

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DE UMA METODOLOGIA PARA SELEÇÃO E ANÁLISE DE UM PARAFUSO PARA
DISPOSITIVO EXTRATOR DENTÁRIO

por

Bruno Klahr

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2016



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO DE UMA METODOLOGIA PARA SELEÇÃO E ANÁLISE DE UM PARAFUSO PARA
DISPOSITIVO EXTRATOR DENTÁRIO

por

Bruno Klahr

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler

Comissão de avaliação:

Prof. Dr. Rogério José Marczak

Prof. Dr. Ignácio Iturrioz

Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Porto Alegre, 27 de junho de 2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, por todo amor e apoio durante todo o tempo de graduação. Em especial aos meus pais, Vanise e João Pedro, por toda sua dedicação e suporte, que permitiu o meu total empenho na graduação, e a minha irmã, Carolina, pelo seu amor e alegria que inspiram minha vida. Serei eternamente grato a eles por todo esforço dedicado.

Ao Prof. Dr. Jakson M. Vassoler, por toda sua dedicação, paciência e ensinamentos, não apenas na orientação do deste trabalho, mas ao longo de toda graduação.

Aos integrantes do GMAp, por todos conhecimentos compartilhados, em especial, ao Leonel Echer, por toda sua paciência e apoio na realização do presente trabalho.

Aos amigos e colegas, que de alguma forma contribuíram com minha formação, e não me deixaram cair em momentos difíceis.

À UFRGS pelo seu suporte e estrutura, especialmente a todos os professores do Departamento de Engenharia Mecânica, por todas contribuições com minha formação.

KLahr, B. **Estudo de uma metodologia para seleção e análise de um parafuso para dispositivo extrator dentário**. 2016. 27. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

O presente trabalho propõe uma metodologia de seleção e análise de um parafuso para dispositivo extrator dentário, uma vez que não existem normas ou procedimentos estabelecidos para parafusos em dentes humanos. Baseando-se em normas para geometrias de parafusos de outras aplicações em bioengenharia, para uma primeira análise qualitativa, foram propostos modelos numéricos bidimensionais empregando o método dos elementos finitos a fim de avaliar o formato de rosca e sua respectiva distribuição de tensões sobre o dente. A distribuição de tensões está diretamente relacionada com a possibilidade de ruptura frágil localizada, na região de fixação do dente e conseqüentemente o fracasso do procedimento de exodontia, uma das possíveis falhas funcionais do parafuso. A partir de quatro diferentes geometrias analisadas, foi selecionada uma geometria, que então foi simulada numericamente com modelos tridimensionais do subconjunto parafuso, dente, ligamento periodontal e osso cortical. Tais simulações tridimensionais consideraram condições de máximo esforço para a remoção dos dentes analisados e foram propostos para uma análise quantitativa de tensões. Esta análise permitiu avaliar se o parafuso, com suas dimensões adaptadas da norma, apresenta falha por início de escoamento segundo os esforços internos promovidos por típicas geometrias de dentes. Devido a existência de mais de uma raiz em alguns dentes, e pelo fato que o parafuso vai inserido em apenas uma das raízes, o problema real promove flexões não previstas em uma primeira análise, necessitando de uma avaliação sobre uma geometria realística. Com base na análise dos resultados deste estudo, conclui-se que a geometria adaptada de parafuso HC da norma ASTM F543-6808, 2013, mostra-se adequada para a aplicação no dispositivo extrator dentário, promovendo dentre os parafusos estudados a melhor distribuição de tensões para com a sua funcionalidade de fixação ao dente.

PALAVRAS-CHAVE: Exodontia, parafuso extrator dentário, método dos elementos finitos, análise de tensões.

KLHR, B. **Study of a methodology for selection and analysis of a screw for dental extractor device.** 2016. 27. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

The present work proposes a methodology for selection and analysis of a screw for dental extractor device application, since there are not rules or procedures established to project screws for human teeth. Based on standards for geometry of screw geometries in bioengineering applications, for a first qualitative analysis, were proposed two-dimensional numeric models using the finite element method aiming to evaluate the format of screw thread and his respective stress distribution on the tooth. The stress distribution is directly related with the possibility of localized fragile rupture, in the region of fixing tooth and consequently the failure of extraction procedure, one possible functional failure of the screw. From four different geometries of study, was selected a geometry, which was simulated numerically with 3D models of the subassembly: screw, dentin, periodontal ligament and cortical bone. Such three-dimensional simulations considered critical (maximum load) conditions for the tooth extraction required force and it was proposed for a quantitative analysis of stress. This analysis permitted to evaluate if the screw, with his dimensions adapted by the standard, present failure by begin of yield according to the internal efforts promoted by typical teeth geometries. Due to existence of more than one root in some teeth, and because the screw will insert in only one of roots, the real problem further bending not expected on the first analyses, requiring an evaluation on the realistic geometry. Based on the analysis of this study results, it is concluded that the adapted screw geometry HC of the standard ASTM F543-6808, 2013, is suitable for applications in the dental extractor device, making among the screws studied, the best stress distribution for the functionality.

KEYWORDS: Tooth extraction, dental screw extractor, finite element method, stress analyses.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO.....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3.1.Extratores dentários	2
3.2. Características dos parafusos	3
3.2.1. Geometrias típicas	3
3.2.2. Liga metálica compatível.....	4
3.3. Caracterização dos dentes.....	5
3.4. Forças envolvidas na extração de dentes	6
4. METODOLOGIA.....	6
4.1. Estudo bidimensional	7
4.2. Estudo tridimensional.....	8
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
5.1. Análise bidimensional	10
5.2. Análise tridimensional	12
6. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	14
APÊNDICE A.....	16
APÊNDICE B.....	16
APÊNDICE C	18
APÊNDICE D	19
ANEXO I.....	20

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 – Extratores dentários.	2
Figura 4.1 – Representação da axissimetria e condições de contorno utilizadas nos modelos bidimensionais.	7
Figura 4.2 – Representação dos modelos CAD a partir de tomografia computadorizada obtidos em literatura [Vasco <i>et al.</i> , 2014].	8
Figura 4.3 – Modelo exemplificando condições de contorno do problema. Exemplo: Dente canino com parafuso extrator HC.	9
Figura 5.1 – Distribuição da primeira tensão principal na parede do dente para o modelo bidimensional do parafuso HA.	10
Figura 5.2 – Distribuição da primeira tensão principal na parede do dente para o modelo bidimensional do parafuso HB.	10
Figura 5.3 – Distribuição da primeira tensão principal na parede do dente para o modelo bidimensional do parafuso HC.	11
Figura 5.4 – Distribuição da primeira tensão principal na parede do dente para o modelo bidimensional do parafuso HD.	11
Figura 5.5 – Distribuição da tensão de von Mises na parede do Parafuso HC inserido no dente canino [Pa].	12
Figura 5.6 – Distribuição da tensão de von Mises na parede do Parafuso HC inserido no dente incisivo. [Pa].	13
Figura 5.7 – Distribuição da tensão de von Mises na parede do Parafuso HC inserido no dente molar. [Pa].	13
Figura A.1 – Representação da malha dos modelos bidimensionais.	16
Figura B.1 – Status e pressão de contato dente/parafuso para o modelo 2D do parafuso HA.	16
Figura B.2 – Status e pressão de contato dente/parafuso para o modelo 2D do parafuso HB.	17
Figura B.3 – Status e pressão de contato dente/parafuso para o modelo 2D do parafuso HC.	17
Figura B.4 – Status e pressão de contato dente/parafuso para o modelo 2D do parafuso HD.	18
Figura C.1 – Representação dos modelos CAD utilizados nas simulações tridimensionais	19
Figura D.1 – Exemplo da malha em elementos finitos utilizados nas simulações tridimensionais: Parafuso HC inserido no incisivo.	20

1 INTRODUÇÃO

O procedimento de exodontia consiste na remoção de dentes ou raízes remanescentes de dentes [Gregori, 1988]. Esse tipo de procedimento geralmente se faz necessário em razão de motivos patológicos ou problemas funcionais. Contudo, devido ao maior acesso à informação sobre higiene bucal, pela parte mais carente da população, e de novas técnicas odontológicas que se demonstram capazes de reparar dentes, que outrora seriam considerados irrecuperáveis, o procedimento de exodontia caiu em desuso. Entretanto, existem casos onde a remoção do dente é a melhor solução. Exemplos disso são casos de cárie severa, doença periodontal avançada, indicações ortodônticas, dentes supranumerários, dentes envolvidos em fraturas de mandíbula e razões estéticas ou econômicas.

A exodontia pode ser simples (i.e., via alveolar), quando não há necessidade de remoção de estrutura óssea alveolar, ou pode ser complexa, quando há a remoção de parte do tecido ósseo alveolar para ter acesso ao dente e possibilitar a exodontia. A remoção do dente propriamente dito, pode ser realizada de várias formas. Tradicionalmente são utilizadas algumas técnicas de exodontia, como a utilização do fórceps, uma ferramenta odontológica que auxilia na extração do dente. O fórceps realiza a remoção do dente ou raízes remanescentes a partir da força aplicada pelo cirurgião dentista e ponto de apoio no dente. Outro método de remoção de dentes é através do uso de alavancas, onde o cirurgião dentista através de ferramentas adequadas, utiliza movimentos de alavanca para remover o dente. Ainda há técnicas como a de odontosecção, osteotomia ou combinação das duas, nos quais se busca diminuir a resistência óssea para facilitar a exodontia. Essas técnicas são geralmente utilizadas em casos extremos, quando há a impossibilidade do uso de outras ferramentas, ou quando a remoção do dente somente é possível se for retirada parte do osso [Gregori, 1988].

As técnicas convencionais de exodontia são as mais utilizadas. Porém em alguns casos não são possíveis de serem aplicadas pela simples incapacidade de executá-las, ou por levarem a traumas cirúrgicos significativos. Na situação ideal deseja-se que a exodontia seja atraumática. Diante disso, há a possibilidade do uso de dispositivo extrator dentário, o qual utiliza o princípio de extração vertical do dente, podendo facilitar o procedimento e reduzir o tempo de cirurgia frente a algumas técnicas. Utilizando o dispositivo extrator, é possível realizar a exodontia com o mínimo trauma cirúrgico, que resulte na manutenção do arcabouço periodontal imediatamente após a exodontia. Uma exodontia atraumática reduz o risco de infecção, melhora a estética da restauração final e o potencial para regenerar o osso, minimizando o tempo de recuperação do paciente [Patil *et al.*, 2012]. Segundo Thomé *et al.*, 2012, há casos em que a instalação dos implantes dentários é necessária logo após a exodontia. Com a utilização do extrator, há maior conservação do leito ósseo e dos tecidos adjacentes na remoção do dente.

Atualmente, existem projetos nacionais com o intuito de desenvolver um dispositivo extrator dentário. Um desses projetos, em fase de desenvolvimento, onde este estudo se insere, consiste em um alicate bi-rotulado, baseado no princípio de remoção vertical, através de um parafuso previamente inserido no dente. Comumente o projeto de parafusos é realizado sem qualquer tratativa analítica ou numérica de cálculo de tensões internas, sendo baseada apenas em normas específicas para sua aplicação. Até o presente momento, não há normativas que estabelecem o projeto de parafusos extratores para dentes, e não foram encontrados estudos de análise mecânica do parafuso para o dispositivo extrator dentário. Assim, defrontou-se com a necessidade de projetar um parafuso para uma aplicação incomum em problemas de engenharia, que necessita de uma estimativa coerente de acordo com as características do problema.

2 OBJETIVO

Este trabalho almeja desenvolver uma metodologia de seleção e análise do parafuso para um dispositivo extrator dentário. Busca-se a geometria da rosca de parafuso, que melhor se adéqua a aplicação em conjunto com o extrator dentário. Para tanto, é desenvolvida uma metodologia específica para avaliar a capacidade de fixação do parafuso, segundo o formato do

perfil de rosca, de resistência mecânica, e as dimensões do parafuso. Estes parafusos, por fim, devem ser definidos de forma que apresentem o perfil que promova a melhor fixação possível e resistam aos esforços máximos observados no procedimento de exodontia de três diferentes classes de dentes aqui estudadas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Extratores dentários

As técnicas convencionais de extração de dentes, geralmente causam trauma relacionado à perda óssea na região periodontal. Com o objetivo de obter extrações dentárias menos traumáticas, técnicas de extração de dentes baseadas no uso de extratores dentários verticais vêm sendo desenvolvidas. O uso de extratores dentários, possibilita diminuir o tempo de cirurgia e de tratamento do paciente, já que o trauma cirúrgico envolvido é minimizado. Deste modo, a utilização desses equipamentos viabiliza a instalação imediata de implantes após extração, tornando-se uma alternativa rápida e segura para a reabilitação de dentes, permitindo ao paciente um conforto estético e funcional imediato [Carneiro *et al.*, 2014]. Na literatura, são encontrados diversos modelos de extratores dentários, todos seguindo o princípio de extração vertical do dente. Nos quais a extração do dente se dá através da aplicação de uma tração vertical em um parafuso, previamente inserido na raiz do dente, que é composta predominantemente de dentina. Na Figura 3.1, são apresentados alguns desses extratores comerciais.



(a) Benex [Syfrig, 2007]



(b) Neodent [Thomé *et al.*, 2012]



(c) Easy X-Trac System [A Titan Instrument, 2011]



(d) Exomed [Medesy Engineering, 2013]

Figura 3.1 – Extratores dentários.

Alguns desses extratores empregam um dispositivo tipo roldanas, com um cabo acoplado em um parafuso, o qual é tracionado, extraindo o dente. Os extratores Benex (Benex Root Extraction System, Neuss, Alemanha) (Figura 3.1a) e Neodent (Neodent, Curitiba, Brasil) (Figura 3.1b) são baseados neste princípio. O extrator Easy X-Trac (Titan Instrument, Hamburg, NY) (Figura 3.1c), que é desenvolvido para a extração de dentes não-molares, é baseado num dispositivo tipo alicate, que emprega uma carga de tração vertical sobre o parafuso, realizando a remoção do dente. O dispositivo extrator Exomed (Medesy, Maniago, Itália) (Figura 3.1d), possui um sistema de extração de dentes ou raízes, que aproveita a força perpendicular obtida através da tensão de uma corda de Kevlar.

Como é possível perceber, os extratores dentários apresentados possuem estrutura robusta. O parafuso, por sua vez, é o componente de vital importância para o adequado funcionamento do equipamento, uma vez que este é o responsável por transferir a carga de extração para o dente, sem causar a ruptura frágil localizada, que comprometeria a extração corretamente.

3.2 Características dos parafusos

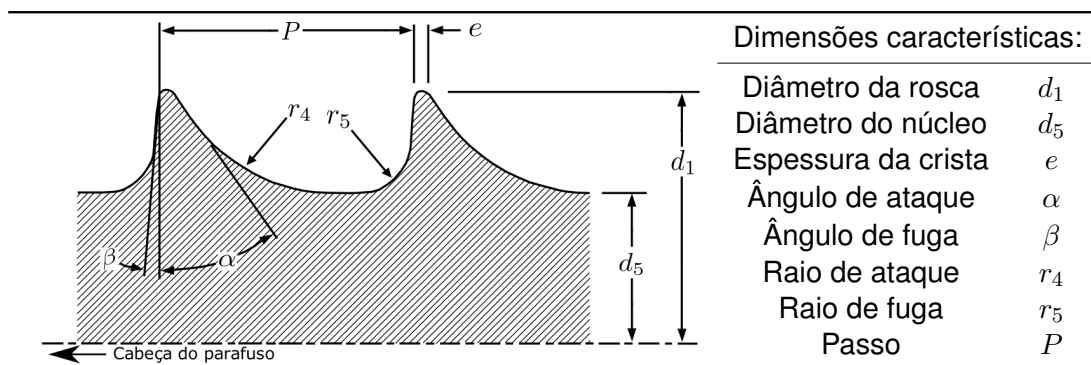
Para permitir o estudo de uma metodologia de projeto e análise da rosca do parafuso para o dispositivo extrator dentário, busca-se, através de pesquisa em literatura e normas, características geométricas de parafusos e propriedades mecânicas de materiais (ligas metálicas) comumente empregados para aplicações que requerem biocompatibilidade, e sejam adequadas para o projeto.

3.2.1 Geometrias típicas

Existem poucas normas para problemas de engenharia que envolvam tecidos biológicos duros (calcificados). Uma vez que a dentina é muito similar ao osso em densidade e comportamento mecânico, este estudo foi baseado partir de geometrias de rosca de parafusos da norma ASTM F543-6808, 2013. Esta norma, define geometrias de parafusos para aplicações em fixação de ossos, as geometrias de parafusos dividem-se em 4 categorias: HA, HB, HC e HD. A principal diferença entre essas categorias, está na geometria da rosca do parafuso. Essas geometrias, serão utilizadas como candidatas para o parafuso extrator dentário. Portanto, para permitir a seleção da melhor geometria, é necessário se conhecer as peculiaridades da rosca e suas dimensões características.

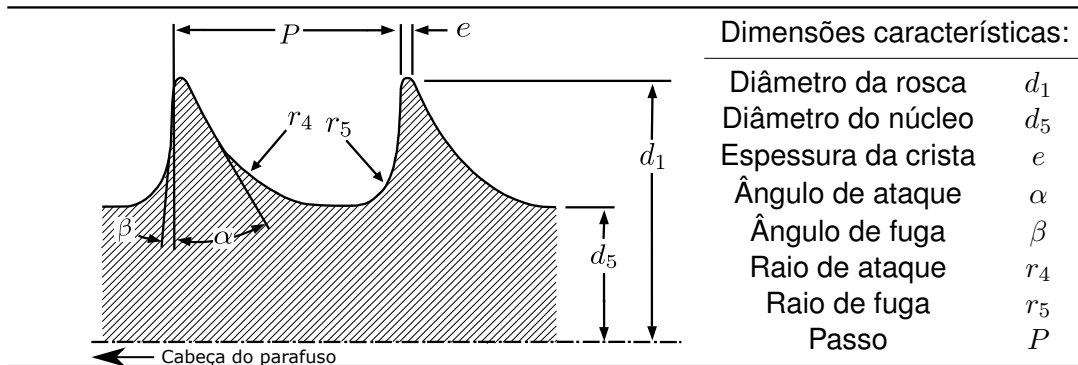
Na Tabela 3.1 é apresentada uma representação esquemática da geometria típica da rosca de parafuso HA. Esses parafusos possuem uma rosca assimétrica em contraforte, são normalmente aplicados em ossos corticais.

Tabela 3.1 – Representação esquemática da geometria de parafuso HA [adaptado da ASTM F543-6808, 2013].



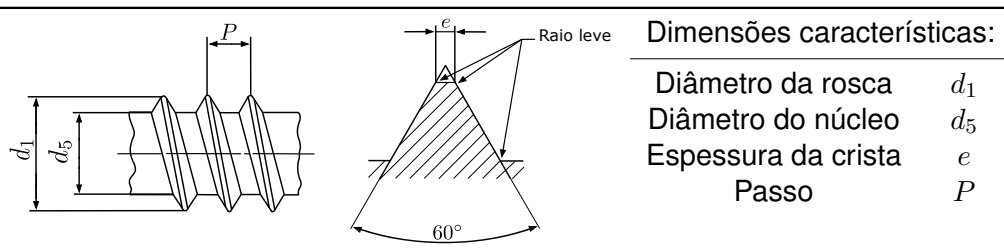
Na Tabela 3.2 é apresentada uma representação esquemática da geometria típica da rosca de parafuso HB. Esses parafusos também possuem uma rosca assimétrica em contraforte, mas são normalmente aplicados em ossos esponjosos.

Tabela 3.2 – Representação esquemática da geometria de parafuso HB [adaptado da ASTM F543-6808, 2013].



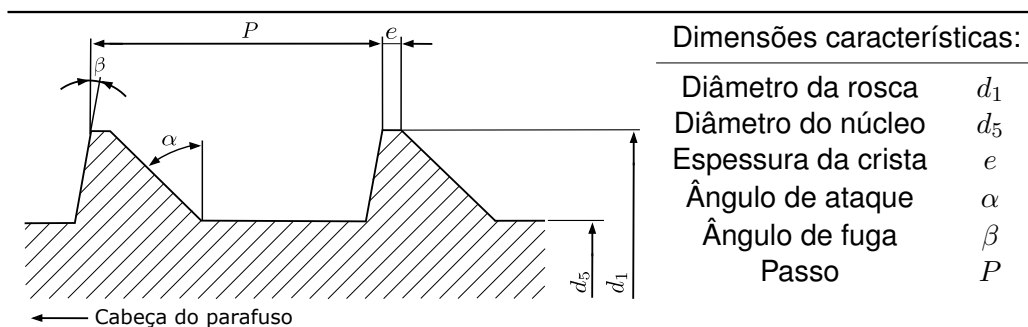
Na Tabela 3.3 é apresentada uma representação esquemática da geometria típica da rosca de parafuso HC. Esses parafusos possuem uma rosca simétrica de geometria triangular.

Tabela 3.3 – Representação esquemática da geometria de parafuso HC [adaptado da ASTM F543-6808, 2013].



Na Tabela 3.4 é apresentada uma representação esquemática da geometria típica da rosca de parafuso HD. Esses parafusos possuem uma rosca assimétrica e sem arredondamentos de canto, ou de chanfros, são normalmente aplicados em ossos esponjosos.

Tabela 3.4 – Representação esquemática da geometria de parafuso HD [adaptado da ASTM F543-6808, 2013].



No ANEXO I, podem ser encontradas informações sobre dimensões normatizadas para cada tipo de geometria de parafusos citada no presente trabalho, estabelecidas pela norma ASTM F543-6808 [2013]. São apresentados tabelas com informações das dimensões características para cada geometria.

3.2.2 Liga metálica biocompatível

A partir da finalidade do parafuso extrator dentário, é necessário o emprego de material que apresente propriedade de biocompatibilidade e suporte altos níveis de tensão. O uso de ligas de titânio, principalmente a liga Ti-6Al-4V, é frequentemente empregado em componentes

mecânicos para aplicações biomédicas ou de bioengenharia, devido a suas boas propriedades mecânicas e por apresentar características de biocompatibilidade [Niimoni, 1998]. Algumas propriedades mecânicas da liga de titânio Ti-6Al-4V são: Módulo de Elasticidade igual a 113.8 GPa [Niimoni, 1998]; Coeficiente de Poisson igual a 0.342 [Niimoni, 1998]; Tensão de Escoamento igual a 950 MPa [ARCAM AB, 2016]; Tensão de Ruptura igual a 1020 MPa [ARCAM AB, 2016].

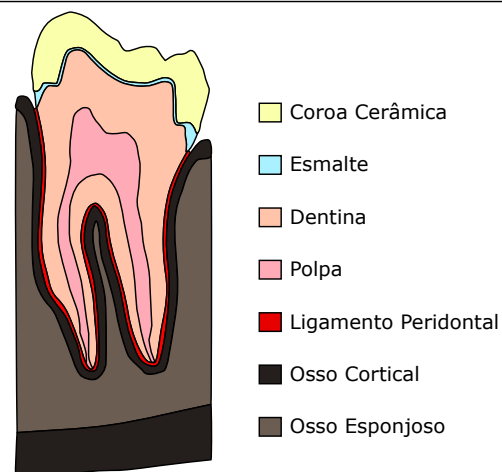
3.3 Caracterização dos dentes

A estrutura dentária é formada pelo dente, osso e tecidos moles de suporte. Em condições saudáveis, a parte do dente que se estende para fora da gengiva é chamado de coroa; a parte abaixo da gengiva é chamada raiz do dente. A coroa do dente é recoberta pelo esmalte. A raiz é coberta pelo cimento, que envolve a dentina e o tecido mole dentro de um ou mais canais radiculares [Anusavice, 2013]. A dentina contém sais de cálcio, é uma substância dura e sensível e envolve a polpa do dente, que é formada por tecido conjuntivo, rica em nervos e vasos sanguíneos. O esmalte também é composto por sais de cálcio, faz do dente uma das partes mais duras do corpo, devido ao seu alto grau de mineralização. O Periodonto é um termo genérico referente aos tecidos de suporte do dente, que são o alvéolo dental e o ligamento periodontal [Madeira, 2007]. A raiz do dente se relaciona em tamanho e número com o tamanho da coroa, em dentes onde a coroa é pequena, há uma raiz (*e.g.* dentes incisivos), já onde a coroa é maior, há duas ou três raízes (*e.g.* dentes molares).

Para a correta análise numérica do conjunto dente e extrator, é necessário o conhecimento prévio das propriedades mecânica dos materiais analisados. Além disso, é necessária uma correta representação das condições de contorno do problema físico. Para fins de análise, todos os materiais empregados podem ser considerados com comportamento mecânico linear elástico isotrópico [Williamson *et al.*, 1995, Lotti *et al.*, 2006, Sun *et al.*, 2008].

Na Tabela 3.5 é apresentado uma representação esquemática, juntamente são apresentados propriedades mecânicas relacionadas com a estrutura dentária.

Tabela 3.5 – Propriedades mecânicas relacionadas a estrutura dentária [Lotti *et al.*, 2006].

Representação esquemática de uma estrutura dentária	Material	Módulo de Elasticidade [MPa]	Coeficiente de Poisson
	Esmalte	4.10E+4	0.30
	Dentina	1.90E+4	0.31
	Polpa	2.07	0.45
	Osso Cortical	1.37E+4	0.30
	Osso esponjoso	1.37E+3	0.30
	Ligamento Periodontal	7.00E-2	0.49

Vale ressaltar, que além de não ser comum a avaliação desses materiais biológicos em estudos de engenharia mecânica, há uma dificuldade intrínseca em obter as propriedades mecânicas de estruturas biológicas. Além da diversidade encontrada, dificultando a representatividade das estruturas, há uma certa complexidade em realizar ensaios mecânicos com materiais biológicos. Em literatura são encontrados diversos estudos que apresentam propriedades mecânicas das estruturas dentárias, havendo pequena divergência entre os valores

das propriedades [Lotti *et al.*, 2006, Sun *et al.*, 2008, Chun *et al.*, 2014]. Como não foi possível fazer ensaios mecânicos neste trabalho, adotou-se as propriedades mecânicas relatadas em literatura.

3.4 Forças envolvidas na extração de dentes

O conhecimento das condições de operação envolvidas no problema de extração dentária, através da utilização de parafuso extrator, é de extrema importância para a correta representação das condições de contorno do problema físico a ser analisado, garantindo a representatividade dos resultados obtidos. Portanto, através de uma pesquisa em literatura, busca-se obter as condições de contorno de Neumann do problema em análise.

Conforme apresentado em Locher, 2010, mesmo em condições ideais para extração dentária com aplicação de carga puramente de tração, a força necessária para a extração de um dente por meio de um parafuso extrator varia consideravelmente dependendo do tipo de dente a ser extraído, salubridade, quantidade de raízes, entre outros [Anusavice, 2013]. Apesar desses vários fatores de influência, considerando uma amostra de 60 extrações por meio de parafuso extrator, dados quanto à carga máxima para extração foram apresentadas na literatura [Locher, 2010] conforme exposto na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Carga de tração necessária para extração dentária, diferentes tipos de dente [Locher, 2010].

Dente	Carga de tração [N] com confiança de 95%		
	Força Mínima	Força Máxima	Média
Incisivo	99.9	229.1	154.9
Canino	78.3	451.7	249.7
Pré Molar/Molar	39.6	531.8	243.1

Para fins de análise, as simulações realizadas consideram como cenário de trabalho a condição crítica para cada tipo de dente, ou seja, o caso com carga máxima.

4 METODOLOGIA

A metodologia proposta para o projeto e análise da rosca do parafuso para o dispositivo extrator, nesta primeira etapa, foi baseada em simulações numéricas, empregando o método dos elementos finitos (MEF). A metodologia foi dividida em duas etapas. Primeiro estudou-se os perfis de rosca através de análises bidimensionais qualitativas. Em uma segunda etapa buscou-se realizar uma análise de tensões através de análises quantitativas tridimensionais, levando em consideração geometrias e condições de contorno reais do problema físico. As simulações qualitativas empregaram simplificações de axissimetria no parafuso, resultando em análises bidimensionais simplificadas. O objetivo destas simulações, foi de selecionar a geometria de rosca que produza uma distribuição de tensões mais uniforme no material de fixação (dente). Isso se faz necessário, para que se escolha um parafuso com reduzido risco de criar picos de tensão no dente e causar ruptura da dentina, causando a falha da extração do dente e tornando o dispositivo ineficiente.

A partir da análise dos resultados bidimensionais, selecionou-se a geometria mais adequada para o projeto do parafuso extrator, e se propôs o estudo de modelos tridimensionais. Neste estudo, foram construídos modelos envolvendo o conjunto: parafuso extrator; dentina; ligamento periodontal; e osso cortical. A geometria do parafuso foi construída considerando dimensões normatizadas e limitações dos dentes analisados. A partir de modelos tridimensionais em elementos finitos, analisou-se o comportamento do parafuso, considerando condições críticas de carregamento na exodontia verificadas na literatura.

4.1 Estudo bidimensional

A construção do modelo em elementos finitos considerou algumas simplificações, visando a diminuição da complexidade inerente ao problema físico analisado. As simplificações foram axissimetria e contato simples. Assim, resultando em modelos bidimensionais, com contato tipo área-área sem penetração. Nesse primeiro estudo, foram analisados modelos simplificados do problema, considerando apenas parafuso e dentina, e supondo materiais elásticos lineares isotrópicos. Contudo, as simplificações assumidas no estudo, podem ser utilizadas de forma segura na representação do modelo físico estudado, uma vez que estão de acordo com o que é proposto na literatura [Williamson *et al.*, 1995, Amarante, 2003, Lotti *et al.*, 2006, Sun *et al.*, 2008].

Os modelos foram construídos a partir das características geométricas de roscas normatizadas, utilizando os quatro tipos apresentados na norma ASTM F543-6808, 2013. Com o objetivo de comparar as geometrias, foram selecionados tamanhos de parafusos geometricamente similares (diâmetro da rosca). Foram selecionados os parafusos HA 4.0, HB 4.0, HC 4.2 e HD 4.0 (ver ANEXO I), todos modelados com aproximadamente 4 mm de diâmetro de rosca e 16 mm de comprimento. Na Figura 4.1 pode ser observado a modelagem empregada nos problemas analisados, apresentando as condições de contorno utilizadas na simulação e a representação da simplificação de axissimetria utilizada.

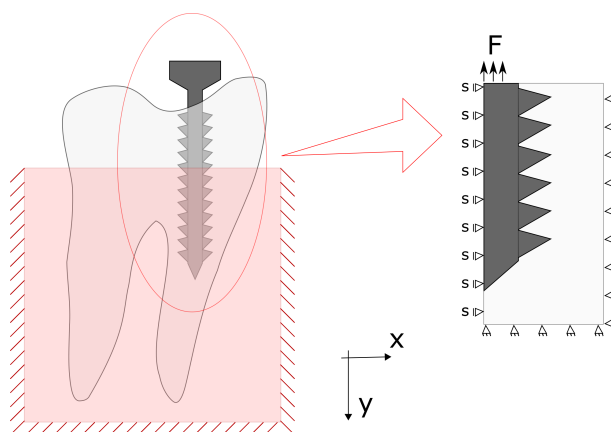


Figura 4.1 – Representação da axissimetria e condições de contorno utilizadas nos modelos bidimensionais.

Conforme é apresentado na representação da Figura 4.1, as condições de contorno adotadas nas simulações são simetria radial no eixo e engaste inferior e no outro extremo lateral. Como as simulações bidimensionais visam uma análise que busca resultados de forma comparativa da melhor distribuição de tensões na dentina, a carga (F) aplicada foi considerada de 10 N em todos os casos analisados. A distribuição de carga se deu de forma uniformemente distribuída na linha correspondente ao núcleo do parafuso. Para ambos materiais, assumiu-se hipótese de comportamento mecânico elástico linear. Devido a característica de ruptura frágil da dentina, o critério de falha usado para análise foi o de máxima tensão normal.

Na simulação dos modelos por elementos finitos, a estrutura parafuso/dentina foi modelada utilizando o elemento axissimétrico PLANE183 [ANSYS, 2012]. Um elemento bidimensional de alta ordem, definido por oito, com dois graus de liberdade. Na região de contato entre dente e parafuso, somente as linhas que atuam efetivamente como uma restrição ao deslocamento, foram modeladas com elementos de contato. Foi utilizado o par de elementos CONTA172 (contato no parafuso) e TARGE169 (alvo na dentina) [ANSYS, 2012] para modelar o contato entre as estruturas. Foi escolhido um contato simples, sem penetração, que permitia deslizamento, a fim de representar de forma mais adequada as condições físicas do problema. Mais informações sobre os elementos finitos utilizados, bem como suas respectivas formulações matemáticas podem ser encontradas em ANSYS, 2012. No APÊNDICE A, é apresentada a malha empregada na obtenção dos resultados para cada modelo bidimensional.

4.2 Estudo tridimensional

A partir dos resultados dos modelos bidimensionais, foi definida a geometria de rosca que apresentasse resultados mais satisfatórios, de acordo com o objetivo das análises, e se propôs modelos tridimensionais em elementos finitos. O parafuso escolhido para prosseguir com o estudo, foi construído com 10 mm de comprimento total e duas possibilidades de diâmetros externos: 2 e 1.6 mm. As dimensões foram baseadas em relações apresentadas na norma [ASTM F543-6808, 2013], e em limitações geométricas impostas pela geometria dos dentes. Porém, devido a inexistência em norma de dimensões para alguns valores de diâmetros empregados, foi necessário realizar extrapolações dos valores normalizados para obter os valores das dimensões do parafuso.

A fim de analisar o comportamento mecânico do parafuso com os possíveis cenários críticos escolhidos, o parafuso foi simulado com os dentes canino, incisivo e molar. Com os dentes caninos e molares, foi possível utilizar o parafuso de 2 mm de diâmetro, entretanto, devido as dimensões reduzidas da raiz dos dentes incisivos, se trabalhou com o parafuso de diâmetro de 1.6 mm com este dente. Estas escolhas condizem com o diâmetro usado em parafusos dos dispositivos comerciais apresentados na Fig. 3.1. A Figura 4.2a apresenta em detalhe os três dentes empregados na criação dos modelos em CAD.

Os componentes biológicos (osso, ligamento e dente), representados nos modelos em CAD, foram obtidos a partir de bibliotecas livres disponibilizadas pelo autor [Vasco *et al.*, 2014]. Os dentes foram selecionados a partir de uma arcada dentária inferior de um adulto, conforme Fig. 4.2b.

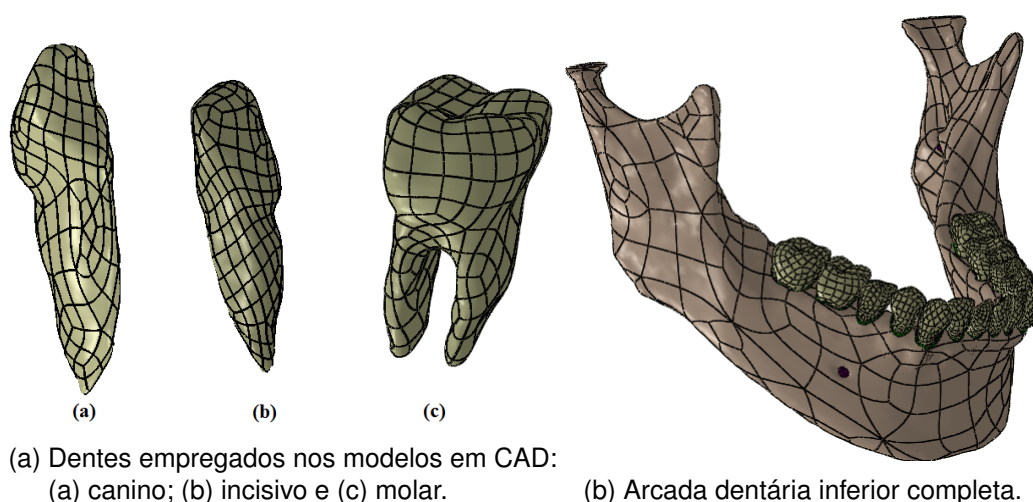


Figura 4.2 – Representação dos modelos CAD a partir de tomografia computadoriza obtidos em literatura [Vasco *et al.*, 2014].

Para a criação da geometria do conjunto, foram empregadas algumas considerações. O conjunto completo é constituído pelo osso cortical, ligamento periodontal, dente e o parafuso. O acoplamento do parafuso no dente, foi considerado seguindo o caminho de inserção indicado pelo dentista, ou seja, o da polpa do dente e na maior raiz (em casos de haver mais que uma). A coroa do dente não foi modelada no conjunto, devido ao não acoplamento com o parafuso, não possuindo interesse na simulação. No APÊNDICE C é apresentada a representação esquemática dos modelos CAD, empregando os dentes analisados e o parafuso HC.

Para as simulações dos modelos em elementos finitos, foram empregadas algumas simplificações, visando a redução da complexidade inerente ao problema físico em estudo. Contudo, tais simplificações estão de acordo com o proposto na literatura [Williamson *et al.*, 1995, Amarante, 2003, Lotti *et al.*, 2006, Sun *et al.*, 2008] e não afetam a fidedigna reprodução do problema. Os materiais biológicos presente no estudo, foram tratados com comportamento elástico linear isotrópico, com propriedades apresentadas na Tabela 3.5. Foram substituídas as propriedades mecânicas do ligamento periodontal pelas do osso cortical, devido à resistência

mecânica extremamente baixa por parte do ligamento. Esta escolha torna o estudo mais conservativo, uma vez que um grande deslocamento do ligamento periodontal acarretaria na separação do dente e osso. Assim, uma vez que se busca simular a situação de carga crítica sobre o parafuso extrator se fez necessária permitir que o ligamento suporte o esforço mecânico envolvido, o que não aconteceria em condições normais. O parafuso foi considerado de titânio (liga Ti-6Al-4V), por apresentar propriedades mecânicas satisfatórias para o estudo, e ser comumente empregado em aplicações de bioengenharia. O titânio foi simulado com comportamento elástico linear isotrópico, com propriedades apresentadas na subseção 3.2.2.

Na construção dos modelos em elementos finitos, foram empregados os elementos SOLID186 [ANSYS, 2012] e SOLID187 [ANSYS, 2012] para modelar as estruturas sólidas do problema tridimensional. São elementos tridimensionais de alta ordem, definido com três graus de liberdade em cada nó, com interpolação de deslocamento quadrática. Nos sólidos onde foi possível utilizar uma malha hexaédrica, se utilizou o elemento SOLID186, que é definido a partir de 20 nós. Porém, onde foi necessário a utilização de elementos tetraédricos, empregou-se o elemento SOLID187, que é definido a partir de 10 nós, economizando tempo computacional.

Para as regiões de contato existente no problema, foram utilizados os elementos CONTA174 [ANSYS, 2012], e seu respectivo alvo, o elemento TARGE170 [ANSYS, 2012]. Ambos elementos citados podem ser utilizados em análises estruturais, sendo utilizados para representar contato com base ou contato geral. Na região de contato dente/parafuso, empregou-se um contato de atrito áspero, sem penetração, do tipo *rough*, para evitar que o parafuso deslizesse para fora da cavidade, não representando o problema em estudo. Já nas demais regiões de contato, entre ligamento e dente, e osso e dente, foram modeladas com as áreas ligadas, contato do tipo *bonded*. Nessas regiões pode-se considerar as faces em contato perfeito, não permitindo deslocamento relativo. Ambas escolhas foram definidas para representar de forma adequada as condições físicas do problema. Para mais informações sobre os elementos utilizados nos modelos tridimensionais, bem como suas formulações matemáticas, pode ser consultado ANSYS, 2012. No APÊNDICE D é apresentada uma exemplificação de malha utilizada nos modelos tridimensionais. É apresentada como exemplo, a malha do modelo do parafuso HC inserido no dente incisivo. Utilizou-se parâmetros para construção da malha similares em cada modelo, gerando assim, malhas similares em todos os modelos analisados.

Na Figura 4.3 está representado o modelo completo de um dente canino com o parafuso extrator HC, utilizado nas simulações em elementos finitos.

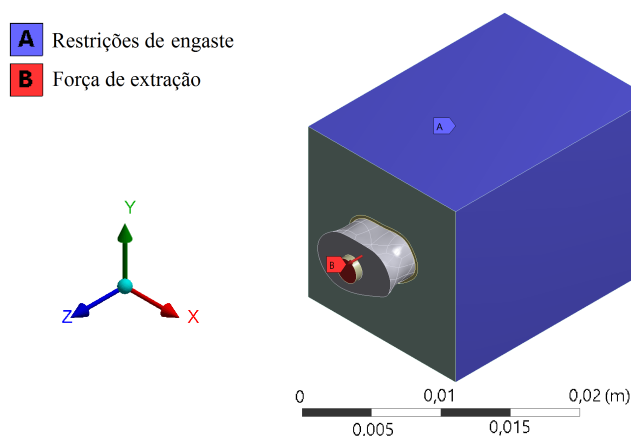


Figura 4.3 – Modelo exemplificando condições de contorno do problema. Exemplo: Dente canino com parafuso extrator HC.

Na Figura 4.3 estão representadas as condições de contorno aplicadas: uma pressão uniforme na área da cabeça do parafuso, representando a força de extração, e restrições de deslocamento nas áreas indicadas na figura. As condições de contorno do problema físico consideraram os carregamentos máximos (caso crítico) aplicados nas extrações. Foram

empregadas restrições de engaste em todas faces livres da base (osso cortical) dos modelos, exceto na face onde há o dente, condição similar a aplicada nos modelos bidimensionais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise bidimensional

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações numéricas dos modelos bidimensionais. São analisados os resultados da distribuição da tensão principal na parede da dentina, de acordo com o proposto por Selna *et al.*, 1975, por se considerar um material com comportamento frágil. A análise qualitativa das tensões na parede da dentina, tem como finalidade identificar o tipo de rosca que apresenta melhores resultado de acordo com o proposto pela metodologia bidimensional. Todos os resultados para tensão são apresentados em Pa.

Na Figura 5.1 está apresentado a distribuição da primeira tensão principal para o modelo bidimensional do parafuso HA.

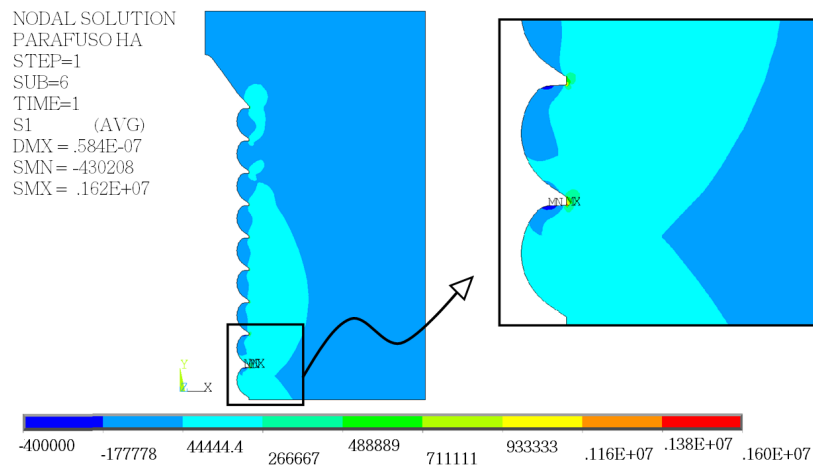


Figura 5.1 – Distribuição da primeira tensão principal na parede do dente para o modelo bidimensional do parafuso HA.

Na Figura 5.2 está apresentado a distribuição da primeira tensão principal para o modelo bidimensional do parafuso HB.

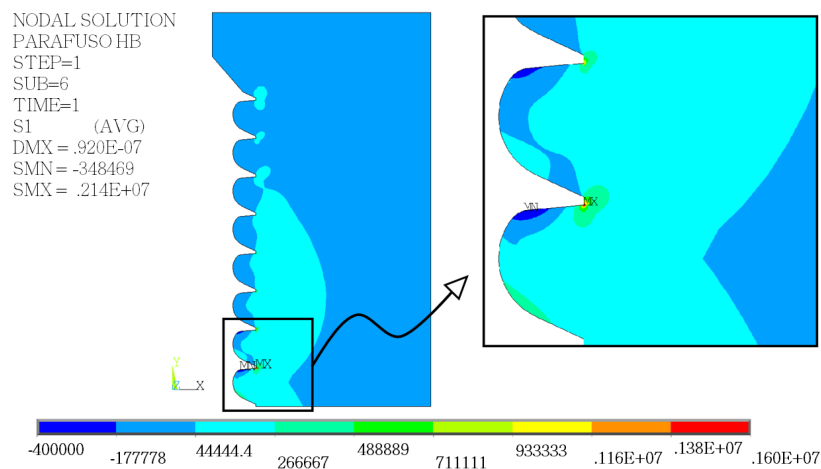


Figura 5.2 – Distribuição da primeira tensão principal na parede do dente para o modelo bidimensional do parafuso HB.

Na Figura 5.3 está apresentado a distribuição da primeira tensão principal para o modelo bidimensional do parafuso HC.

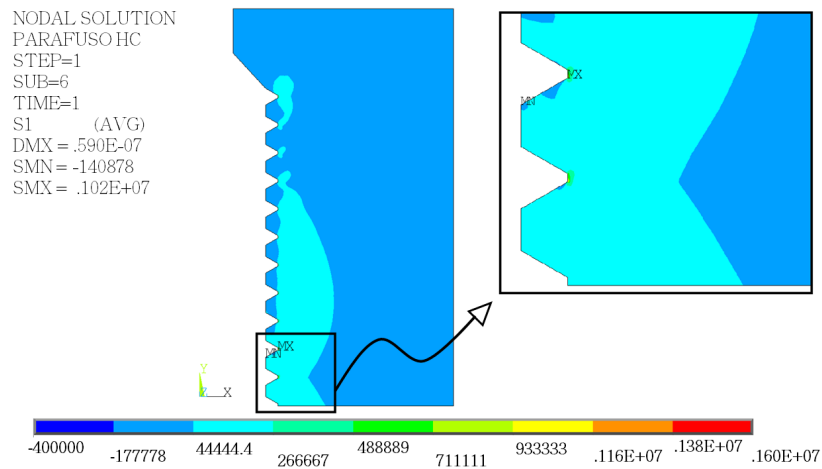


Figura 5.3 – Distribuição da primeira tensão principal na parede do dente para o modelo bidimensional do parafuso HC.

Na Figura 5.4 está apresentado a distribuição da primeira tensão principal para o modelo bidimensional do parafuso HD.

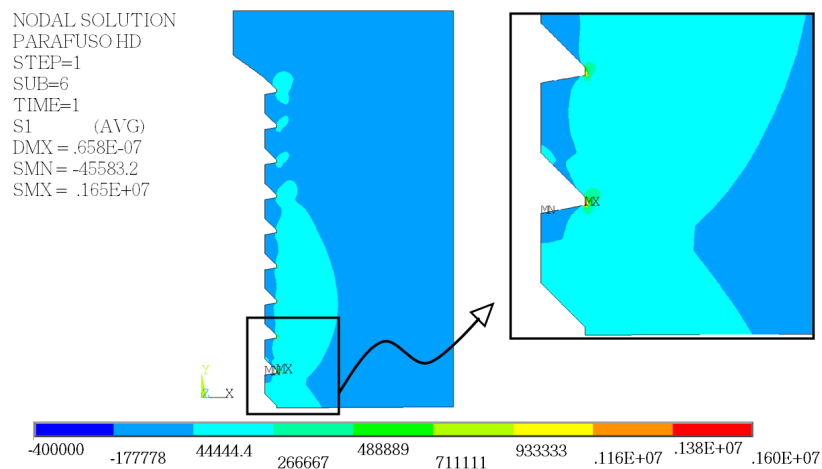


Figura 5.4 – Distribuição da primeira tensão principal na parede do dente para o modelo bidimensional do parafuso HD.

A partir de uma análise dos resultados de distribuição da primeira tensão principal para os modelos bidimensionais, verificam-se distribuições com pequenos concentradores de tensão na região formada pelas cristas dos primeiros filetes dos parafusos. Nos resultados da geometria HC (Figura 5.3), observa-se uma melhor distribuição de tensões, apresentado menores valores máximos e destacando-se dentre as demais geometrias. Vale ressaltar que as análises bidimensionais foram submetidas à um estudo de malha, aumentando-se o número de elementos, até que os valores de tensão estabilizassem. Entretanto, na região formada pela crista dos primeiros filetes do parafuso, é observado um comportamento assintótico com o refinamento da malha, devido a um concentrador de tensão em um canto vivo.

No APÊNDICE B pode ser apresentado resultados de pressão e *status* de contato. Verifica-se o correto funcionamento dos contatos empregados, mantendo-se predominantemente em deslizamento. Também pode ser verificado, máximas pressões de contato nas regiões formadas pelos primeiros filetes do parafuso.

Na Tabela 5.1 estão apresentados valores de máximo e mínimo para Primeira tensão Principal de cada modelo analisado.

Tabela 5.1 – Resultados para os modelos bidimensionais.

Geometria	Primeira Tensão Principal [Pa]	
	Máxima	Mínima
HA	1.62E+6	-4.30E+5
HB	2.14E+6	-3.48E+5
HC	1.02E+6	-1.41E+5
HD	1.65E+6	-4.56E+4

A partir de uma análise qualitativa dos resultados obtidos, comparando os valores apresentados na Tabela 5.1 e a distribuição da primeira tensão principal, foi selecionada a geometria de rosca HC como a forma da rosca para o parafuso extrator. A geometria HC possui seus filetes em forma trapezoidal, possuindo como outra vantagem, a facilidade de usinagem.

5.2 Análise tridimensional

A partir da geometria HC, pré-selecionada nas análises bidimensionais, foram propostos modelos tridimensionais para análise do parafuso extrator dentário. Foram propostos modelos do parafuso HC, inserido nos três tipos de dentes em estudo. Para esta análise quantitativa são apresentados resultados da distribuição de tensão equivalente de von Mises na parede do parafuso, já que o objetivo do estudo, é de analisar o comportamento dos parafuso submetido ao carregamento crítico de exodontia.

Na Figura 5.5 são apresentados os resultados para o modelo tridimensional do parafuso HC inserido no dente canino.

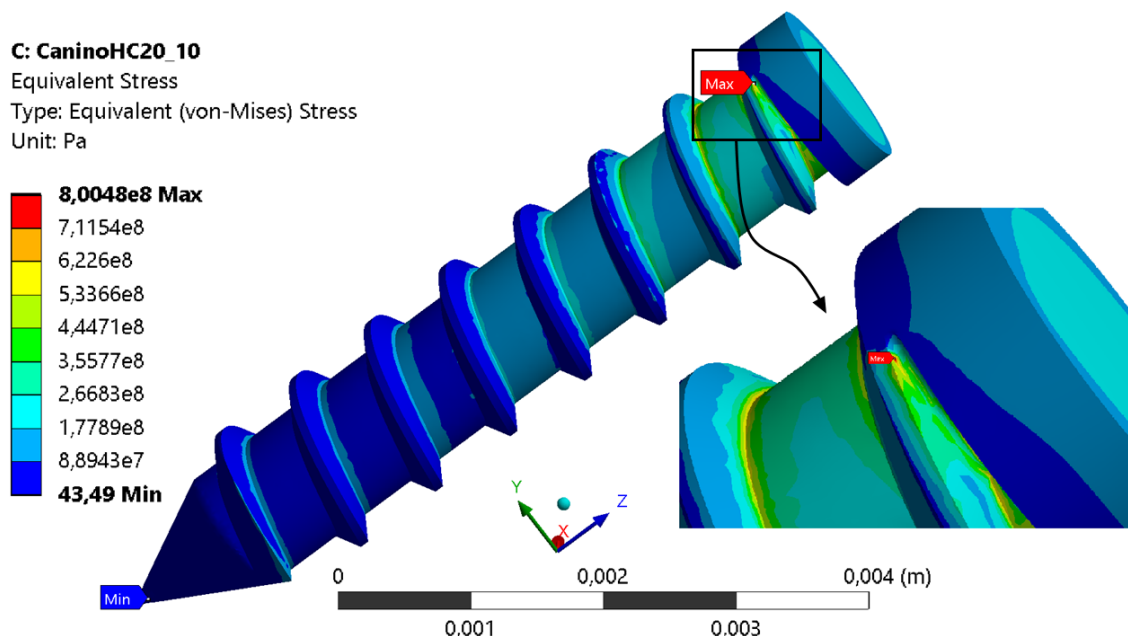


Figura 5.5 – Distribuição da tensão de von Mises na parede do Parafuso HC inserido no dente canino [Pa].

Na figura 5.5 são apresentados os resultados para a tensão equivalente de von Mises do modelo em análise. Pode ser observado uma distribuição suave das tensões ao longo do parafuso. No detalhe, é apresentada a tensão máxima, com um valor próximo à 800 MPa, em uma região próxima de um concentrador de tensão (canto vivo).

Na Figura 5.6 são apresentados os resultados para o modelo tridimensional do parafuso HC inserido no dente incisivo.

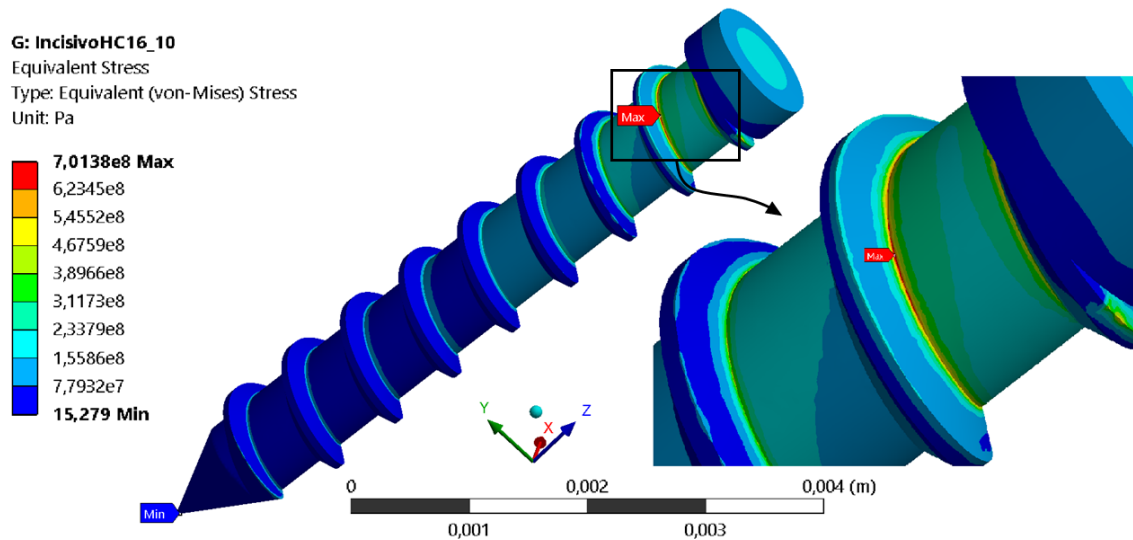


Figura 5.6 – Distribuição da tensão de von Mises na parede do Parafuso HC inserido no dente incisivo. [Pa].

Na figura 5.6 são apresentados os resultados para a tensão equivalente de von Mises do modelo em análise. Pode ser observado uma distribuição suave das tensões ao longo do parafuso, apresentando um máximo próximo a 700 MPa no primeiro filete do parafuso, representado no detalhe da figura.

Na Figura 5.7 são apresentados os resultados para o modelo tridimensional do parafuso HC inserido no dente molar.

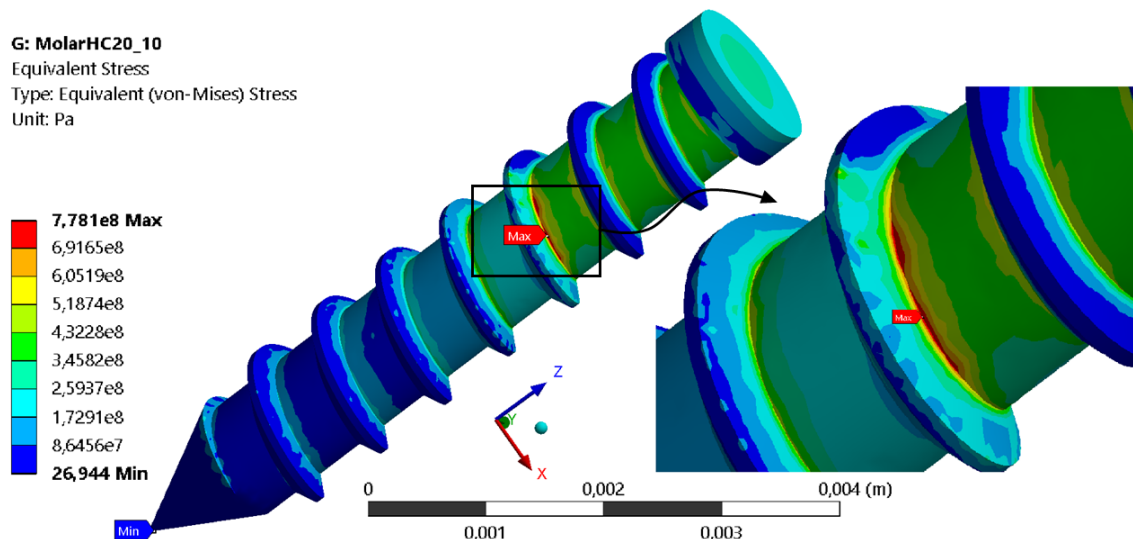


Figura 5.7 – Distribuição da tensão de von Mises na parede do Parafuso HC inserido no dente molar. [Pa].

Na figura 5.7 são apresentados os resultados para a tensão equivalente de von Mises do modelo em análise. Pode ser observado uma distribuição suave das tensões ao longo do parafuso, apresentando um máximo próximo a 780 MPa, no terceiro filete de rosca, representado no detalhe da figura.

A partir da tensão de escoamento do titânio, foi possível estimar o coeficiente de segurança do parafuso, em relação ao escoamento do material, para cada modelo estudado.

Para o modelo do parafuso HC inserido no dente canino, onde apresentou uma tensão máxima de von Mises de aproximadamente 800 MPa, o coeficiente de segurança estimado foi de 1.19. No modelo do parafuso HC inserido no dente incisivo, onde apresentou uma tensão máxima de von Mises de aproximadamente 700 MPa, o coeficiente de segurança estimado foi de 1.36. E no modelo do parafuso HC inserido no dente molar, onde apresentou uma tensão máxima de von Mises de aproximadamente 780 MPa, o coeficiente de segurança estimado foi de 1.22. Os coeficientes de segurança estimados para cada modelo analisado, mostram-se satisfatórios para o estudo, representando a aprovação do componente quanto ao critério de falha de escoamento, para cada caso analisado. Também é importante salientar, que a carga aplicada nos modelos, foi a de condição crítica de exodontia para cada tipo de dente. Além da discussão dos resultados de tensão máxima obtidos, observa-se uma distribuição das tensões uniformemente distribuídas ao longo do dente, demonstrando uma homogeneidade nos resultados. Como o esperado, se observou concentradores de tensão no cantos vivos, onde se tomou o cuidado de refinar a malha do modelo para obter gradientes de tensão adequados.

Portanto, de acordo com a metodologia empregada no estudo de projeto e análise do parafuso extrator dentário, a geometria de rosca HC, mostra-se adequada para o projeto, resistindo às condições críticas de cada caso analisado.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho é proposta uma metodologia numérica para definir a rosca de um parafuso a ser utilizado em um dispositivo extrator de dentes, onde chegou-se a definição do perfil e das dimensões da rosca. Devido as características particulares do material no qual é inserido o parafuso, foi necessário buscar em uma primeira etapa um perfil de rosca que promovesse uma boa distribuição de tensões. A partir da definição deste perfil, foi possível fazer uma análise de tensões para verificar a funcionalidade mecânica de resistência aos esforços submetidos na rosca do parafuso.

Com os modelos bidimensionais, foi possível avaliar qualitativamente o comportamento das tensões na parede do dente, e identificar a melhor geometria de rosca do parafuso, que contém os menores picos de tensão. Este estudo mostrou-se essencial para determinar o perfil de rosca que apresenta o melhor comportamento quanto à fixação do parafuso no dente, pois para a extração ser bem sucedida, é necessário que o parafuso esteja fixado ao dente durante todo o processo de exodontia, e não cause a prematura falha do dente. Com esta análise, selecionou-se a geometria de rosca, denominada HC, para o parafuso extrator dentário. Esta geometria apresenta o melhor comportamento avaliando-se a tensão principal na parede da dentina.

Os modelos tridimensionais, por sua vez, permitiram analisar o comportamento das tensões no parafuso extrator, avaliando os níveis de tensões que o componente estaria submetido nas condições críticas de extração dos três tipos de dentes estudados. Nestes, foi possível incorporar efeitos provenientes da não simetria dos dentes, que podem ter mais de uma raiz, e do carregamento. A partir da análise da distribuição das tensões equivalentes de von Mises, o parafuso com perfil HC mostrou-se adequado para aplicação em todas as condições estudadas nas análises.

Entretanto, apesar de ter sido realizada uma análise considerada conservativa, deve-se ressaltar que os resultados aqui obtidos devem ser validados experimentalmente através de ensaios mecânicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A Titan Instrument. "**Osseous Technologies of America: easy x-trac system**". California, EUA: -, 2011. 82p.
- Amarante, J. E. V. "**Análise da distribuição de tensões em diferentes terminações cervicais de coroas unitárias totalmente cerâmicas**". Dissertação de mestrado, Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2003.

- ANSYS, R. **"ANSYS Mechanical APDL Product Release 13 (2012)"**. Canonsburg, Pennsylvania: Ansys Inc., 2012.
- Anusavice, K. J. **"Philips Materiais Dentários"**. 12. ed. Brasil: Elsevier, 2013. 580p.
- ARCAM AB. **"Ti6Al4V Titanium Alloy EBM system"**. Mölndal, Sweden: [s.n.], 2016. 3p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM F543-6808**. Standard Specification and Test Methods for Metallic Medical Bone Screws. Annual Book of ASTM STANDARDS. West Conshohocken, PA, United States: [s.n.], 2013. 112-130p.
- Carneiro, T., Neto, M., André, N., Magalhães, A. **"Exodontia atraumática com uso de extrator dentário e instalação imediata de implante em região anterior da maxila"**. Revista Bahiana de Odontologia, v.5, p.160–166, 2014.
- Chun, K., Choi, H., Lee, J. **"Comparison of mechanical property and role between enamel and dentin in the human teeth"**. Journal of dental biomechanics, v.5, p.1758736014520809, 2014.
- Gregori, C. **"Cirurgia odontológica para clínico geral"**. São Paulo: Sarvier, 1988. 218p.
- Locher, M. **"Kräftemessihgen bei Zahnextraktionen mit dem Benex-Extraktor"**. Zurich, 2010.
- Lotti, R., Machado, A., Mazzeiro, E., Landre JR, J. **"Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos"**. Revista Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial, Maringá - PR, Brasil, v.11, n.2, p.35 – 43, 2006.
- Madeira, M. C. **"Anatomia do dente"**. 5. ed. Brasil: Sarvier, 2007. 148p.
- Medesy Engineering. **"Exomed"**. Maniago, Itália: -, 2013.
- Niimoni, M. **"Mechanical properties of biomedical titanium alloys"**. Materials Science and Engineering: A, Japan, v.243, n.1, p.231–236, 1998.
- Patil, S., Rakhewar, P., Doiphode, S. **"Strategic extraction: an unexampled epitome altering our profession"**. Journal of Dental Implants, Aurangabad, India, v.2, n.2, p.121, 2012.
- Selna, L., Hhillingburg, H., Kerr, P., Spivey, J. **"Finite Element Analysis of Dental Structures - Axisymmetric and Plane Stress Idealizations"**. Journal of Biomedical Materials Research, California, USA, v.9, p.237–252, 1975.
- Sun, X., Witzel, E., Bian, H., Kang, S. **"3-D finite element simulation of ultrasonic propagation in tooth"**. Journal of dentistry, v.36, n.7, p.546 – 553, 2008.
- Syfrig, B. **"Interdisziplinäre tagung dentoalveoläre traumatologie"**. Praxis für Oralchirurgie und Implantologie, Luzern, Schweiz, 2007.
- Thomé, G., Bernardes, S., Castro, C., Ribas, G., Golin, A. **"Indicações e limitações do uso do extrator dentário"**. ILAPEO, Curitiba-PR, Brasil, v.6, n.2, p.85–88, 2012.
- Vasco, M., Castellano, M., López, J., Casas, E. **"Utilização de tomografias computadorizadas de baixa resolução para construção de modelos geométricos detalhados de mandíbulas com e sem dentes"**. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Espanha, v.32, n.1, p.1–6, 2014.
- Williamson, L., Fotos, P., Goel, V., Spivey, J. **"A Three-Dimensional Finite-Element Stress Analysis of an Endodontically Prepared Maxillary Central Incisor"**. Journal of Endodontics, USA, v.21, n.7, p.362–367, 1995.

APÊNDICE A – REPRESENTAÇÃO DOS MODELOS BIDIMENSIONAIS

Na Figura A.1, são apresentados os modelos bidimensionais analisados, com suas respectivas malhas em elementos finitos. Na cor mais clara está representado os elementos da dentina, e na cor mais escura os elementos do parafuso. Foi empregado um refino de malha na região de contato, já que é a região mais crítica de análise. A fim de permitir um melhor funcionamento do contato tipo área-área, os nós da região de interface entre parafuso e dentina não são coincidentes, conforme recomendado pela literatura [ANSYS, 2012].

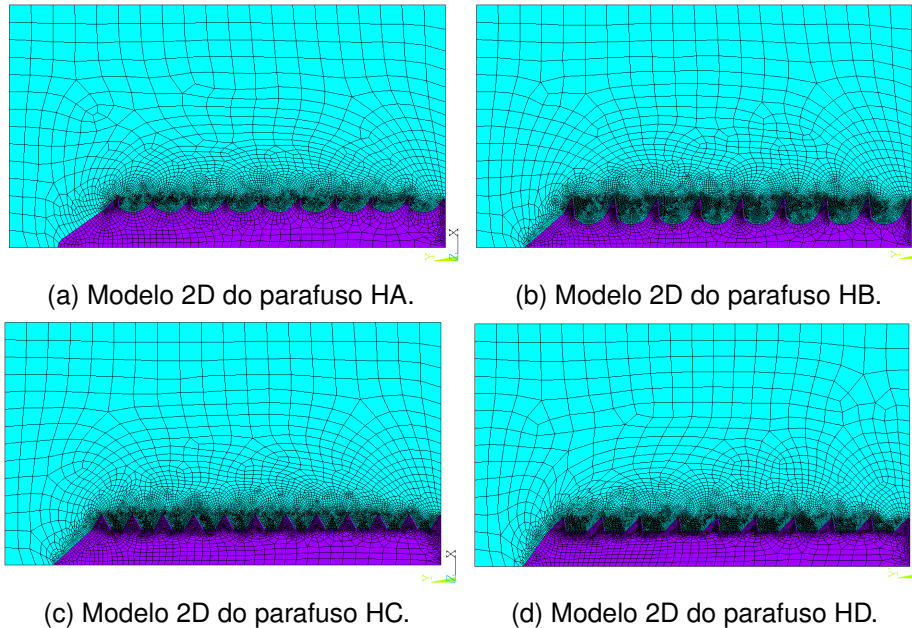


Figura A.1 – Representação da malha dos modelos bidimensionais.

APÊNDICE B – RESULTADOS DE CONTATO DOS MODELOS BIDIMENSIONAIS

Nesta seção, são retratados os resultados das simulações numéricas dos modelos bidimensionais, sendo apresentados resultados do status e distribuição de pressão de contato na região dente/parafuso. Os resultados de pressão de contato estão apresentados em Pa.

Na Figura B.1 é apresentado os resultados de pressão de contato, e em detalhe o status de contato, para o modelo bidimensional do parafuso HA.

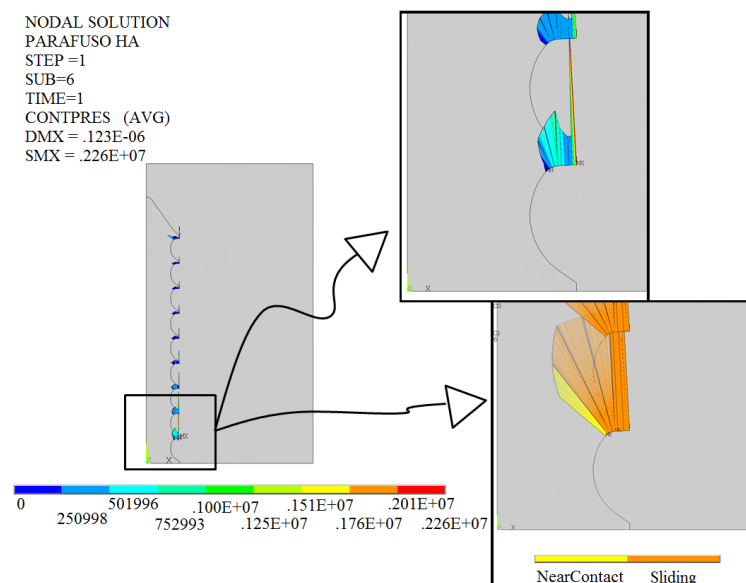


Figura B.1 – Status e pressão de contato dente/parafuso para o modelo 2D do parafuso HA.

Na Figura B.2 é apresentado os resultados de pressão de contato, e em detalhe o status de contato, para o modelo bidimensional do parafuso HB.

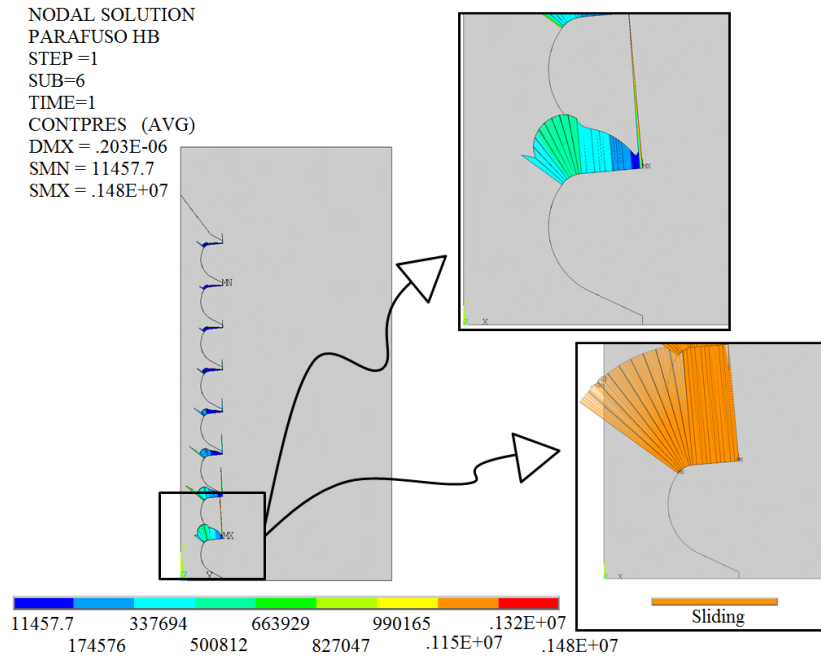


Figura B.2 – Status e pressão de contato dente/parafuso para o modelo 2D do parafuso HB.

Na Figura B.3 é apresentado os resultados de pressão de contato, e em detalhe o status de contato, para o modelo bidimensional do parafuso HC.

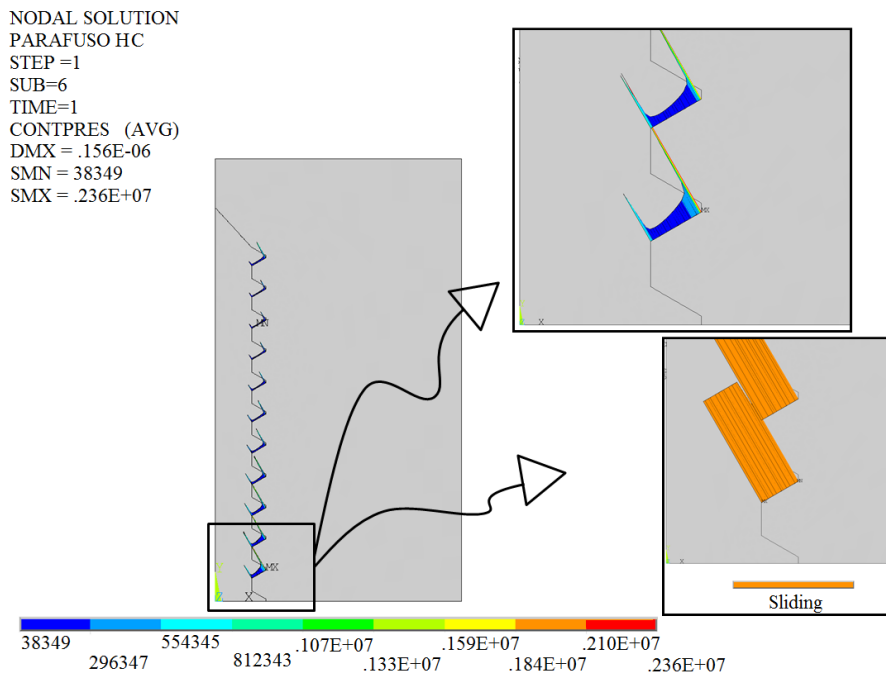


Figura B.3 – Status e pressão de contato dente/parafuso para o modelo 2D do parafuso HC.

Na Figura B.4 é apresentado os resultados de pressão de contato, e em detalhe o status de contato, para o modelo bidimensional do parafuso HD.

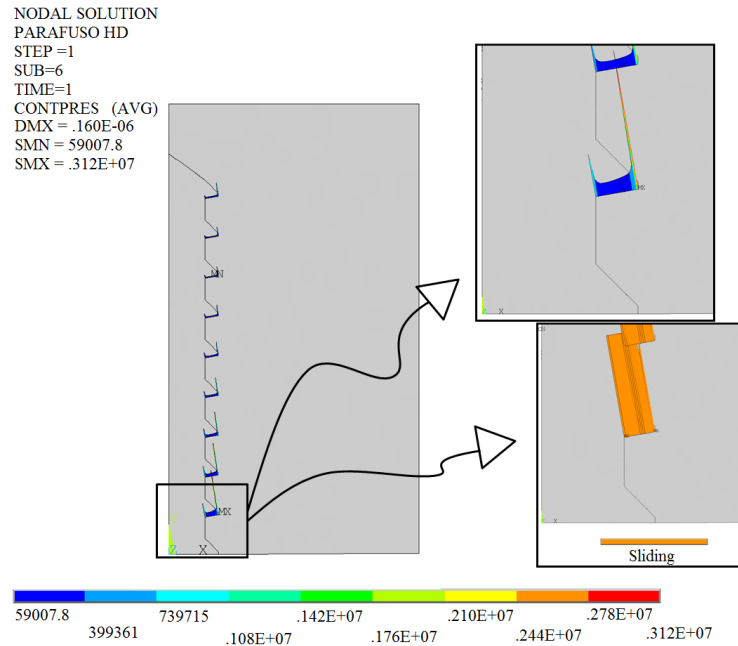
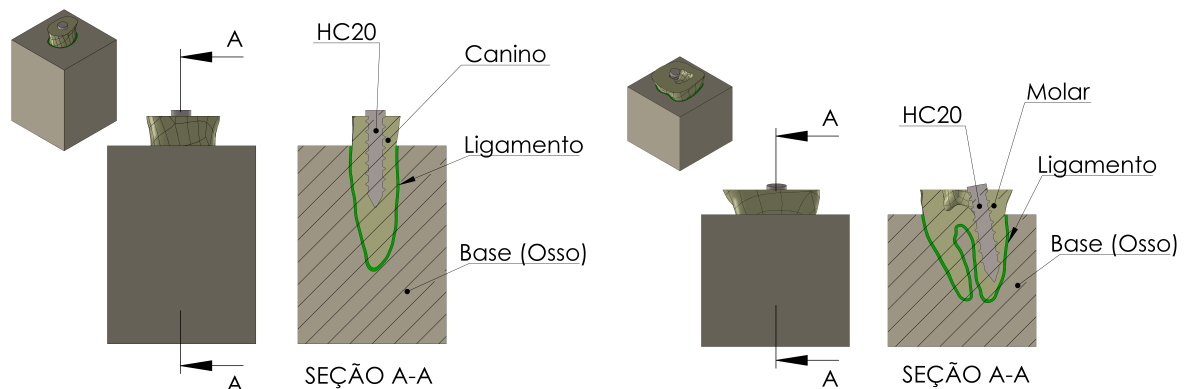


Figura B.4 – Status e pressão de contato dente/parafuso para o modelo 2D do parafuso HD.

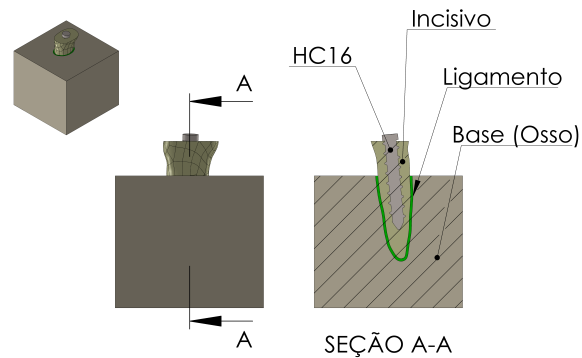
A partir de uma análise dos resultados de pressão de contato, verifica-se máximas nas regiões na crista dos primeiros filetes do parafuso, possivelmente causados por concentradores de tensões nas regiões em destaque. Em todos os modelos, o contato se manteve predominantemente em deslizamento.

APÊNDICE C – REPRESENTAÇÃO DOS MODELOS CAD TRIDIMENSIONAIS

A fim de representar como foram configurados os modelos utilizados nas simulações tridimensionais, de forma ilustrativa, está representado na FiguraC.1 o parafuso HC inserido em cada um dos tipos de dentes analisados.



- (a) Dente canino com parafuso HC de 2 mm de diâmetro externo (d_1) e 10 mm de comprimento total.
- (b) Dente molar com parafuso HC de 2 mm de diâmetro externo (d_1) e 10 mm de comprimento total.



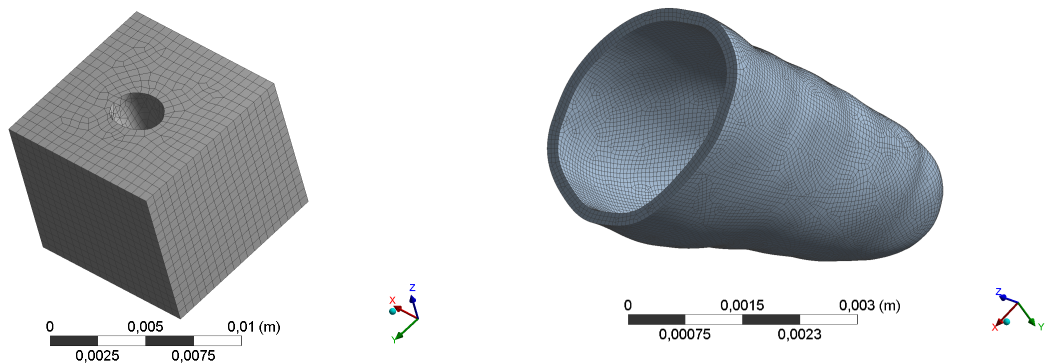
(c) Dente incisivo com parafuso HC de 1.6 mm de diâmetro externo (d_1) e 10 mm de comprimento total.

Figura C.1 – Representação dos modelos CAD utilizados nas simulações tridimensionais

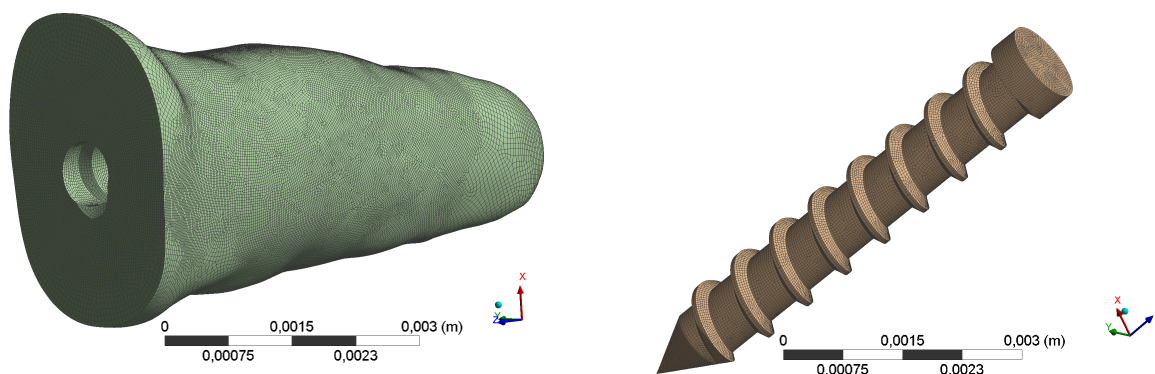
Pode ser observado na Figura C.1 a forma como foi realizada a inserção do parafuso no dente, seguindo o caminho da polpa e da maior raiz, quando havia mais que uma.

APÊNDICE D – REPRESENTAÇÃO DA MALHA DOS MODELOS TRIDIMENSIONAIS

A fim de representar a malha em elementos finitos utilizada nos modelos numéricos tridimensionais, é apresentado na Figura D.1 um exemplo de malha utilizada nas simulações tridimensionais. É apresentado o exemplo do parafuso HC inserido no dente incisivo. Foi utilizado parâmetros para a construção da malha a fim de quem em todos os modelos fosse obtido configurações similares.



(a) Malha do modelo representando o osso cortical. (b) Malha do modelo representando o ligamento periodontal.



(c) Malha do modelo representando o dente incisivo.

(d) Malha utilizada para o modelo do parafuso HC.

Figura D.1 – Exemplo da malha em elementos finitos utilizados nas simulações tridimensionais: Parafuso HC inserido no incisivo.

Na Figura D.1a é apresentado a malha no modelo representativo do osso cortical. Na Figura D.1b é apresentado a malha do modelo representativo do ligamento periodontal. Na Figura D.1c é apresentado a malha do modelo representativo do dente incisivo. Na Figura D.1d é apresentado a malha do modelo representativo do parafuso HC com 1.6 mm de diâmetro.

ANEXO I – DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS DAS GEOMETRIAS DOS PARAFUSOS

Neste anexo estão apresentadas informações sobre as dimensões características das geometrias de roscas dos parafusos apresentadas no presente estudo, obtidas da norma para fixação de ossos. Na Tabela I.1 estão apresentadas dimensões características de alguns tipos de roscas dos parafusos HA, HB, HC e HD, respectivamente.

Tabela I.1 – Dimensões [mm] de parafusos normalizados para fixação de ossos [ASTM F543-6808, 2013].

Tipo	Tamanho	Diâmetro da rosca, d_1	Diâmetro do núcleo, d_5	Espessura da crista, e	Passo, P	Raio de ataque, r_4	Raio de fuga r_5
HA	1.5	1.50	1.10	0.1	0.50	0.3	0.1
	2.0	2.00	1.30	0.1	0.60	0.4	0.1
	2.7	2.70	1.90	0.1	1.00	0.6	0.2
	3.5	2.50	2.40	0.1	1.25	0.8	0.2
	4.0	4.00	2.90	0.1	1.50	0.8	0.2
	4.5	4.50	3.00	0.1	1.75	1.0	0.3
	5.0	5.00	3.50	0.1	1.75	1.0	0.3
HB	4.0	4.00	1.90	0.1	1.75	0.8	0.3
	6.5	6.50	3.00	0.2	2.75	1.2	0.8
HC	2.9	2.79 - 2.90	2,03 - 2,18	0.1	1.06	-	-
	3.5	3.43 - 3.53	2,51 - 2,64	0.1	1.27	-	-
	3.9	3,78 - 3,91	2,77 - 2,92	0.1	1.27	-	-
	4.2	4,09 - 4,22	2,95 - 3,25	0.1	1.27	-	-
HD	4.0	3,97 - 4,03	2,89 - 2,95	0.1	1.59	-	-
	4.5	4,47 - 4,53	2,89 - 2,95	0.1	2.18	-	-

Além das informações presentes na Tabela I.1, as geometrias HA, HB e HD apresentam, respectivamente, ângulo de ataque (α) igual a 35° , 25° e 45° . Além disso, apresentam respectivamente, ângulo de fuga (β) igual a 3° , 5° e 10° .