente. Para o primeiro caso, isto é, naquele em que foi utilizado um parafuso unidimensional, os resultados obtidos foram precisamente os esperados. Os maiores deslocamentos ocorreram nas extremidades do fixador no sentido de reduzir a abertura de “U”, reduzindo sua magnitude até chegar a zero na região engastada. Também, pôde-se observar um padrão simétrico de deslocamentos em relação ao eixo de simetria da geometria do fixador, o que era pensado dado à existente simetria do carregamento em relação a esse eixo e da própria geometria em si. Já para as deformações e tensões, pôde-se observar uma concentração de tensão nas regiões curvas

da base do fixador e em regiões que representam o contato dos sextavados com o fixador - havendo, portanto, maiores deformações nestes locais -, o que se mostra coerente dado a geometria e o carregamento aplicado. A figura 5 explicita os resultados de tensão e deslocamento do fixador para a pré-carga unidimensional.

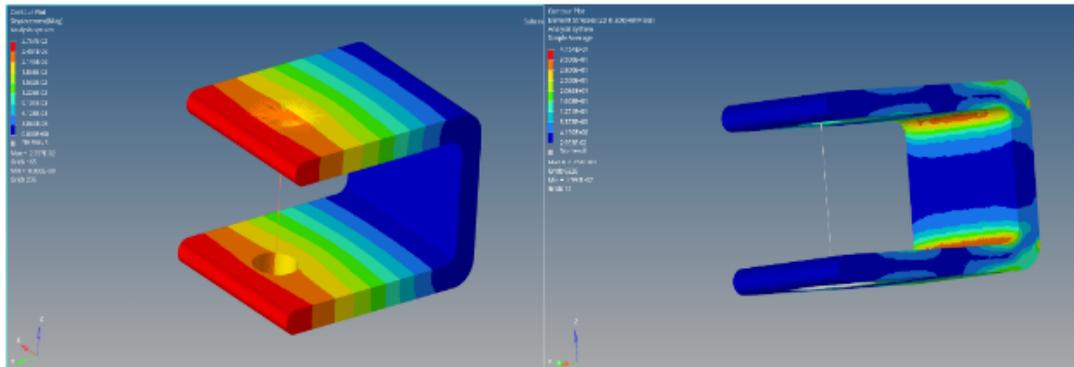


Figura 5 - Resultados de deslocamento e tensão da pré-carga 1D

Já para o caso de aplicação de pré-carga em parafuso tridimensional, o comportamento mecânico do fixador foi semelhante, com os maiores deslocamentos nas extremidades e acúmulo de tensões nas mesmas regiões citadas anteriormente. No entanto, o padrão simétrico de deslocamentos não foi mais observado. Por outro lado, no parafuso, houve um encurtamento de seu comprimento, em que, a partir da superfície em que foi aplicada a pré-carga, a metade de baixo do corpo do parafuso atravessou a metade de cima e vice-versa. Assim, considerou-se que a aplicação desta pré-carga foi apropriada para simular o comportamento mecânico do fixador, da porca e dos contatos entre eles, no entanto, ela não é efetiva para a análise dos estados de tensão e deformação do parafuso. A figura 6 explana os resultados de deslocamento e tensão para essa aplicação de pré-carga.

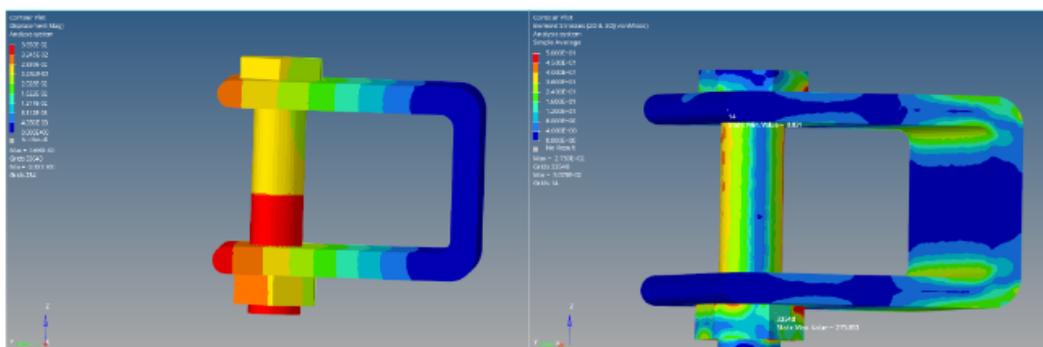


Figura 6 - Resultados de deslocamento e tensão da pré-carga 3D

Desta forma, a partir dos resultados obtidos e da análise realizada, foi desenvolvido um protocolo para uma aplicação mais favorável e adequada da pré-carga, já passível de ser utilizado em biomodelos.

Neste sentido, o protocolo é baseado em um método misto. Em primeiro lugar, os parafusos sujeitos à aplicação de pré-carga devem, previamente em software de

modelagem - como o *Rhinoceros*[®] -, ser separados em três regiões: a cabeça do parafuso, o pescoço do parafuso e a rosca. Isto feito, já no software *Hypermesh*[®] , são criadas superfícies planas transversais a partir das linhas de separação entre as superfícies. Com isso, podem ser geradas as malhas 2D da cabeça do parafuso e da região roscada, utilizando as ferramentas “*find edges*” e “*equivalence*” para conectar os nós, fechando a malha. Assim, é permitida a criação da malha 3D destas e a exclusão das malhas 2D. Por sua vez, em vez do pescoço do parafuso possuir uma malha, esta é substituída pelos elementos unidimensionais “*rigids*” e “*cbeam*”, conectando as superfícies da cabeça do parafuso com a rosca e recebendo a aplicação da pré-carga. Dessa forma, os contatos dos parafusos com demais componentes - fundamentais para representação do comportamento mecânico - são mantidos. Além disso, há uma economia de elementos, dado que os pescoços dos parafusos não possuem malha, e, também, o aproveitamento do bom desempenho e da praticidade da aplicação de pré-carga 1D.

Este protocolo foi utilizado em um biomodelo de prótese dentária total com fixação “*all-on-four*”, sendo aplicada uma pré-carga de 138.9N em quatro implantes: dois do tipo hexágono externo e dois do tipo cone morse. Além da pré-carga, a simulação também contava com a aplicação de uma força oblíqua, que representava um esforço crítico de mordida e ranger de dentes de forma unilateral na arcada dentária. Ao final, os resultados obtidos foram coerentes em relação ao esperado, sendo expostos na figura 7, a seguir.

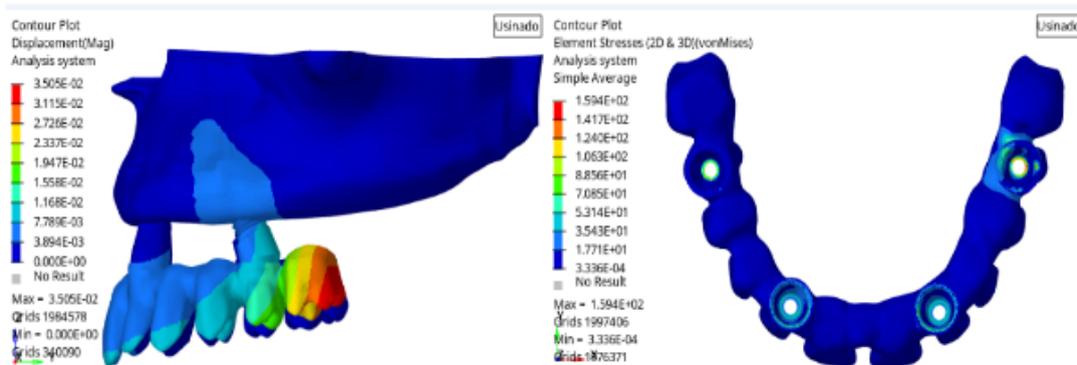


Figura 7 - Resultados de deslocamento e tensão de prótese total

4. Conclusão

A partir do estudo realizado, foi possível compreender e aplicar os dois tipos de pré-carga presentes no software *Hypermesh*[®] em um modelo preliminar. Foi possível observar que, apesar de perder a representação dos contatos entre os componentes, a pré-carga 1D apresentou praticidade e coerência nos resultados obtidos, além de trazer economia à quantidade de elementos, como pode ser observado nas tabelas 2 e 3. Por outro lado, a pré-carga 3D, embora mantivesse a representação dos contatos, fez com que a simulação possuísse mais elementos e não foi efetiva na análise do parafuso.

Por fim, o objetivo do trabalho foi realizado, uma vez que foi possível desenvolver um protocolo otimizado de aplicação de pré-carga no *Hypermesh*[®] , que

aliou os pontos fortes de cada tipo de aplicação em um método misto. A partir da utilização deste protocolo, foram observados resultados coerentes na aplicação de pré-carga em um modelo real de implantodontia.

5. Agradecimentos

Agradeço ao orientador Marcelo Fernandes e ao coorientador Leonardo Machado, que foram essenciais para o desenvolvimento deste projeto e que me ensinaram muito durante este ano. Agradeço também à comissão PIBIC (Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela oportunidade de realizar esta iniciação científica, tão engrandecedora para minha vida pessoal e acadêmica, bem como ao CTI Renato Archer por toda infraestrutura e materiais disponibilizados. No mais, agradeço à toda equipe do LPrint por todas as trocas de experiências, conversas e aprendizados e, por fim, à minha família, por todo apoio e amor.

6. Referências

- [1] FILHO, A.A. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. 6. ed. Érica, 2009. p. 1-7.
- [2] ZIENKIEWICZ, O.C.; TAYLOR, R.L.; ZHU, J.Z.; **The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals**. 7. ed. Butterworth-Heinemann, 2013. p. 1-5.
- [3] ADAMS, V.; ASKENAZI, A. **Building Better Products With Finite Element Analysis**. 1. ed. OnWord Press, 1998. p. 1-26.
- [4] MYIAGI, Paulo E. **Introdução à Simulação Discreta**. São Paulo, 2004. 31 páginas. Documento eletrônico.
- [5] DHATT, G.; TOUZOUT, G.; LEFRANÇOIS, E. **Finite Element Method**. 1. ed. Willey-ISTE, 2012. p. 2-4.
- [6] YANG, Z. **Finite Element Analysis for Biomedical Engineering Applications**. 1. ed. CRC Press, 2019. p. 1-2.
- [7] SHIVAKUMAR, Shruti et al. Applications of finite element analysis in dentistry: A review. **Journal of International Oral Health**, v. 13, n. 5, p. 415-422, 2021.
- [8] GOKHALE, N. S.; DESHPANDE, S. S.; BEDEKAR, S. V, THITE, A. N. **Practical Finite Element Analysis**. 1. ed. Finite to Infinite, 2008. p. 159-172.
- [9] JAMADAR, Pradip D. et al. Finite element based Pretension analysis of threaded Fasteners with Experimental Investigation. **International Journal of Innovations in Engineering and Technology (IJIET)** Volume, v. 6, p. 586-592, 2016.
- [10] KULAK, Geoffrey L.; BIRKEMOE, Peter C. Field studies of bolt pretension. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 25, n. 1-2, p. 95-106, 1993.
- [11] LANG, Lisa A. et al. Finite element analysis to determine implant preload. **The Journal of prosthetic dentistry**, v.90, n.6, p.539-546, 2003.