

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL METALÚRGICA DE VOLTA REDONDA

POLO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA

PEDRO ARAÚJO DA COSTA WARD

**Simulações numéricas de
comportamento mecânico de
implantes dentários cerâmicos à base
de Y-TZP e Ce-TZP/ Al_2O_3**

Área de Concentração:

Processamento e Caracterização de Materiais

Linha de Pesquisa: Biomateriais

Orientador:

Prof. Claudinei dos Santos, UFF/UERJ

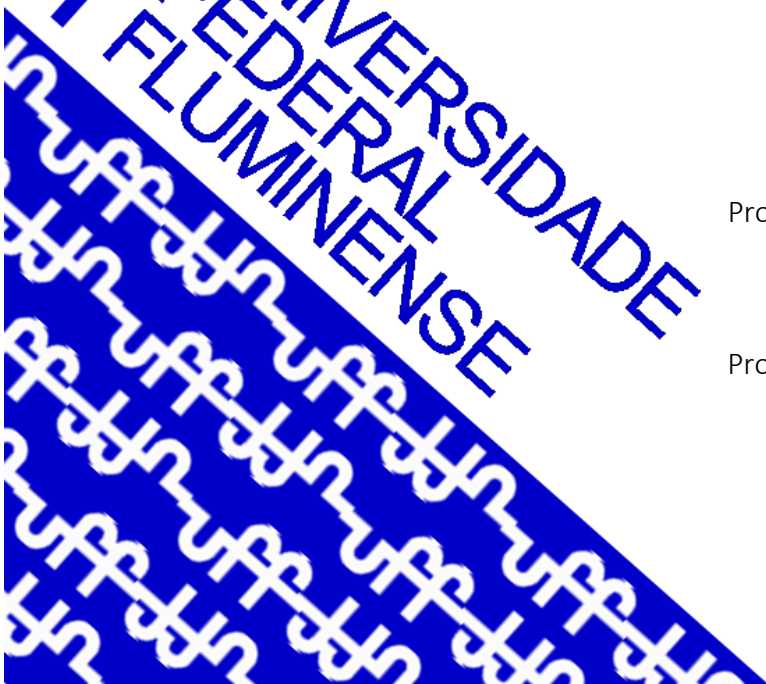
Coorientador:

Prof. Luciano Pessanha Moreira, PhD

VOLTA REDONDA – RJ

2022

UNIVERSIDADE
FEDERAL
FLUMINENSE



PEDRO ARAÚJO DA COSTA WARD

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Metalúrgica, da Universidade Federal Fluminense, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica. Área de concentração: Processamento e caracterização de materiais.

“Simulações numéricas de comportamento mecânico de implantes dentários cerâmicos à base de Y-TZP e Ce-TZP/Al₂O₃ ”

Orientador: Prof. Claudinei dos Santos, D.Sc.

Coorientador: Prof. Luciano Pessanha Moreira, PhD

Área de concentração: **Processamento e caracterização de materiais**

Volta Redonda, RJ

2022

Ficha catalográfica automática - SDC/BEM
Gerada com informações fornecidas pelo autor

W262s Ward, Pedro Araújo da Costa
Simulações numéricas de comportamento mecânico de
implantes dentários cerâmicos à base de Y-TZP e Ce-TZP/Al2O3
/ Pedro Araújo da Costa Ward. - 2022.
135 f.

Orientador: Claudinei dos Santos.
Coorientador: Luciano Pessanha Moreira.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Escola de Engenharia Industrial e Metalúrgica de Volta
Redonda, Volta Redonda, 2022.

1. Implantes dentários. 2. Material biocompatível. 3.
Compósito. 4. Simulação numérica. 5. Produção
intelectual. I. Santos, Claudinei dos, orientador. II.
Moreira, Luciano Pessanha, coorientador. III. Universidade
Federal Fluminense. Escola de Engenharia Industrial e
Metalúrgica de Volta Redonda. IV. Título.

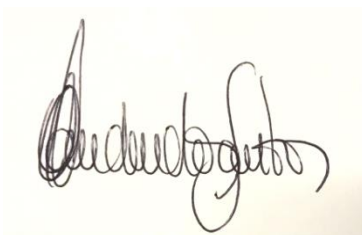
CDD - XXX

PEDRO ARAÚJO DA COSTA WARD

“Simulações numéricas de comportamento mecânico de implantes dentários cerâmicos à base de Y-TZP e Ce-TZP/ Al_2O_3 ”

Aprovado em 26 de outubro de 2022.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Claudinei dos Santos, D.Sc. – Orientador

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ-FAT / Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Roberto Oliveira Magnago D. Sc.

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ



Profª. Maria Carolina dos Santos Freitas, D.Sc.

Universidade Federal Fluminense - UFF

Volta Redonda

2022

Dedico este trabalho a minha amada esposa, Thielly, eterna companheira em minha jornada de crescimento e desafios.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela minha vida e por colocar pessoas especiais nela, que sempre me ajudam e me incentivam em meu crescimento pessoal e profissional.

À minha esposa, Thielly Machareth Ward, presente em todos os dias da minha vida, me incentivando sempre a me tornar cada dia melhor.

Aos meus pais, José e Ana Maria Ward, que sempre fizeram o possível e impossível para que eu pudesse me tornar o que sou hoje.

Aos meus irmãos, Fernando e Rafael Ward, melhores amigos desde o principio e por toda a minha vida.

A todos os meus avós, que carrego até hoje seus ensinamentos e a certeza de que continuam orando e cuidando de mim.

A minha sogra, Marli Machareth, por toda sua ajuda e por sua confiança em me permitir compartilhar a vida com sua filha.

Ao meu orientador, Prof^o Dr. Claudinei dos Santos, por toda ajuda, ensinamentos e amizade ao longo da graduação e pós-graduação.

Ao meu coorientador, Prof^o Dr. Luciano Pessanha Moreira por todos os ensinamentos e conselhos que levarei para vida acadêmica e profissional.

Aos colegas Ingrid Coutinho, Paula Cipriano e Manuel Fellipe Alves, pelo apoio na realização e discussão dos resultados de propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos.

A Universidade Federal Fluminense (UFF), Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), CNPq, FAPERJ e CBPF pelo incentivo e infraestrutura disponibilizados.

“Se você quer chegar aonde a maioria
não chega, faça o que a maioria não faz.”

Bill Gates

RESUMO

Este estudo baseia-se na simulação numérica da resposta mecânica de implantes dentários de cerâmica de zircônia estabilizada com ítrio (3Y-TZP) e de compósitos cerâmicos à base de zircônia estabilizada com Cério e reforçada com alumina $ZrO_2(CeO_2)-Al_2O_3$ em função de sua geometria intrínseca e de diferentes cargas mastigatórias. Amostras cerâmicas foram compactadas, sinterizadas a 1500 °C - 2h e caracterizadas por difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura e densidade relativa. A resistência à flexão foi obtida usando o teste de pistão em três esferas (P-3B). Desenhos autorais de implante dentários (incisal e molar) e, para fins de comparação, modelos CAD de implantes comerciais foram usados neste estudo como uma geometria inicial de implante aplicados em uma anatomia de mandíbula adulta típica. A partir das técnicas CAD e CAE, foram gerados modelos de elementos finitos para todas as geometrias de implantes. Os casos de carga mastigatória foram considerados com base em diferentes intensidades (100 a 500N) e ângulos de orientação (45° ou 90°) para reproduzir os esforços mastigatórios humanos. As previsões numéricas foram comparadas com simulações de elementos finitos de implantes de titânio considerados padrão-ouro. As cerâmicas sinterizadas 3Y-TZP e Ce-TZP/ Al_2O_3 apresentaram alta densificação, dureza de 1325 HV e 1427 HV, além de tenacidade à fratura de 7,2 MPa.m^{1/2} e 11,3 MPa.m^{1/2} foram obtidas para cerâmicas 3Y-TZP e Ce-TZP/ Al_2O_3 , respectivamente. A resistência à flexão média do 3Y-TZP e Ce-TZP/ Al_2O_3 obtidas foram de 1192 MPa e 860,7 MPa respectivamente. Para ambas as geometrias de implantes dentários, independente do valor da carga mastigatória ou do ângulo de orientação, todas as previsões de elementos finitos são 50% inferiores aos valores estabelecidos pelo critério de falha de Mohr Coulomb, mesmo considerando o estudo de perda de propriedades ósseas até 80 anos de idade, permitindo viabilizar, preliminarmente, as cerâmicas propostas para aplicações de implantes dentários sem risco de fratura.

Palavras-chave: Implantes dentários, cerâmica 3Y-TZP, compósito Ce-TZP/ Al_2O_3 , resistência à flexão, simulação numérica, método dos elementos finitos.

ABSTRACT

This study is based on the numerical simulation of dental implants' mechanical response made of yttrium-stabilized zirconia (3Y-TZP) and ceramic composites based on Zirconia ceria-stabilized reinforced with alumina $ZrO_2(CeO_2)-Al_2O_3$ as a function of their intrinsic geometry and different masticatory loads. Ceramic samples were compacted, sintered at 1500 °C - 2h and characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy and relative density. The Flexural strength was obtained using the three-ball piston test (P-3B). Authorial dental implant drawings (incisal and molar), for comparison purposes, and CAD models of commercial implants were used in this study as an initial implant geometry applied to a typical adult mandible anatomy. Using CAD and CAE techniques, finite element models were generated for all implant geometries. Masticatory load cases were considered based on different intensities (100 to 500N) and orientation angles (45° or 90°) to reproduce human masticatory efforts. Numerical predictions were compared with finite element simulations considering titanium as gold-standard implants. The 3Y-TZP and Ce-TZP/ Al_2O_3 sintered ceramics showed high densification. Hardness of 1325 HV and 1427 HV, besides 7,2 $MPa \cdot m^{1/2}$ and 11,3 $MPa \cdot m^{1/2}$ fracture toughness were obtained for 3Y-TZP and Ce-TZP/ Al_2O_3 ceramics, respectively. The average flexural strength of 3Y-TZP and Ce-TZP/ Al_2O_3 obtained were 1192 MPa and 860,7 MPa respectively. For both dental implant geometries, and independent of the value of the masticatory load or orientation angle, all finite element predictions are 50% lower than the corresponding limits of the Mohr Coulomb failure criteria, in spite of considering bone properties degradation until 80 years old, allowing preliminary feasibility of the proposed ceramics for dental implant applications without risk of fracture.

Keywords: Dental implants, 3Y-TZP ceramic, Ce-TZP/ Al_2O_3 composite, flexural strength, numerical simulation, finite element method.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS	11
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE FIGURAS.....	15
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	20
2. OBJETIVO GERAL	22
2.1. Objetivos Específicos	22
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1. Materiais cerâmicos.....	23
3.1.1. Zircônia tetragonal estabilizada com 3% em mol de ítria (3Y-TZP)	24
3.1.2. Zircônia policristalina tetragonal estabilizada com CeO ₂ (Ce-TZP).....	25
3.1.3. Compósitos Cerâmicos	26
3.1.4. Zircônia policristalina tetragonal estabilizada com CeO ₂ (Ce-TZP/Al ₂ O ₃).....	26
3.2. Implantes dentários	27
3.3. Arcada dentária.....	28
3.4. Sequência cirúrgica de implantação.....	28
3.6. Metodologia da simulação pelo Método dos Elementos Finitos (MEF)	30
3.7. Malha de elementos finitos (Discretização)	31
3.8. Critérios de falha elástica e ruptura	33
3.8.1. Teoria da Tensão Normal Máxima	33
3.8.2. Teoria de von Mises.....	34
3.8.3. Teoria de Mohr-Coulomb.....	34
4. MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1. Materiais	36
4.2. Processamento Cerâmico.....	37
4.2.1. Caracterização de amostras sinterizadas.....	37
4.2.2. Propriedades mecânicas.....	38
4.3. Efeito do envelhecimento ósseo.....	41
4.4. Simulação Numérica - Metodologia	43
4.4.1.1. Mandíbula simplificada.....	44
4.4.1.2. Modelos geométricos comerciais.....	47
4.4.1.3. Modelos geométricos autorais.....	48

4.4.2. Análise pelo método de elementos finitos	50
4.4.2.1. Modelos para elementos finitos.....	50
4.4.2.2. Discretização e malha de elementos finitos	54
4.4.2.3. Condições de contorno.....	57
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1. Caracterizações de amostras sinterizadas	59
5.2. Propriedades mecânicas.....	65
5.3. Simulações Numéricas	66
5.3.1. Implante localizado no terceiro molar	67
5.3.2. Implante para incisivo central.....	71
5.3.3. Estudo de envelhecimento ósseo.....	75
6. CONCLUSÕES.....	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
ANEXO I: Resultados para o Critério de Tensão Max Principal em MPa	95
ANEXO II: Resultados para o Critério de Tensão Min Principal em MPa	102
ANEXO III: Resultados para o Critério de von Mises em MPa	109
ANEXO IV: Resultados para o Critério de von Mises (Adimensional).....	113
ANEXO V: Resultados para o Critério de Mohr Coulomb (Adimensional)	117
ANEXO VI: Distribuição de tensões para terceiro molar (Até 50 anos).....	124
ANEXO VII: Distribuição de tensões para incisivo central (Até 50 anos).....	127
ANEXO VIII: Distribuição de tensões para terceiro molar (80 anos)	130
ANEXO IX: Distribuição de tensões para incisivo central (80 anos)	133

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

τ = tensão cisalhante

σ_{vm} = tensão equivalente de von Mises

σ_1 = tensão máxima principal

σ_2 = tensão média principal

σ_3 = tensão mínima principal

°C = graus celsius

a = comprimento da diagonal de recuo

Al_2O_3 = óxido de alumínio

ASTM = *American Society for Testing and Materials*

b = espessura do corpo de prova

CAD = *computer-aided-design*

CAE = *computer-aided-engineering*

CAM = *computer-aided-manufacturing*

CeO_2 = óxido de cério

Ce-TZP/ Al_2O_3 = compósito de zircônia tetragonal estabilizada com dióxido de cério

cm^3 = centímetros cúbicos

DRX = difração de raio x

E = módulo de elasticidade (ou módulo de Young)

E(p) = modulo de elasticidade do corpo com poros

E_0 = modulo de elasticidade do corpo inicial (sem poros)

F = carga mastigatória

f = carga de ruptura

Fe_2O_3 = óxido de ferro

X_M = fração de fase monoclinica

g = gramas

Gb = gigabytes

GHz = gigahertz

GPa = giga pascal

HfO₂ = óxido de háfnio

HV = dureza vickers

ISO = *International Organization for Standardization*

l o comprimento da trinca gerada pela marca de recuo Vickers (mm)

m = módulo de Weibull

MgO = óxido de magnésio

mm = milímetros

MnO = óxido de manganês

MOD = modelo

MoSi₂ = dissiliceto de molibdênio

MPa = mega pascal

N = newton

Ø = diâmetro

P = carga aplicada

p = porosidade absoluta do corpos

TZP = policristais de zircônia tetragonal

LVDT = transdutor diferencial linear variável

ppm = partícula por milhão

r₁ = raio do círculo de suporte

r₂ = raio da área carregada

r₃ = raio da amostra

RAM = *random access memory*

σ_f = resistência à flexão máxima

s = segundos

s = fator experimental dependente dos poros

Si_3N_4 = nitreto de silício

SiC = carbeto de silício

SrO = óxido de estrôncio

stl = estereolitografia

K_{IC} = tenacidade à fratura por indentação, IF,

TiO_2 = dióxido de titânio

UERJ = Universidade do Estado do Rio de Janeiro

UFF = Universidade Federal Fluminense

Y_2O_3 = óxido de ítrio

Y-OH = hidreto de ítria

Y-TZP = zircônia estabilizada com ítria

PSZ = zircônia parcialmente estabilizada

FSZ = zircônia totalmente estabilizada

ZrO_2 = dióxido de zircônio

Θ = ângulo de aplicação de carga

ν = coeficiente de Poisson

ρ = densidade

σ = tensão normal

σ_{uc} = limite de ruptura à compressão

σ_{ut} = limite de ruptura à tração

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Especificação dos pós iniciais utilizados neste trabalho.	36
Tabela 4.2 - Propriedades dos materiais utilizados no sistema simulado.....	40
Tabela 4.3 - Limites de ruptura dos materiais utilizados no sistema simulado	41
Tabela 4.4 - Degeneração anual dos Módulos de Young dos ossos mandibulares, a partir dos 50 anos.	43
Tabela 4.5 - Detalhamento da malha de elementos finitos para os modelos 01, 03 e 05.....	54
Tabela 4.6 - Detalhamento da malha de elementos finitos para os modelos 02, 04 e 06.....	55
Tabela 4.7 - Detalhamento da malha de elementos finitos para os modelos 07, 09 e 11.....	55
Tabela 4.8 - Detalhamento da malha de elementos finitos para os modelos 08, 10 e 12.....	55
Tabela 5.1 - Refinamento de Rietveld das cerâmicas estudadas nesse trabalho.....	60
Tabela 5.2 - Propriedades mecânicas de amostras sinterizadas (1500°C - 2h).	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Campos de rigidez e dureza de cerâmicas de engenharia importantes. Fonte: (BASU, 2005).....	23
Figura 3.2 - Arcada dentária humana. Fonte: https://www.msdmanuals.com/pt-br/profissional/dist%C3%BArbios-odontol%C3%B3gicos/sintomas-de-problemas-dent%C3%A1rios-e-orais/m%C3%A1-oclus%C3%A3o	28
Figura 3.3 - Sequencia cirúrgica parte 1: a) Primeira marcação do local; b) Marcação do eixo do implante; c) Primeira perfuração completa; d) Primeiro alargamento de diâmetro; e) Segundo alargamento de diâmetro; f) Terceiro alargamento de diâmetro; g) Utilização de broca de perfil; h) Rosqueamento. Fonte: STRAUMANN, 2019	29
Figura 3.4 - Sequencia cirúrgica parte 2: a) Inserção do implante; b) Colocação do implante. Fonte: STRAUMANN, 2019	29
Figura 3.5 - Sequencia cirúrgica parte 3: a) Inserção do implante; b) Remoção do transportador; c) Remoção dos instrumentos. Fonte: STRAUMANN, 2019	30
Figura 3.6 - Sequencia cirúrgica parte 4: Inserção de parafuso de fecho, tampa de cicatrização ou pilar de cicatrização. Fonte: STRAUMANN, 2019.....	30
Figura 3.7 - Tipos de soluções para cálculo estrutural. Fonte: ALVES FILHO, 2013	31
Figura 3.8 - Estrutura reticulada de vigas e seu modelo simplificado. Fonte: ALVES FILHO, 2013.....	32
Figura 3.9 - Elemento linear, de superfície e sólido, respectivamente. Fonte: ALVES FILHO, 2013.....	32
Figura 3.10 - Região de risco de falha pelo critério de Mohr-Coulomb. Fonte: YOUNG et al., 2002.....	35
Figura 4.1 - Fluxograma de desenvolvimento dos modelos geométricos. Fonte: Próprio autor.....	44
Figura 4.2 - Geometria inicial da mandíbula humana. Fonte: Próprio autor.....	45

Figura 4.3 - Geometria da mandíbula humana simplificada pelo autor. Fonte: Próprio autor.	46
Figura 4.4 – Impressão por estereolitografia do modelo geométrico da mandíbula humana. Fonte: Próprio autor.	46
Figura 4.5 - Implante comercial para 3º molar em: (a) vista isométrica; (b) vista superior; (c) detalhamento em 2D. Fonte: Próprio autor.	47
Figura 4.6 - Implante comercial para incisivo central em: (a) vista isométrica; (b) vista superior; (c) detalhamento em 2D. Fonte: Próprio autor.	47
Figura 4.7 - Vista em corte do implante comercial. Fonte: Próprio autor.	48
Figura 4.8 - Proposta de implante autoral para 3º molar em: (a) vista isométrica; (b) vista superior; (c) detalhamento em 2D. Fonte: Próprio autor.	49
Figura 4.9 - Proposta de implante autoral para incisivo central em: (a) vista isométrica; (b) vista superior; (c) detalhamento em 2D. Fonte: Próprio autor.	49
Figura 4.10 - Vista em corte do implante proposta / autoral. Fonte: Próprio autor.	49
Figura 4.11 - Destaque para as regiões do terceiro molar* e incisivo central** na mandíbula. Fonte: Próprio autor.	50
Figura 4.12 - Destaque para as regiões do terceiro molar e incisivo central na mandíbula. Fonte: Próprio autor.	51
Figura 4.13 - Modelo geométrico analisado para os Modelos 01, 03 e 05 (MOD01, MOD03 e MOD05 da Figura 4.12): (a) modelo completo; (b) implante e osso cortical; (c) implante e osso esponjoso; (d) modelo completo destacando o implante comercial. Fonte: Próprio autor.	51
Figura 4.14 - Modelo geométrico analisado para os Modelos 02, 04 e 06: (a) modelo completo; (b) implante e osso cortical; (c) implante e osso esponjoso; (d) modelo completo destacando o implante proposta / autoral. Fonte: Próprio autor.	52
Figura 4.15 - Modelo geométrico analisado para os Modelos 07, 09 e 11: (a) modelo completo; (b) modelo completo destacando o implante comercial. Fonte: Próprio autor.	52

Figura 4.16 - Modelo geométrico analisado para os Modelos 08, 10 e 12: (a) modelo completo; (b) modelo completo destacando o implante proposta / autoral. Fonte: Próprio autor.....	52
Figura 4.17 - Seção fatiada da mandíbula simplificada coma carga mastigatória aplicada aos implantes comerciais. Fonte: Próprio autor.....	53
Figura 4.18 - Representação da carga externa aplicada ao implante comercial na simulação. Fonte: Próprio autor.....	54
Figura 4.19 - Malha de elementos finitos gerada para a região do terceiro molar. Fonte: Próprio autor.....	56
Figura 4.20 - Malha de elementos finitos gerada para a região do incisivo central. Fonte: Próprio autor.....	56
Figura 4.21 - Carga aplicada ao implante e condição de contorno na seção do 3º molar. Fonte: Próprio autor.....	57
Figura 4.22 - Carga aplicada ao implante e condição de contorno na seção do incisivo central. Fonte: Próprio autor.	58
Figura 5.1 - Difratomogramas de raios-X das amostras cerâmicas sinterizadas.: a) 3Y-TZP; b) Ce-TZP/Al ₂ O ₃ .	60
Figura 5.2 - Micrografias em MEV de cerâmicas 3Y-TZP sinterizadas,.....	62
Figura 5.3 - a) Micrografias em MEV de compósito Ce-TZP/Al ₂ O ₃ , b) distribuição de tamanho de grãos das amostras sinterizadas.	63
Figura 5.4 - (a) Mapeamento EDS do compósito Ce-TZP/Al ₂ O ₃ , destacando as plaquetas de Al ₂ O ₃ (fase escura), (b)detalhes da distribuição de grãos de zircônia ao redor de plaquetas de Al ₂ O ₃	65
Figura 5.5 - Diagramas e Weibull de cerâmicas 3Y-TZP e Ce-TZP/Al ₂ O ₃	66
Figura 5.6 - Resultados das simulações para implante do terceiro molar utilizando Titânio e 500 N de carga mastigatória. Implante comercial e 90°: (a) Max Principal; (b) Von Mises; (c) Min Principal. Implante comercial e 45°: (d) Max Principal; (e) Von Mises; (f) Min Principal. Implante autoral e 90°: (g) Max Principal; (h) Von Mises; (i) Min Principal. Implante autoral e 45°: (j) Max Principal; (k) Von Mises; (l) Min Principal. Fonte: Próprio autor.	68

Figura 5.7 - Resultados das simulações para implante do terceiro molar utilizando cerâmica 3Y-TZP e 500 N de carga mastigatória. Implante comercial e 90°: (a) Max Principal; (b) Mohr Coulomb; (c) Min Principal. Implante comercial e 45°: (d) Max Principal; (e) Mohr Coulomb; (f) Min Principal. Implante autoral e 90°: (g) Max Principal; (h) Mohr Coulomb; (i) Min Principal. Implante autoral e 45°: (j) Max Principal; (k) Mohr Coulomb; (l) Min Principal. Fonte: Próprio autor. 69

Figura 5.8 - Resultados das simulações para implante do terceiro molar utilizando cerâmica Ce-TZP/Al₂O₃ e 500 N de carga mastigatória. Implante comercial e 90°: (a) Max Principal; (b) Mohr Coulomb; (c) Min Principal. Implante comercial e 45°: (d) Max Principal; (e) Mohr Coulomb; (f) Min Principal. Implante autoral e 90°: (g) Max Principal; (h) Mohr Coulomb; (i) Min Principal. Implante autoral e 45°: (j) Max Principal; (k) Mohr Coulomb; (l) Min Principal. Fonte: Próprio autor. 70

Figura 5.9 - Resultados das simulações para implante do incisivo central utilizando Titânio e 500 N de carga mastigatória. Implante comercial e 90°: (a) Max Principal; (b) Von Mises; (c) Min Principal. Implante comercial e 45°: (d) Max Principal; (e) Von Mises; (f) Min Principal. Implante autoral e 90°: (g) Max Principal; (h) Von Mises; (i) Min Principal. Implante autoral e 45°: (j) Max Principal; (k) Von Mises; (l) Min Principal. Fonte: Próprio autor. 72

Figura 5.10 - Resultados das simulações para implante do incisivo central utilizando cerâmicas 3Y-TZP e 500 N de carga mastigatória. Implante comercial e 90°: (a) Max Principal; (b) Mohr Coulomb; (c) Min Principal. Implante comercial e 45°: (d) Max Principal; (e) Mohr Coulomb; (f) Min Principal. Implante autoral e 90°: (g) Max Principal; (h) Mohr Coulomb; (i) Min Principal. Implante autoral e 45°: (j) Max Principal; (k) Mohr Coulomb; (l) Min Principal. Fonte: Próprio autor. 73

Figura 5.11 - Resultados das simulações para implante do incisivo central utilizando cerâmicas Ce-TZP/Al₂O₃ e 500 N de carga mastigatória. Implante comercial e 90°: (a) Max Principal; (b) Mohr Coulomb; (c) Min Principal. Implante comercial e 45°: (d) Max Principal; (e) Mohr Coulomb; (f) Min Principal. Implante autoral e 90°: (g) Max Principal; (h) Mohr Coulomb; (i) Min Principal. Implante autoral e 45°: (j) Max Principal; (k) Mohr Coulomb; (l) Min Principal. Fonte: Próprio autor. 74

Figura 5.12 - Estudo de resultados para o critério de falha de Mohr Coulomb para implantes de terceiro molar comercial (MOD01) e autoral (MOD02) de 3Y-TZP com 500 N/90°. Fonte: Próprio autor 75

Figura 5.13 - Estudo de resultados para o critério de falha de Mohr Coulomb para implantes de terceiro molar comercial (MOD01) e autoral (MOD02) de 3Y-TZP com 500 N/45°. Fonte: Próprio autor	76
Figura 5.14 - Estudo de resultados para o critério de falha de Mohr Coulomb para implantes de terceiro molar comercial (MOD03) e autoral (MOD04) de Ce-TZP/Al ₂ O ₃ com 500 N/90°. Fonte: Próprio autor	76
Figura 5.15 - Estudo de resultados para o critério de falha de Mohr Coulomb para implantes de terceiro molar comercial (MOD03) e autoral (MOD04) de Ce-TZP/Al ₂ O ₃ com 500 N/45°. Fonte: Próprio autor	77
Figura 5.16 - Estudo de resultados para o critério de falha de von Mises para implantes de terceiro molar comercial (MOD05) e autoral (MOD06) de Titânio com 500 N/90°. Fonte: Próprio autor	77
Figura 5.17 - Estudo de resultados para o critério de falha de von Mises para implantes de terceiro molar comercial (MOD05) e autoral (MOD06) de Titânio com 500 N/45°. Fonte: Próprio autor	78
Figura 5.18 - Estudo de resultados para o critério de falha de Mohr Coulomb para implantes de incisivo central comercial (MOD07) e autoral (MOD08) de 3Y-TZP com 500 N/90°. Fonte: Próprio autor	78
Figura 5.19 - Estudo de resultados para o critério de falha de Mohr Coulomb para implantes de incisivo central comercial (MOD07) e autoral (MOD08) de 3Y-TZP com 500 N/45°. Fonte: Próprio autor	79
Figura 5.20 - Estudo de resultados para o critério de falha de Mohr Coulomb para implantes de incisivo central comercial (MOD09) e autoral (MOD10) de Ce-TZP/Al ₂ O ₃ com 500 N/90°. Fonte: Próprio autor	79
Figura 5.21 - Estudo de resultados para o critério de falha de Mohr Coulomb para implantes de incisivo central comercial (MOD09) e autoral (MOD10) de Ce-TZP/Al ₂ O ₃ com 500 N/45°. Fonte: Próprio autor	80
Figura 5.22 - Estudo de resultados para o critério de falha de von Mises para implantes de incisivo central comercial (MOD11) e autoral (MOD12) de Titânio com 500 N/90°. Fonte: Próprio autor	80
Figura 5.23 - Estudo de resultados para o critério de falha de von Mises para implantes de incisivo central comercial (MOD11) e autoral (MOD12) de Titânio com 500 N/45°. Fonte: Próprio autor	81

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Cerâmicas à base de zircônia tetragonal estabilizada com ítria, Y-TZP, são atrativas na odontologia devido a sua biocompatibilidade, inércia química, alta tenacidade à fratura e resistência à flexão, e resistência à adesão de placas bacterianas (KUNTZ, 2004). A busca por esses materiais de alta resistência mecânica envolve o desenvolvimento de materiais utilizando diferentes mecanismos de tenacificação. A zircônia exibe excelente combinação de resistência a flexão (1000 MPa) e boa tenacidade a fratura (7 a 9 MPa m^{1/2}) que geralmente são atribuídas a um mecanismo de tenacificação por transformação de fases via transformação tetragonal para monoclinica ($t \rightarrow m$) (BASU, 2005; LANGE, 1982; HANNINK et al., 2000; CHEVALIER et al., 2009) e conseqüentemente mecanismos de tenacificação por microtrincamento. Isso é conseqüência da expansão volumétrica e componente de tensão cisalhante associado à transformação $t \rightarrow m$, a qual leva a formação de microtrincas ao redor da ponta da trinca. Esses dois mecanismos são considerados associados, promovendo a tenacificação de ZrO₂ tetragonal estabilizada em ítria (Y-TZP). Um terceiro mecanismo efeito de domínio ferroelástico, ou ferroelasticidade, é a comutação mecânica de dois domínios diferentemente orientados sob uma carga aplicada, maior que a tensão crítica do material. Esse mecanismo foi estudado detalhadamente em Y-TZP sinterizada utilizando difração de nêutrons durante testes de compressão mecânica (KISI et al., 1997; MA et al., 1997).

Nos últimos anos, desde que as biocerâmicas Y-TZP começaram a ser utilizadas em aplicações dentárias no mercado, houve um aumento de mais de 12% ao ano (CHEVALIER, 2006). Um dos desafios é o design rosqueado que permite a ancoragem mecânica de implantes dentários no osso. Essa geometria é mais desafiadora para materiais cerâmicos por causa da concentração de tensões em pontas afiadas (ULLMAN, 1992). Atualmente, há, ao redor do mundo, há mais de 20 companhias produzindo implantes dentários de zircônia e cada empresa desenvolve seu processo, design e superfície para promover a ósseo integração (CHEVALIER, 2015). Várias investigações *in vitro* e *in vivo* estabeleceram a biocompatibilidade e potencial osteogênico para implantes de zircônia (JANNER, 2018). Entretanto, em pacientes de condições comprometidas (quantidade/qualidade de osso inadequada, envelhecimento e pacientes diabéticos), estabelecimento precoce e manutenção em longo prazo de óssea integração da interface osso-implante, e integração de tecido macio na região transmucosal de implantes dentários, podem ser inadequadas (GUO, 2021).

Um ponto limitante do uso de implantes 3Y-TZP é o conhecido envelhecimento por degradação hidrotérmica, que ocorre pela desestabilização de íons Y^{+3} na estrutura da estrutura de zircônia tetragonal, o que fragiliza o material em longo prazo. Com isso, compósitos Ce-TZP/ Al_2O_3 são uma alternativa interessante, pois esses compósitos possuem alta resistência a degradação hidrotérmica, além de manter propriedades mecânicas suficientes para a substituição ao 3Y-TZP em aplicações dentárias.

O objetivo do presente trabalho é avaliar o comportamento mecânico de implantes dentários a base de Zircônia estabilizada com 3% de ítria ($ZrO_2 - 3\%Y_2O_3$) e de compósito de zircônia estabilizada com Cério e reforçado com Alumina (compósito Ce-TZP/ Al_2O_3), comparando-os com implantes tradicionais de Titânio. Para esse propósito, as simulações numéricas foram realizadas utilizando o método dos elementos finitos de um implante dentário inserido em dois diferentes segmentos de mandíbula composto por duas camadas ósseas, cortical e trabecular (NUTU et al.; PIOTROWSKI et al., 2014; YANGA et al, 2007). A região do terceiro molar foi escolhida, pois a região posterior sofre cargas mais elevadas (MISCH, 2015). A análise pelo método dos elementos finitos nessas regiões críticas ajudam a determinar concentrações de tensões localizadas e o valor médio de tensões resultantes sob condições de mastigação representativas.

2. OBJETIVO GERAL

Avaliar o comportamento mecânico de implantes dentários a base de Zircônia estabilizada com 3% de ítria ($ZrO_2 - 3\%Y_2O_3$) e de compósito de zircônia estabilizada com Cério e reforçado com Alumina (compósito Ce-TZP/ Al_2O_3), comparando-os com implantes tradicionais de Titânio. Com auxílio de softwares CAD/CAM/CAE, analisou-se as regiões de tensões crítica, a fim de validar geometria e design dos implantes cerâmicos.

2.1. Objetivos Específicos

I – Efetuar o modelamento de implantes dentários com o auxílio de software CAD (CATIA V5) tomando como base implantes comerciais;

II – Processamento e caracterização da 3Y-TZP e compósito Ce-TZP/ Al_2O_3 .

III – Importar o modelo geométrico desenvolvido para Software Hypermesh e gerar a malha de elementos finitos

IV – Com a malha pronta, simular diferentes aplicações de cargas em implantes de materiais cerâmicos diferentes no software ABAQUS.

V – Comparar os resultados para os diferentes materiais utilizados e analisar as regiões de maiores concentrações de tensão.

VI – Propor geometrias autorais de implantes comparando com os resultados obtidos no tópico anterior com a finalidade de obter melhores distribuições de tensão, aumentando a vida útil do implante e sendo aliado à escolha do material do mesmo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Materiais cerâmicos

Em respeito ao comportamento mecânico, materiais cerâmicos são relativamente rígidos comparados aos metais. Além disso, são tipicamente muito duros. Historicamente, cerâmicas demonstraram extrema fragilidade (falta de ductilidade) e são altamente suscetíveis a fratura. Entretanto, novos materiais cerâmicos vêm sendo desenvolvidos para melhorar a resistência a fratura e tenacidade (CALLISTER et al. 2018). Materiais cerâmicos avançados são atrativos devido a sua baixa densidade, inércia química, alta resistência, alta dureza, e estabilidade em alta temperatura (KUNTZ, 2004). A busca por tais materiais envolve o desenvolvimento de materiais utilizando diferentes mecanismos de tenacificação, seja por métodos de microtrincamento ou por adição de fibras, por exemplo, na estrutura micro ou nano cristalina do material.

Materiais cerâmicos tenacificados incluem, por exemplo, zircônia parcialmente estabilizada (PSZ), zircônia totalmente estabilizada (FSZ) e policristais de zircônia tetragonal (TZP). Este último será amplamente utilizado no presente trabalho. Embora o emprego rotineiro de cerâmicas em odontologia restauradora seja um fenômeno recente, o desejo por um material estético e durável é antigo (KELLY *et al.* 1996).

A procura por materiais cerâmicos cada vez mais duros e rígidos também pode ser observada na Figura 3.1 Neste gráfico podemos observar que materiais a base de Zircônia ZrO_2 são mais eficientes que outros muito utilizados como, por exemplo, a Alumina Al_2O_3 , ao se tratar de rigidez e dureza.

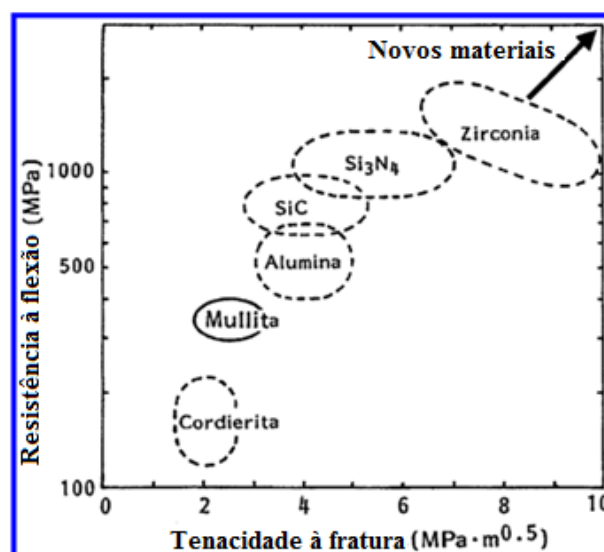


Figura 3.1 - Campos de rigidez e dureza de cerâmicas de engenharia importantes. Fonte: (BASU, 2005)

3.1.1. Zircônia tetragonal estabilizada com 3% em mol de ítria (3Y-TZP)

As propriedades físicas dos implantes feitos de zircônia estabilizada com 3% em mol de ítria (3Y-TZP) demonstraram possuir boa resistência mecânica e de desgaste comparada as ligas de titânio (MANICONE PF et al. 2007). Diversos estudos foram realizados sobre esse tipo de zircônia listando suas vantagens e desvantagens. Com relação as vantagens estão associadas a excelentes propriedades mecânicas: os núcleos de zircônia proporcionam rigidez, evitando parte dos casos de fratura das restaurações.

Outra vantagem encontrada na Zircônia é sua cor branca e sua aparência opaca. Porém, este é um ponto mais utilizado no desenvolvimento de próteses com esse material, visto que o implante fica omitido pela prótese e pela gengiva. A Zircônia pura pode possuir três formas cristalográficas distintas: monoclinica (M) da temperatura ambiente a 1170°C, tetragonal (T) de 1170°C a 2370°C e cúbica (C) de 2370°C ao ponto de fusão (LIU PR et al., 2008; MIYAZAKI et al., 2013). No caso do material policristalino a estabilidade só é atingida após a adição de alguns materiais como ítria (Y_2O_3), magnésio (MgO) ou cério (CeO_2), adicionados como óxidos estabilizadores, são os responsáveis por tornar a zircônia policristalina em um material estável. Passando assim a ser conhecida como zircônia parcialmente estabilizada.

A adição de ítria (Y_2O_3) em baixa concentração, cerca de 2 a 5% mol, ao dióxido de zircônio (ZrO_2) com tamanho de grão inferior a 0,5 μm promove a retenção de até 98% da fase tetragonal em equilíbrio metaestável, favorecendo o aumento de suas propriedades mecânicas (KELLY et al. 2008; VAGKOPOULOUS et al. 2009).

Esta zircônia tetragonal policristalina estabilizada por ítria (Y-TZP) possui excelentes propriedades físicas, mecânicas e térmicas para uso em diversas aplicações biomédicas, como alta resistência mecânica, tenacidade à fratura, dureza e resistência ao desgaste, assim como comportamento não magnético. Possui resistência à degradação no meio oral, o qual apresenta variação de pH, além de apresentar baixo coeficiente de expansão térmica. As boas propriedades mecânicas da zircônia estão relacionadas ao alto conteúdo de fase tetragonal (KELLY et al. 2008; VAGKOPOULOUS et al. 2009).

Durante a transformação da zircônia da fase tetragonal para a fase monoclinica (transformação $t \rightarrow m$), ocorre também um aumento de volume de 3-5%. Com essa transformação, o endurecimento do material leva ao desenvolvimento de campos de tensão compressiva local. Consequentemente, perto da formação de pontas de trinca, as tensões

tendem a fechar e proteger a trinca das cargas externas e isso impede efetivamente mais propagação de trincas (PICONI, MACCAURO, 1999).

A zircônia exibe excelente combinação de alta tensão de flexão (1000 MPa) e boa tenacidade a fratura (8 a 10 MPa m^{1/2}) que geralmente são atribuídas a mecanismo de tenacificação por transformação de fases via transformação tetragonal para monoclinica (*t*-*m*). Um segundo mecanismo de tenacificação referente a esse material, é o denominado microtrincamento (BASU, 2005), que é consequência da expansão volumétrica e componente de tensão cisalhante associado à transformação *t*→*m*, a qual leva a formação de microtrincas ao redor da ponta da trinca. Logo, esses dois mecanismos são considerados associados, promovendo a tenacificação de ZrO₂ tetragonal estabilizada em ítria (Y-TZP).

Um terceiro mecanismo efeito de domínio ferroelástico, ou ferroelasticidade, é a comutação mecânica de dois domínios diferentemente orientados sob uma carga aplicada, maior que a tensão crítica do material, σ_c . Esse mecanismo foi estudado detalhadamente em Y-TZP sinterizada utilizando difração de nêutrons durante testes de compressão mecânica.

3.1.2. Zircônia policristalina tetragonal estabilizada com CeO₂ (Ce-TZP)

Um dos maiores desafios do uso das cerâmicas 3Y-TZP como implantes dentários, está relacionada ao fato desse material apresentar instabilidade mecânica em ambientes aquosos. Devido à presença de vacâncias em sua rede cristalina, os grãos ZrO₂-tetragonais são suscetíveis à penetração de oxigênio em ambientes úmidos e como resultado, instabilidade da fase tetragonal. Esse processo se dá pela formação de hidretos de ítria Y-OH, que ocorrem na superfície, diminuindo o teor global de Y₂O₃ dos grãos superficiais, alterando o balanço de energias internas do grão degradado, até que o mesmo apresente energia necessária para que a transformação tetragonal → monoclinica (*t* → *m*) ocorra, ou espontaneamente, ou sobre atuação de estímulos mecânicos de baixa intensidade.

Durante as últimas décadas, vários óxidos estabilizadores foram estudados, visando obter a estabilização total da fase tetragonal da zircônia a temperatura ambiente. Dentre eles destaca-se a calcia (CaO), magnésia (MgO), ou céria (CeO₂) (KURTZ et al. 2014). De particular interesse, a zircônia policristalina tetragonal estabilizada com CeO₂ (Ce-TZP) tem se mostrado uma alternativa interessante às cerâmicas Y-TZP, pois possuem uma tenacidade muito alta, da ordem de 9 - 14 MPa.m^{1/2} (CHEVALIER, J. et al. 2006) e uma razoável resistência a flexão (500 - 700 MPa) que, por outro lado, preserva os seus valores

originais, mesmo após degradação hidrotérmica por longos tempos de exposição (PICONI et al. 1999)

3.1.3. Compósitos Cerâmicos

Os materiais compósitos sejam eles cerâmicos, metálicos ou poliméricos, são aqueles criados artificialmente pela junção de materiais. A maioria dos compósitos foi criada para melhorar combinações mecânicas, tais como a rigidez, a tenacidade e as resistências às condições do ambiente e a temperatura elevadas (CALLISTER et al. 2018).

Muitos materiais compósitos são constituídos por apenas duas fases; uma é denominada matriz, a qual é contínua e envolve a outra fase, chamada com frequência de fase dispersa. As propriedades dos compósitos são função das propriedades das fases constituintes, de suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa (CALLISTER et al. 2018).

3.1.4. Zircônia policristalina tetragonal estabilizada com CeO_2 (Ce-TZP/ Al_2O_3)

Dentro das cerâmicas avançadas, a alumina Al_2O_3 é a mais utilizada por fornecer excelente comportamento em termos de resistências de execução, à corrosão e a alta dureza a um bom custo/benefício. Propicia uma boa combinação de propriedades mecânicas e biológicas, o que favorece a sua utilização em uma vasta gama de aplicações. Além disto, a alumina pode ser produzida em diferentes percentuais de pureza e formar outros compósitos cerâmicos, desenvolvendo suas propriedades. (COUTINHO, 2020).

Atualmente, alguns autores trabalharam no estudo da degradação hidrotérmica da zircônia, utilizando compósitos ATZ (Zircônia Tenacificada com Alumina) e têm demonstrado grande importância na redução desse fenômeno quando ensaiados em autoclaves simulando a ação dos fluídos por um determinado período, observaram que houve significativa redução da degradação hidrotérmica da zircônia com a dopagem por alumina e lântania, pois houve a redução das transformações de fases da zircônia tetragonal, indicando também que ao adicionar dopantes de baixa valência de cátions segregou o contorno de grão e trouxe bons resultados (COUTINHO, 2020).

Os compósitos Ce-TZP/ Al_2O_3 são cerâmicos que apresentam como matriz, a zircônia estabilizada com ceria, CeO_2 , e que permitem ao material base, no caso, a zircônia, possuir comparativamente ao Y-TZP, maiores valores de tenacidade à fratura (TSAI, 1992; CUTLER, 2010; TSUKUMA et al. 1985). Por outro lado, Ce-TZP apresenta resistência à flexão muito inferior, da ordem de 500 MPa, quando comparado às cerâmicas Y-TZP, que apresentam resistência flexão entre 800 e 1400 MPa (COUTINHO, 2020).

3.2. Implantes dentários

O ramo da odontologia que estuda a utilização de implantes dentários no tratamento do edentulismo (perda dos dentes) é a Implantodontia.

Os implantes devem ser feitos de materiais com boa biocompatibilidade, ou seja, não reagir negativamente em contato com o osso e/ou gengiva. São os responsáveis por substituir a raiz de um ou mais dentes faltantes. Segundo NOGUTI (2012), quando o titânio entra em contato com fluoreto ou baixo pH na saliva, o processo de corrosão se inicia, liberando partículas.

Sua implantação nos ossos dos maxilares é feita normalmente através do rosqueamento e em alguns casos por pressão, seguindo um procedimento correto que será mais detalhado nos tópicos adiante. Podem possuir diferentes geometrias e dimensões de acordo com o fabricante, com o posicionamento na mandíbula e com a necessidade do paciente.

A primeira geração de implantes cerâmicos era feita de óxido de alumínio. Eles podiam ser ósseointegrados, porém suas propriedades biomecânicas, refletidas na resistência a fratura, eram insatisfatórias, fazendo com que os mesmos saíssem do mercado no início da década de 90 (CIONCA et al., 2017).

Em seguida, dióxido de zircônio (Zircônia) foi introduzido no mercado como material alternativo, utilizados na fabricação de implantes e coroas (AL-AMLEH et al., 2010; NAKAMURA et al., 2010)

Atualmente, são utilizados os implantes de zircônia estabilizada com 3% em mol de ítria (3Y-TZP). Essas cerâmicas possuem boa resistência mecânica, boa compatibilidade de tecido e apresentam osseointegração comparável ao titânio (CHEVALIER, 2006). Osseointegração é

descrita como o contato direto entre implante e osso a nível microscópico (TAGLIARENI et al., 2015).

3.3. Arcada dentária

A arcada dentária completa de um ser humano adulto (incluindo superior e inferior) é composta por 32 dentes. Existem 4 dentes de cada grupo de dentes na arcada dentária listado a seguir: incisivo central, incisivo lateral, canino, primeiro pré-molar, segundo pré-molar, primeiro molar, segundo molar e terceiro molar. Seu posicionamento pode ser visualizado na Figura 3.2.

Em nosso estudo serão avaliados implantes para perda de incisivo central e para terceiro molar, ambos em uma arcada dentária de mandíbula inferior. Cada um deles com diferentes dimensões se adequando ao tipo de dente ao posicionamento na mandíbula.

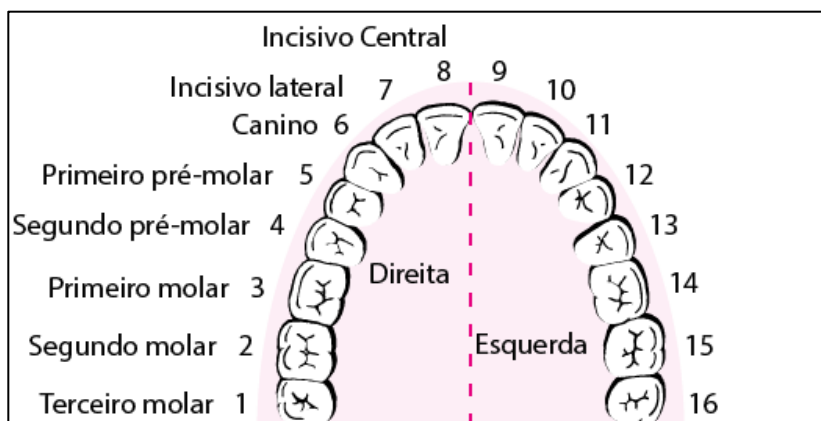


Figura 3.2 - Arcada dentária humana. Fonte: <https://www.msdmanuals.com/pt-br/profissional/dist%C3%BArbios-odontol%C3%B3gicos/sintomas-de-problemas-dent%C3%A1rios-e-orais/m%C3%A1-oclus%C3%A3o>

3.4. Sequência cirúrgica de implantação

A implantação, tanto de implantes dentários metálicos quanto cerâmicos, deve respeitar uma sequência cirúrgica. Este procedimento padrão consiste em um processo de fresa progressivo, seguido do rosqueamento, e por fim da colocação do implante em si. Mais detalhes podem ser observados nas Figuras 3.3 -3.6 a seguir.

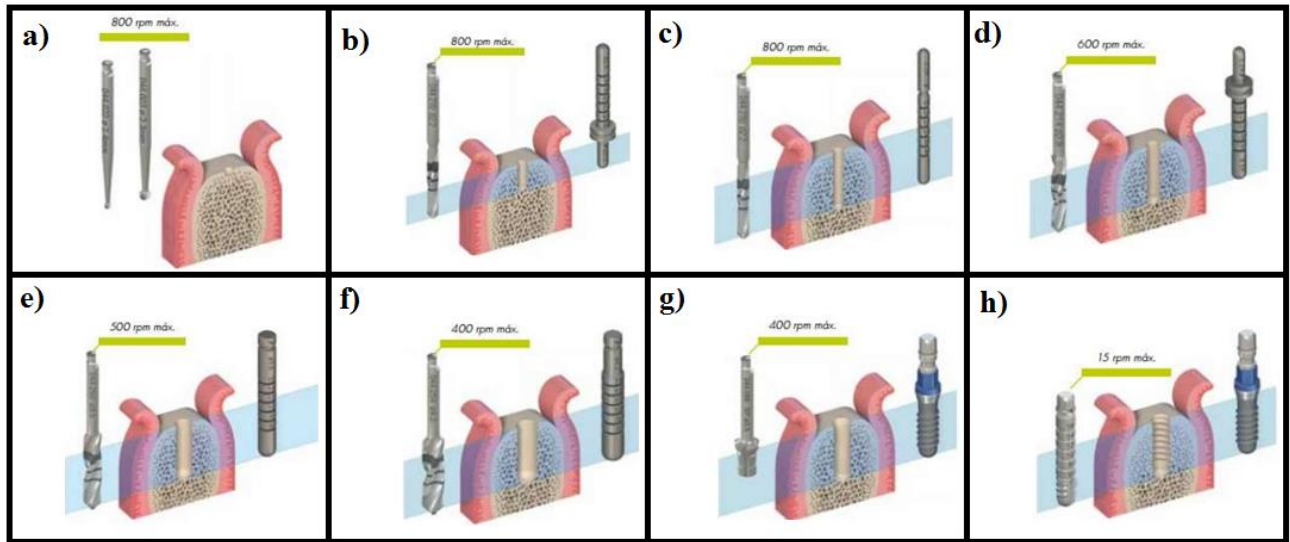


Figura 3.3 - Sequencia cirúrgica parte 1: a) Primeira marcação do local; b) Marcação do eixo do implante; c) Primeira perfuração completa; d) Primeiro alargamento de diâmetro; e) Segundo alargamento de diâmetro; f) Terceiro alargamento de diâmetro; g) Utilização de broca de perfil; h) Rosqueamento. Fonte: STRAUMANN, 2019

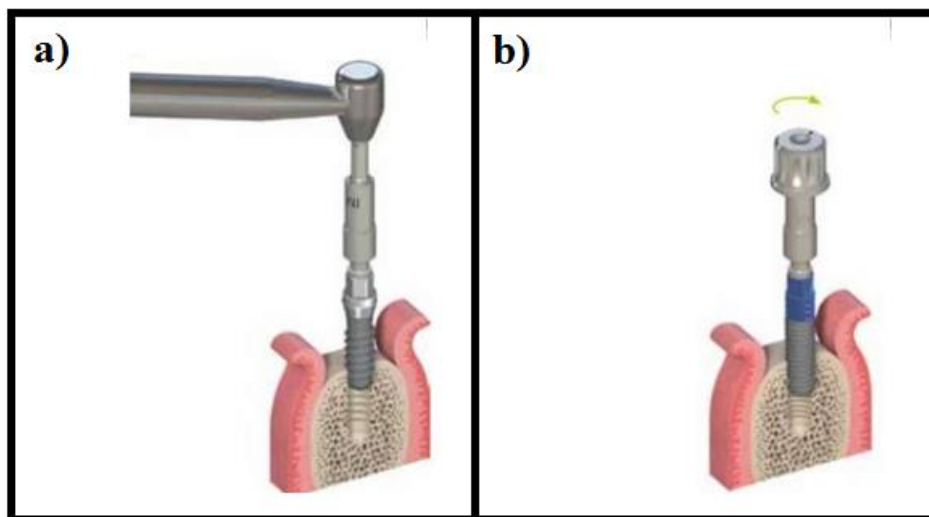


Figura 3.4 - Sequencia cirúrgica parte 2: a) Inserção do implante; b) Colocação do implante. Fonte: STRAUMANN, 2019

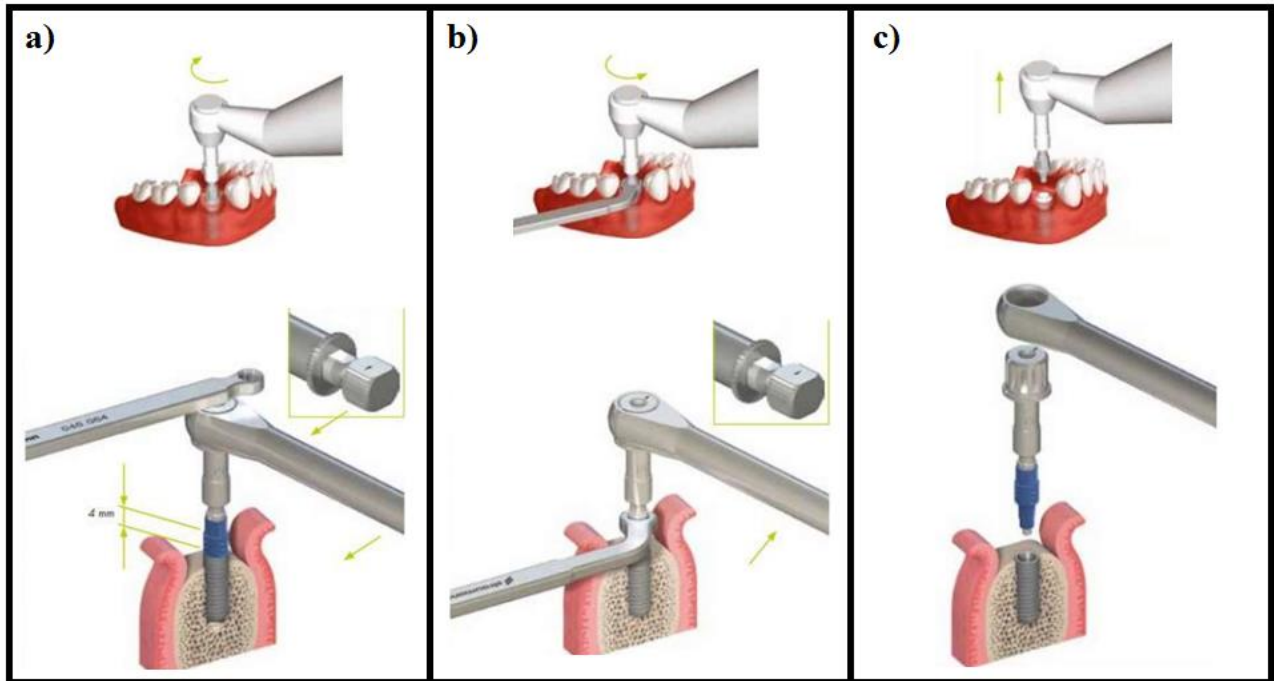


Figura 3.5 - Sequencia cirúrgica parte 3: a) Inserção do implante; b) Remoção do transportador; c) Remoção dos instrumentos. Fonte: STRAUMANN, 2019

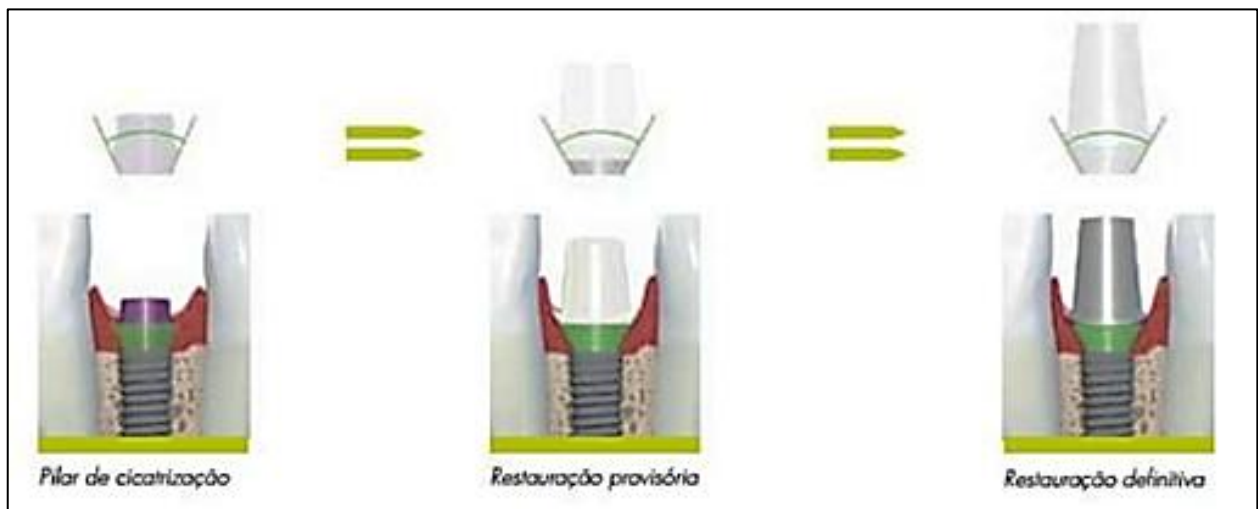


Figura 3.6 - Sequencia cirúrgica parte 4: Inserção de parafuso de fecho, tampa de cicatrização ou pilar de cicatrização. Fonte: STRAUMANN, 2019

3.6. Metodologia da simulação pelo Método dos Elementos Finitos (MEF)

Ao processo de cálculo da estrutura objeto de análise, deve-se formular um Esquema de Cálculo para essa estrutura ou, em outras palavras, um Modelo de Cálculo, em que a estrutura é idealizada de maneira que se possa analisá-la (ALVES FILHO, 2013).

Atribui-se aos elementos da malha, propriedades iguais às dos materiais que esses apresentam no modelo físico real, para posteriormente conferir as mesmas condições de vínculo e carregamento que se desejam estudar no modelo físico real (NETTO, 1995).

Na maioria das vezes torna-se muito difícil encontrar uma solução exata analiticamente, ver esquema da Figura 3.7, nessas situações deve-se encontrar uma solução numericamente.

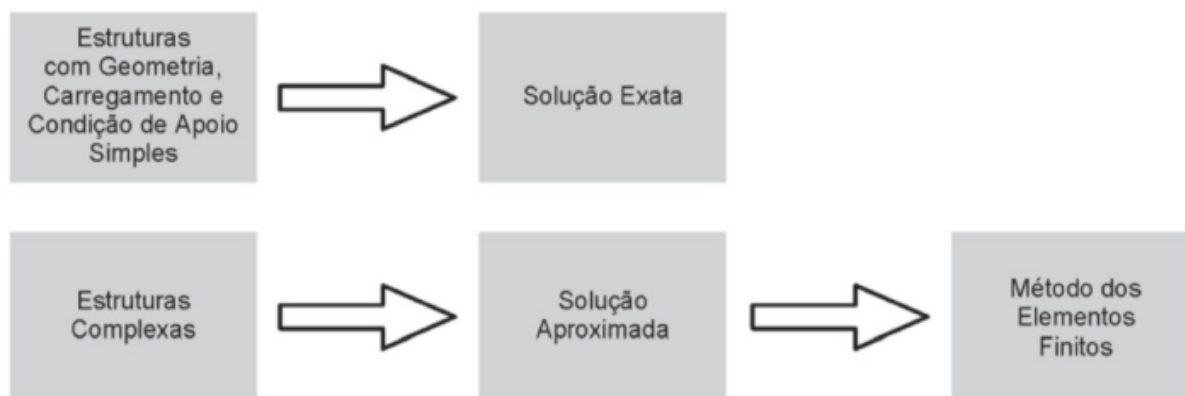


Figura 3.7 - Tipos de soluções para cálculo estrutural. Fonte: ALVES FILHO, 2013

Conforme se pode observar nos tópicos anteriores, tendo-se uma estrutura complexa sendo analisada, e com o auxílio do software CAE, ABAQUS, podemos aplicar o método dos elementos finitos. Este método pode ser sintetizado em três passos (MATSON, 1996):

- Pré-processamento: preparação do problema a ser solucionado com a aplicação de condições de contorno e discretização da malha de elementos finitos;
- Processamento: execução de um algoritmo numérico, de acordo com a etapa anterior, com objetivo de solucionar uma equação diferencial;
- Pós-processamento: visualização de resultados.

3.7. Malha de elementos finitos (Discretização)

A discretização da geometria que será avaliada consiste na divisão da mesma em partes separadas distintas, ou seja, a criação da chamada malha de elementos finitos. Existem diferentes tipos e tamanhos destas subdivisões artificiais, podendo ser elementos bidimensionais como os elementos triangulares e retangulares ou elementos tridimensionais como os elementos tetraédricos ou hexaédricos.

A solução aproximada simula a geometria como uma montagem de elementos que têm um comprimento finito (e não diferencial). Assim, o sistema é subdividido em um número finito de partes ou elementos, de sorte que a estrutura inteira é modelada por um agregado de estruturas “simples”. Os pontos de conexão entre os elementos são chamados de nós do modelo (ALVES FILHO, 2013). Na Figura 3.8 temos um exemplo aonde uma estrutura real e complexa é simplificada por uma representação com vários elementos mais “simples”.

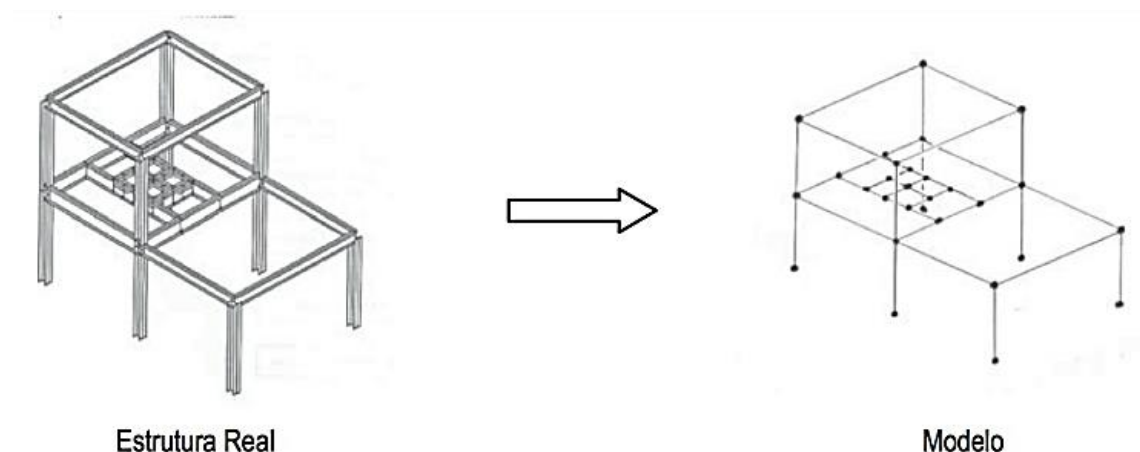


Figura 3.8 - Estrutura reticulada de vigas e seu modelo simplificado. Fonte: ALVES FILHO, 2013

Na Figura 3.9 temos alguns exemplos de diferentes tipos de elementos. De acordo com o modelo matemático ou geometria avaliada podemos ter elementos lineares com 2 nós, elementos em superfície com 4 nós ou elementos sólidos com 8 nós, por exemplo.

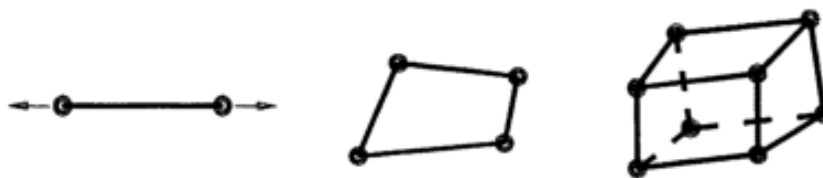


Figura 3.9 - Elemento linear, de superfície e sólido, respectivamente. Fonte: ALVES FILHO, 2013

Os deslocamentos destes nós são as variáveis do problema. A partir deste ponto, que são introduzidas as condições de contorno do problema, como por exemplo, uma restrição de grau de liberdade, um deslocamento inicial, um carregamento aplicado, seja ele estático ou dinâmico, dentre outras.

Esta maneira de simplificar o modelo é uma importante parte do pré-processamento de um modelo matemático e conseqüentemente relacionada com a complexidade que o processamento irá avaliar as informações inseridas.

A maneira que a malha é elaborada afeta na precisão dos resultados obtidos. Quanto mais subdivisões forem realizadas, mais detalhes teremos sobre a nossa geometria, porém maior será o número de incógnitas necessárias para o programa calcular. Portanto vale ressaltar que a complexidade da malha aumenta o tempo e complexidade da simulação.

3.8. Critérios de falha elástica e ruptura

O ponto inicial é a decisão de qual o critério de falha utilizado, dividindo o material avaliado em duas classes: (1) materiais dúcteis, os quais deformação plástica é notável em valores de tensões bem definidas (limite de proporcionalidade, limite de resistência, ou possivelmente limite elástico) os quais exibem alta tenacidade; e (2) materiais frágeis, os quais o início da deformação plástica não é claramente definido e possui baixa tenacidade (YOUNG et al., 2002).

Existem diferentes teorias e algumas delas foram utilizadas e serão listadas a seguir. Vale ressaltar que todas elas partem considerando as tensões normais e cisalhantes de Cauchy conforme equação 3.1:

$$[\sigma]_{xyz} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (\text{Equação 3.1})$$

3.8.1. Teoria da Tensão Normal Máxima

De acordo com a teoria da tensão normal máxima, pode se considerar que ocorre a falha do material, no caso em que qualquer uma das três tensões principais exceda ou se iguale ao limite de resistência do material (SHIGLEY, 2005, p.272). Para um estado de tensão qualquer, as tensões principais podem ser ordenadas da seguinte forma:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde σ_1 é conhecida como tensão máxima principal, σ_2 como tensão média principal e σ_3 a tensão mínima principal.

Dessa forma, é possível simplificar a teoria, definindo a ocorrência de falha em duas situações:

$$\sigma_1 \geq \sigma_{ut} \quad (\text{Equação 3.3})$$

$$\sigma_3 \leq -\sigma_{uc} \quad (\text{Equação 3.4})$$

3.8.2. Teoria de von Mises

O critério de von Mises para materiais dúcteis, também chamado de Teoria da Energia de Distorção, tem como base a ideia de escoamento do material. A rede cristalina de um material se distorce sob tensão, e em algum momento, essa distorção se torna irreversível após a retirada da carga. Os níveis de tensão ultrapassam o limite elástico do material, causando o escoamento (BORESI et al., 1997; DOWLING, 1993). Utiliza-se esse critério através do cálculo da chamada tensão equivalente de von Mises.

$$\sigma_{vm} = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (\text{Equação 3.5})$$

Por outro lado, também é possível representar a tensão equivalente de von Mises de maneira adimensional,

$$\frac{1}{2} \left[\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_{ut}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_{ut}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_3 - \sigma_1}{\sigma_{ut}} \right)^2 \right] \leq 1 \quad (\text{Equação 3.6})$$

onde pode ser visto como um risco de falha ao se aproximar da unidade

3.8.3. Teoria de Mohr-Coulomb

Materiais frágeis possuem limites de ruptura por compressão maior do que seus limites de ruptura por tração e, portanto, ambos os testes uniaxiais de tração e compressão devem ser considerados para a Teoria de Mohr Coulomb. Através do círculo de Mohr, conforme a Figura 3.10, é criada uma região ou envelope de risco de falha, obtida criando duas retas tangentes entre os círculos dos limites de ruptura a compressão e a tração (YOUNG et al., 2002).

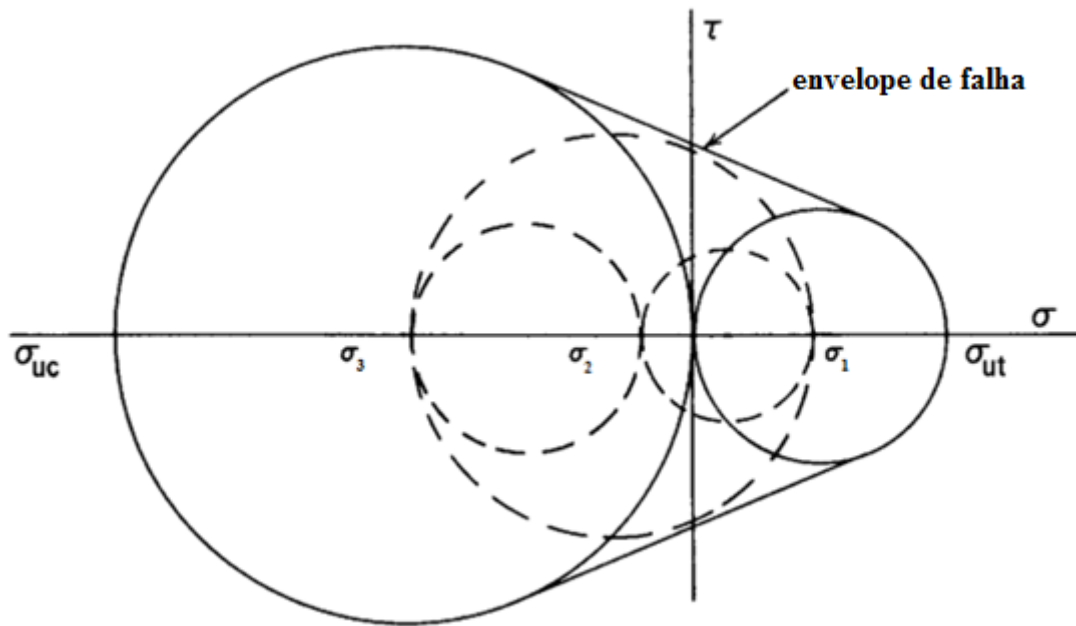


Figura 3.10 - Região de risco de falha pelo critério de Mohr-Coulomb. Fonte: YOUNG et al., 2002

Na análise através do método de elementos finitos, a região de risco de falha citada acima pode ser definida como (RODRIGUES et al., 2010):

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{ut}} + \frac{\sigma_3}{\sigma_{uc}} \right) \leq 1 \quad \text{(Equação 3.7)}$$

Por simplicidade, o termo em parênteses na equação 3.7 é chamado de MC e pode ser visto como um risco de falha ao se aproximar da unidade.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

Neste trabalho, foi utilizado pó comercial à base de nanopartículas de ZrO_2 , duplamente dopado com óxido de cério (CeO_2) e óxido de ítrio (Y_2O_3), e reforçado com nanopartículas de Al_2O_3 . Para avaliação comparativa, foi utilizado pó nanoparticulado de ZrO_2 estabilizado com 3% molar de Y_2O_3 , 3Y-TZP. As principais características deste material são mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Especificação dos pós iniciais utilizados neste trabalho.

Materiais / Designações	Ce-TZP/ Al_2O_3	3Y-TZP
	UprYZe-Intense G (Saint Gobain - França)	TZ-ZPex (Tosoh Corp. Japão)
Características		
Densidade (g/cm^3)	5.40	6.08
Área Superficial Específica (m^2/g)	9,0	13,0
Ligante (%)	3.0	3.0
Composição Química (% peso)		
$Y_2O_3+CeO_2$	10.5 ± 0.7 %	--
Y_2O_3	--	5.2 %
Al_2O_3	25 ± 1 %	0,05 %
SiO_2	< 200 ppm	< 200 ppm
Na_2O	< 200 ppm	< 200 ppm
Fe_2O_3	<100 ppm	<100 ppm
ZrO_2-HfO_2	Balanço (próximo a 64.5 %)	ZrO_2-HfO_2 Balanço (próximo a 94.8 %)
% ZrO_2 monoclinica (% peso)	100%- ZrO_2 (Ce-SS) (YASHIMA et. al., 2015)	53.8%

Fonte: Próprio autor.

4.2. Processamento Cerâmico

Amostras em forma de barra, 4 x 4 x 8 mm (n = 3/grupo), e amostras em forma de disco, Ø12,5 x 1,3 mm (n = 20/grupo), foram preparadas por prensagem uniaxial a 100 MPa - 60 segundos.

As barras retangulares foram submetidas à dilatometria em dilatômetro Netsch DIL402C, sob atmosfera de argônio, adotando-se uma taxa de aquecimento de 1°C/min. A contração foi medida por transdutor diferencial linear variável (LVDT) com sensibilidade de 0,01 mm. Além disso, o coeficiente de expansão térmica das amostras sinterizadas foi medido usando um padrão Al₂O₃.

As amostras em forma de disco foram sinterizadas em um forno com resistores de MoSi₂, a uma temperatura de 1500 °C com um limite de 2 horas, utilizando uma taxa de aquecimento de 1 °C/min seguido de resfriamento controlado (5 °C/min) até a temperatura ambiente.

Os testes de degradação hidrotérmica foram realizados usando autoclave modelo Cristofoli-Vitale Classe 12: As amostras foram degradadas por ciclo térmico sob pressão de 2 bar a 134 °C ± 1 °C durante 15 min acumulados, usando saliva artificial (carboximetilcelulose - 0,6%, sorbitol 1,7% , cloreto de potássio- 0,06%, metilparabeno- 0,1%, cloreto de sódio- 0,08%, cloreto de cálcio- 0,05% e água purificada- 97,41%), as amostras foram extraídas da autoclave em tempos diferentes (0 - 10h) e suas superfícies foram analisadas por difração de raios X. Em seguida, as amostras foram devolvidas à autoclave e os testes prosseguiram até o tempo final de 10h. Trabalhos anteriores indicam que a exposição em autoclave (134 oC- 1h / 2 bar) corresponde à exposição em temperatura corporal por 3 - 4 anos (CHEVALIER et. al, 1999; BURLINGTON, 1997).

4.2.1. Caracterização de amostras sinterizadas

A massa específica aparente das amostras foi determinada pelo método de imersão baseado no princípio de Arquimedes, utilizando uma balança de precisão 0,0001g, modelo Ohaus-Discovery. A densidade relativa foi determinada usando a relação entre a densidade aparente das amostras sinterizadas e a densidade teórica (ρ_t Ce-TZP/Al₂O₃ = 5,40 g/cm³ e ρ_t (Y-TZP) = 6,08 g/cm³) fornecida pelo fabricante.

As fases cristalinas foram identificadas por difração de raios X, utilizando um difratômetro Panalytical-Empréan utilizando radiação Cu-K α , com 2θ variando entre 20° e 80° , com passo angular de $0,02^\circ$ e 90s de tempo de contagem. Os picos cristalinos foram identificados usando o software X'pert-Highscore (Phillips) e o banco de dados nos arquivos ICDS (HELLENBRANDT, 2004). A quantificação das fases cristalinas foi realizada por meio do refinamento de Rietveld (RIETVELD, 1969) utilizando o software Highscore plus (DEGEN et. al., 2014) adotando curvas de Pseudo-Voigt para ajuste dos picos.

A fração de fase monoclinica (X_M) foi calculada a partir das intensidades integradas dos picos monoclinico-ZrO₂ dos planos $(\bar{1}11)_M$ e $(111)_M$ além do plano tetragonal ZrO₂ $(101)_T$. As Equações (4.1) e (4.2) foram utilizadas para determinação da fração volumétrica (GARVIE & NICHOLSON, 1972; TORAYA et. al., 1984).

$$X_M = \frac{(\bar{1}11)_M + (111)_M}{(\bar{1}11)_M + (111)_M + (101)_T} \quad \text{(Equação 4.1)}$$

$$F_M = \frac{1,311X_M}{1+0,311X_M} \quad \text{(Equação 4.2)}$$

onde: $(\bar{1}11)_M$ $2\theta = 28.0^\circ$; $(111)_M$ $2\theta = 31.2^\circ$; $(101)_T$ $2\theta = 30.0^\circ$, representam as intensidades integradas dos picos de difração dos planos monoclinicos $(\bar{1}11)_M$ e $(111)_M$, e plano tetragonal $(101)_T$.

As superfícies foram analisadas utilizando microscópio MEV/FEG JEOL 7100FT, com detector EDS Oxford X-Max 80 mm². Para avaliação microestrutural, as superfícies polidas foram atacadas termicamente a 142°C - 15 min, e uma fina camada de ouro foi depositada, utilizando metalizador K550X (Quorum Technologies-UK), com corrente de 30mA por 2 minutos. Após a captura das imagens, uma população com 200 grãos por grupo foi analisada usando o software *IMAGE J*. Desta forma, foram determinados os tamanhos médios de grão e seus respectivos desvios padrão.

4.2.2. Propriedades mecânicas

O módulo de Young das amostras sinterizadas (discos polidos) foi obtido através de um ensaio acústico não destrutivo, utilizando um equipamento de detecção acústica, (Sonelastic modelo SB-AP). O impulsor consiste em uma esfera de aço de 5,5 mm de diâmetro que é

colada a uma haste de polímero flexível. Os corpos de prova foram golpeados elasticamente em um ponto anti-nodal. A vibração foi gravada usando um microfone. As medidas foram repetidas até que cada amostra em leituras consecutivas (com variação inferior a 2Hz) fosse obtida. O cálculo do módulo de Young foi feito usando a norma ASTM E1876 (ASTM, 2015) com base na teoria das vibrações livres de corpos elásticos.

A dureza e a tenacidade à fratura das amostras sinterizadas foram determinadas usando o método de indentação Vickers, (ASTM C-1327-2015, ASTM-C-1421-2010), usando medidas de dureza Vickers com um durômetro TIME Group - China. Uma carga de indentação de 2000 gF foi aplicada durante os testes. Os comprimentos das fissuras foram medidos imediatamente após a remoção do penetrador. Em cada amostra foram medidas cinco (n = 5) indentações. As marcas de indentação foram observadas em microscópio óptico com analisador de imagem acoplado, IMAGE IA-3001.

A tenacidade à fratura por indentação, IF , K_{IC} , foi determinada considerando uma ponta de trinca Palmqvist de acordo com a Equação (4.3) (NIIHARA et. al., 1983):

$$K_{IC} = 0.0084 \cdot \left(\frac{E}{HV} \right)^{0.4} \cdot [P / (a \cdot l^2)] \quad (\text{Equação 4.3})$$

onde "E" representa o Módulo de Young (GPa), HV a dureza (GPa), P a carga aplicada (N), "a" o comprimento da diagonal de recuo e "l" o comprimento da trinca gerada pela marca de recuo Vickers (mm) .

A resistência à flexão biaxial dos dois grupos degradados foi medida por um teste de pistão em três esferas (P-3B) usando uma máquina de teste universal (EMIC® 1000 INSTRON-Group, Brasil) de acordo com a ISO 6872 (ISO-6872, 2015). Cada disco foi colocado centralmente sobre as três esferas de aço com 3,5 mm de diâmetro, posicionadas em um círculo de apoio com diâmetro igual a 11 mm. A superfície analisada das amostras de disco corresponde à superfície inferior que é submetida a um estado de tensão de tração, enquanto a outra superfície foi carregada com um punção plano com diâmetro de 1,4 mm a uma velocidade constante de 0,5 mm/min até a fratura. Um filme plástico fino foi colocado entre as amostras de Y-TZP e o pistão de esfera achatada, para distribuir a carga uniformemente. Todas as dimensões dos corpos de prova foram medidas não permitindo variações acima de 0,01 mm. A resistência à flexão máxima σ_f é a resistência à flexão máxima (MPa) foi calculada usando as Equações (4.4 - 4.6):

$$\sigma_f = -\frac{0.2387F(X - Y)}{b^2} \quad (\text{Equação 4.4})$$

com

$$X = (1 + \nu) \ln\left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2 + \left[\frac{(1 - \nu)}{2}\right] \left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2 \quad (\text{Equação 4.5})$$

e

$$Y = (1 + \nu) \left[1 + \ln\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2\right] + (1 - \nu) \left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2 \quad (\text{Equação 4.6})$$

Nas Equações (4.4 - 4.6), F é a carga de ruptura (N), b é a espessura do corpo de prova (mm), r_{-1} é o raio do círculo de suporte (mm), r_2 é o raio da área carregada (mm), r_{-3} é o raio da amostra (mm) e ν é a razão de Poisson igual a 0,30 (3Y-TZP) e 0,28 ((Ce,Y)-TZP/ Al_2O_3).

A avaliação estatística da resistência à flexão foi realizada por meio da estatística Weibull (QUINN & QUINN, 2010). Os detalhes da realização desta análise estatística foram apresentados em trabalho anterior (AMARANTE et. al., 2020).

Na determinação de tensões através de modelos matemáticos, é usual assumir que o material possui comportamento elástico, isotrópico, homogêneo e infinitamente divisível sem que haja alteração das propriedades e em conformidade com a lei de Hooke, a qual define a proporcionalidade entre deformação e tensão. Em realidade, nenhuma dessas condições é estritamente verdadeira (YOUNG et al., 2002).

As propriedades utilizadas para os ossos que compõem a mandíbula e os diferentes tipos de implantes estão organizados nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.2 - Propriedades dos materiais utilizados no sistema simulado

Material	Módulo de Elasticidade E (MPa)	Coefficiente de Poisson ν	Densidade ρ (g/cm^3)	Fonte
ZrO ₂ - 3%Y ₂ O ₃	195.300	0,31	6,04	COUTINHO et al. 2020
Ce-TZP/ Al_2O_3	228.300	0,25	5,35	
Osso cortical	7.000 – 30.000	0,33	-	DAGUANO et al. 2011
Osso esponjoso	50 – 500	0,33	-	DAGUANO et al. 2011
Titânio de alta pureza	110.000	0,35	4,50	LIN et al. 2006

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4.3 - Limites de ruptura dos materiais utilizados no sistema simulado

Material	Limite de ruptura à flexão σ_{ut} (MPa)	Limite de ruptura à compressão σ_{uc} (MPa)	Fonte
ZrO ₂ - 3%Y ₂ O ₃	966	2.000	COUTINHO et al. 2020
Ce-TZP/Al ₂ O ₃	953	2.100	
Titânio de alta pureza	550	-	LIN et al. 2006

Fonte: Próprio autor.

4.3. Efeito do envelhecimento ósseo

Cerâmicas de zircônia estabilizadas em ítria (Y-TZP) apresentam perda de resistência a flexão com o envelhecimento, consequência à degradação hidrotérmica em ambientes aquosos (CHEVALIER et al., 2009; RAMESH et al., ABREU et al., 2020) ou quando submetidos à cargas cíclicas e fadiga. Logo, esses parâmetros devem ser considerados no desenvolvimento da geometria de implantes cerâmicos, almejando a melhora na confiabilidade do material.

O osso é um órgão capaz de sofrer mudanças de comportamento mecânico em relação a um número de fatores, incluindo hormônios, vitaminas, e influências mecânicas externas. Entretanto, parâmetros biomecânicos, como a duração de estado edêntulo, são predominantes (RESNICK, 2011).

Dentre as propriedades mecânicas, o efeito da porosidade tem sido estudado principalmente no módulo de elasticidade e na resistência à flexão (YOSHIMURA et al., 2005). Efeito do envelhecimento ósseo Estudos histomorfométricos e microrradiográficos mostraram que após os 50 anos de idade, há um aumento significativo de porosidade de osso cortical de um homem adulto, levando à diminuição de massa óssea. A perda de minerais ósseos foi estimada de aproximadamente 1,5% ao ano em mulheres e 0,9% em homens (PELED M et al., 2003).

A correlação entre módulo de Young e porosidade pode ser estipulada assumindo-se geometria esferoidal dos poros, bem como assumindo que o coeficiente de Poisson do material não se altera significativamente com a porosidade. A Equação 4.7 foi adotada nessa dissertação derivada por MAZILO e ONDRACEK (1989) e modificada por BOCCACCINI et al, (1993).

$$E(P) = E_0(1 - P^{2/3})^s \quad (\text{Equação 4.7})$$

sendo $E(P)$ e E_0 o módulo de elasticidade do corpo poros e inicial (sem poros) respectivamente, P é a porosidade absoluta do corpos e s um fator experimental dependente dos poros, aqui considerado como 1, para orientação estatística dos poros (BOCCACCINI D. et al., 1997).

A Tabela 4.4 apresenta os resultados calculados de módulo de elasticidade dos ossos cortical e esponjoso com base na Equação 4.7 e considerando a porosidade crescente de 0,9% ao ano no intervalo entre 50 e 80 anos de idade. Os destaques são as idades de cada 5 anos, que foram os valores aplicados nas simulações por elementos finitos realizados nesta dissertação.

Tabela 4.4 - Degeneração anual dos Módulos de Young dos ossos mandibulares, a partir dos 50 anos.

Idade (Anos)	Integridade (%)	P	P _{abs}	E (MPa) Osso Cortical	E (MPa) Osso Esponjoso
50	100,00	0,000	0,000	30.000,00	500,00
51	99,10	0,900	0,009	28.701,98	478,37
52	98,21	1,792	0,018	27.945,70	465,76
53	97,32	2,676	0,027	27.316,18	455,27
54	96,45	3,552	0,036	26.758,51	445,98
55	95,58	4,420	0,044	26.249,83	437,50
56	94,72	5,280	0,053	25.777,78	429,63
57	93,87	6,132	0,061	25.334,74	422,25
58	93,02	6,977	0,070	24.915,55	415,26
59	92,19	7,814	0,078	24.516,56	408,61
60	91,36	8,644	0,086	24.135,00	402,25
61	90,53	9,466	0,095	23.768,75	396,15
62	89,72	10,281	0,103	23.416,13	390,27
63	88,91	11,089	0,111	23.075,76	384,60
64	88,11	11,889	0,119	22.746,52	379,11
65	87,32	12,682	0,127	22.427,46	373,79
66	86,53	13,468	0,135	22.117,77	368,63
67	85,75	14,246	0,142	21.816,75	363,61
68	84,98	15,018	0,150	21.523,82	358,73
69	84,22	15,783	0,158	21.238,43	353,97
70	83,46	16,541	0,165	20.960,12	349,34
71	82,71	17,292	0,173	20.688,48	344,81
72	81,96	18,037	0,180	20.423,14	340,39
73	81,23	18,774	0,188	20.163,77	336,06
74	80,49	19,505	0,195	19.910,06	331,83
75	79,77	20,230	0,202	19.661,75	327,70
76	79,05	20,948	0,209	19.418,57	323,64
77	78,34	21,659	0,217	19.180,32	319,67
78	77,64	22,364	0,224	18.946,76	315,78
79	76,94	23,063	0,231	18.717,72	311,96
80	76,24	23,755	0,238	18.493,01	308,22

Fonte: Próprio autor.

4.4. Simulação Numérica - Metodologia

A seguir serão detalhadas as etapas metodológicas a serem aplicadas nesse trabalho de dissertação, seguindo o fluxograma de desenvolvimento dos modelos geométricos conforme Figura 4.1. O Fluxograma engloba desde o desenvolvimento dos implantes de modelos

comercial e autoral e refinamento da geometria da mandíbula até a simulação computacional pelo método de elementos finitos e análise dos resultados.

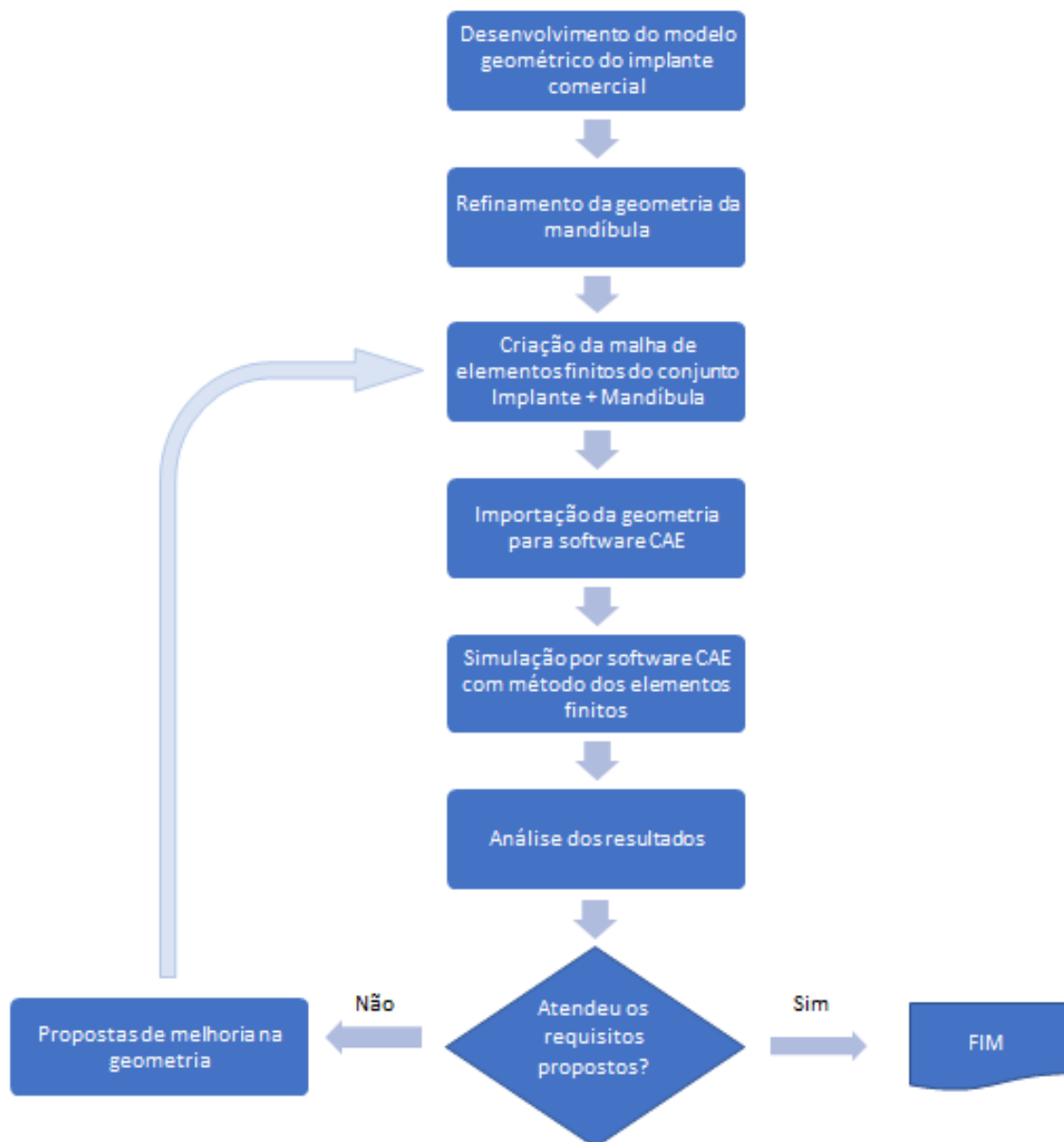


Figura 4.1 - Fluxograma de desenvolvimento dos modelos geométricos. Fonte: Próprio autor

4.4.1. Modelos geométricos

4.4.1.1. Mandíbula simplificada

A geometria da mandíbula humana utilizada nesta dissertação originou-se através de software CAM, escaneado uma mandíbula de um homem adulto de idade próxima a 40 anos

e convertendo-a para arquivo de formato stl. Em seguida, o arquivo foi importado para o software CATIA V5, que pode ser visualizado conforme Figura 4.2.

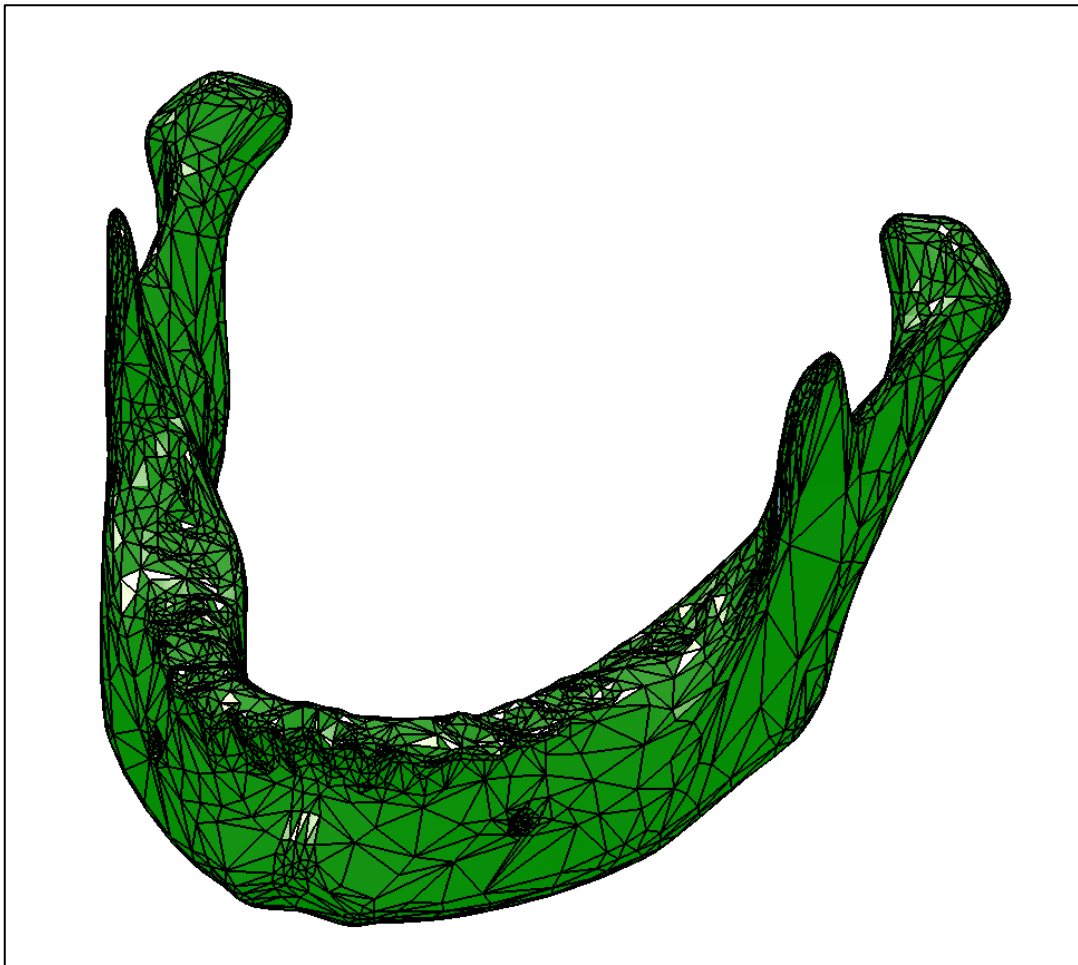


Figura 4.2 - Geometria inicial da mandíbula humana. Fonte: Próprio autor.

O arquivo obtido inicialmente possui uma vasta dificuldade para efetuar as análises computacionais por elementos finitos. Isso ocorre devido à geometria complexa da mandíbula humana. Portanto, foi necessário atualizar a geometria, simplificando-a e tornando as superfícies mais simples com as ferramentas do próprio software CAD – CATIA V5, conforme ilustrado na Figura 4.3.

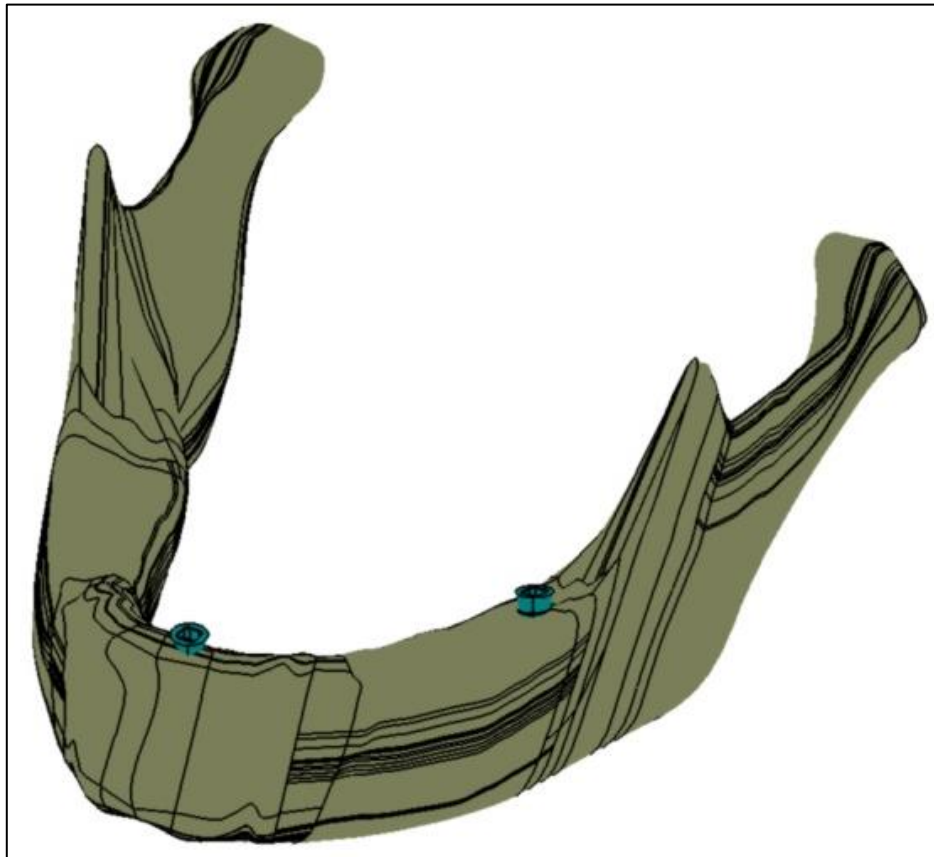


Figura 4.3 - Geometria da mandíbula humana simplificada pelo autor. Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.4, há duas imagens de protótipos obtidos por impressão em 3D da mandíbula para melhor visualização do modelo geométrico.



Figura 4.4 – Impressão por estereolitografia do modelo geométrico da mandíbula humana. Fonte: Próprio autor.

4.4.1.2. Modelos geométricos comerciais

Os primeiros modelos geométricos de implantes modelados são apresentados nas Figuras 4.5 - 4.7 e foram desenvolvidos com base em implantes dentários já comercializados atualmente com diâmetro que varia de $\text{Ø}4.1 - 4.8$ mm e 0.8 mm de passo de rosca (STRAUMANN, 2021)

Os dois implantes se assemelham em geometria, por exceção do comprimento total, no qual o de maior comprimento (Figura 4.5) foi utilizado como implante dentário do 3º molar e o de menor comprimento (Figura 4.6) utilizado como implante dentário do incisivo central.

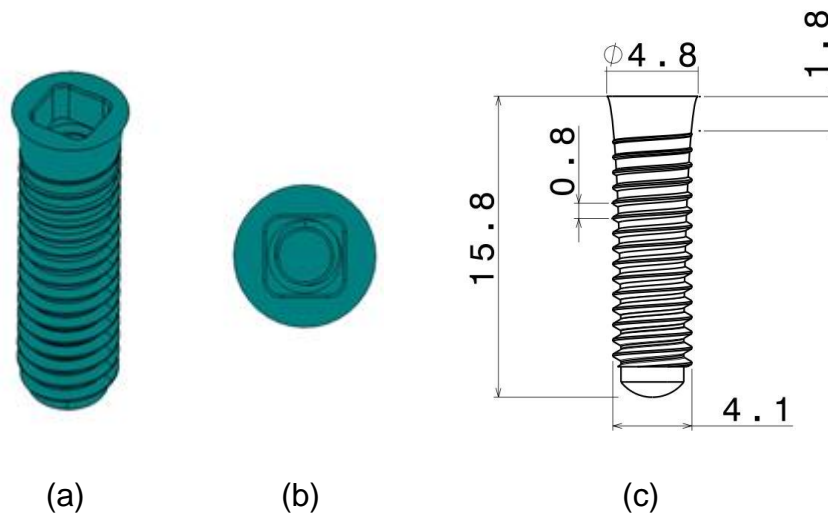


Figura 4.5 - Implante comercial para 3º molar em: (a) vista isométrica; (b) vista superior; (c) detalhamento em 2D. Fonte: Próprio autor.

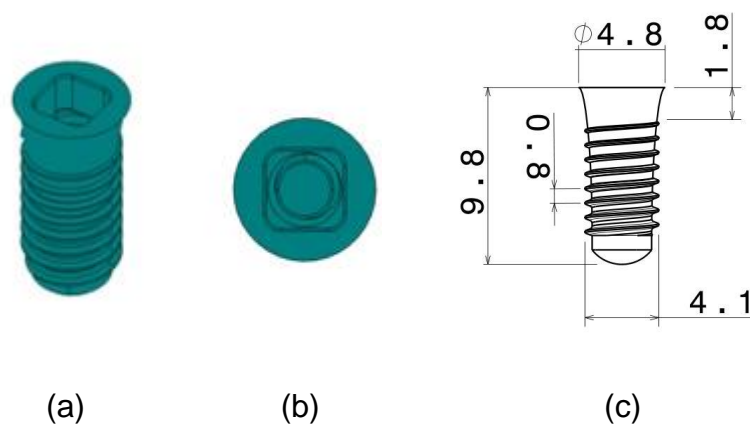


Figura 4.6 - Implante comercial para incisivo central em: (a) vista isométrica; (b) vista superior; (c) detalhamento em 2D. Fonte: Próprio autor.

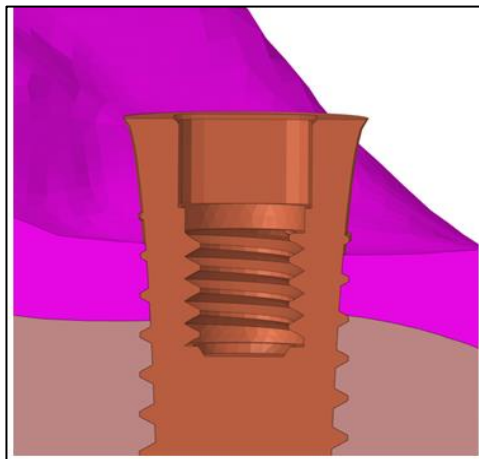


Figura 4.7 - Vista em corte do implante comercial. Fonte: Próprio autor.

4.4.1.3. Modelos geométricos autorais

Além do material utilizado na fabricação do implante, outro fator determinante para a resposta mecânica dos mesmos é a sua geometria. Alguns tipos de geometria podem possuir mais regiões de concentração do que outros, aumentando o risco de falha elástica ou até mesmo a ruptura. Como exemplos de modificações temos a alteração do passo da rosca, o diâmetro do implante, alteração do comprimento, alteração do formato da cabeça do implante, dentre outras.

Para este estudo, outros dois modelos geométricos de implantes, um para o terceiro molar e outro para incisivo central, foram desenvolvidos com intuito de melhorar ainda mais a confiabilidade mecânica dos implantes em conjunto da alteração do tipo de material. As novas propostas consistem na alteração do formato cônico para cilíndrico na região superior do implante onde a carga mastigatória é aplicada, conforme Figuras 4.8 - 4.10, buscando assim eliminar uma possível região de concentração de tensões. Alterações como variação do diâmetro do implante ou passo da rosca foram desconsideradas por necessitarem um estudo mais aprofundado da região da mandíbula a ser implantado.

Assim como no caso dos modelos geométricos comerciais, os dois implantes autorais se assemelham em geometria, por exceção do comprimento total, no qual o de maior comprimento (Figura 4.8) foi utilizado como implante dentário do 3º molar e o de menor comprimento (Figura 4.9) utilizado como implante dentário do incisivo central.

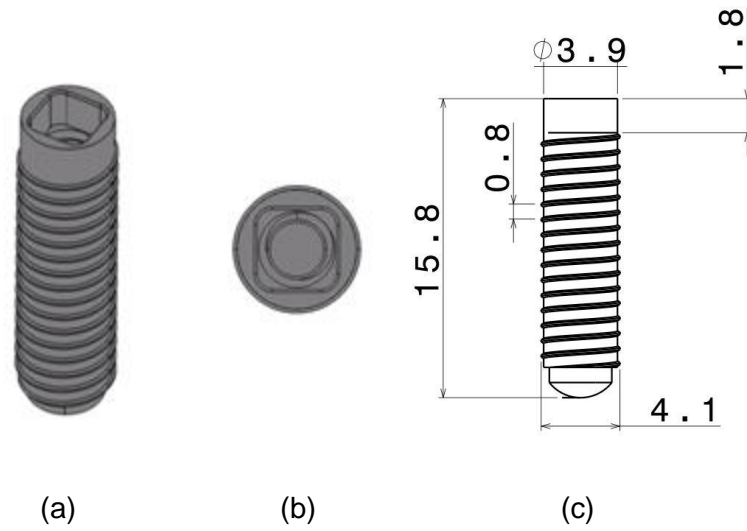


Figura 4.8 - Proposta de implante auroral para 3º molar em: (a) vista isométrica; (b) vista superior; (c) detalhamento em 2D. Fonte: Próprio autor.

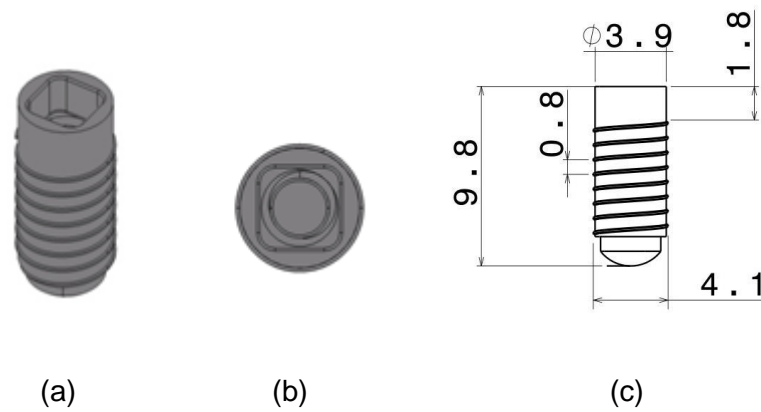


Figura 4.9 - Proposta de implante auroral para incisivo central em: (a) vista isométrica; (b) vista superior; (c) detalhamento em 2D. Fonte: Próprio autor.

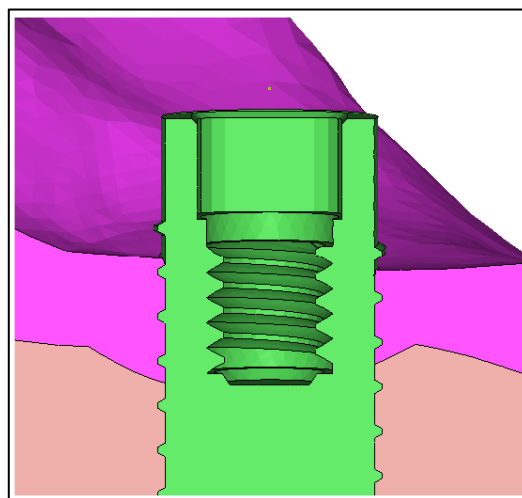


Figura 4.10 - Vista em corte do implante proposta / auroral. Fonte: Próprio autor.

4.4.2. Análise pelo método de elementos finitos

O software CAE responsável pelas simulações numéricas foi o ABAQUS/Standard 6.9. Todas as simulações foram executadas com Workstation com processador Intel Zeon 5690 3.47 GHz, 24 cores com 32 Gb RAM.

4.4.2.1. Modelos para elementos finitos

Com a geometria da mandíbula simplificada e o desenvolvimento dos quatro tipos de implantes utilizados (comercial e autoral com dois comprimentos diferentes cada um), as análises foram baseadas somente em duas regiões da mandíbula as quais os implantes se encontram, ou seja, região próxima ao terceiro molar e região próxima ao incisivo central. Os 12 Modelos simulados são ilustrados nas Figuras 4.11 e 4.12.

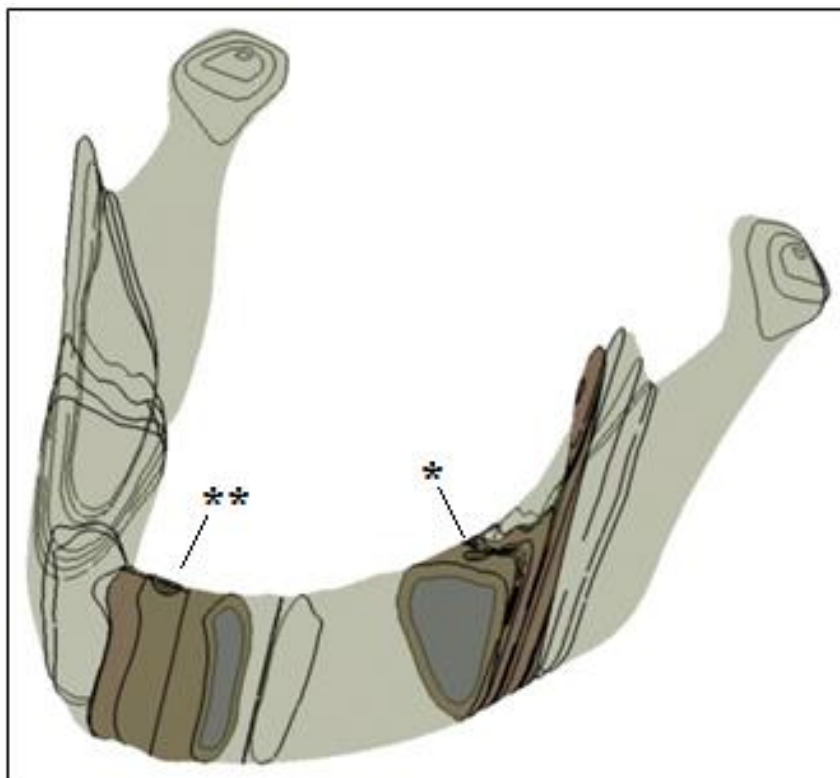


Figura 4.11 - Destaque para as regiões do terceiro molar* e incisivo central** na mandíbula. Fonte: Próprio autor.

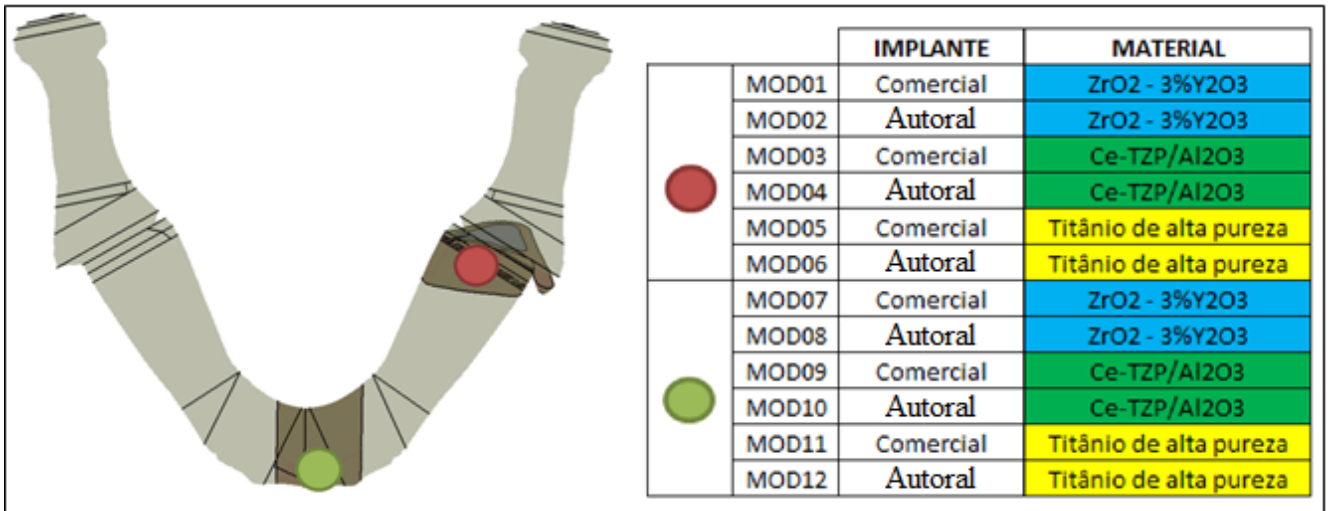


Figura 4.12 - Destaque para as regiões do terceiro molar e incisivo central na mandíbula. Fonte: Próprio autor.

Além disso, foram considerados dois tipos de propriedades ósseas devido a suas diferenças em propriedades mecânicas, conforme pode ser observado anteriormente nas Figuras 4.11- e 4.12. Na cor marrom temos o osso cortical, enquanto a cor cinza representa o osso esponjoso. O implante possui contato com ambos. Essa separação e as geometrias dos Modelos podem ser melhor observada nas Figuras 4.13 a 4.16.

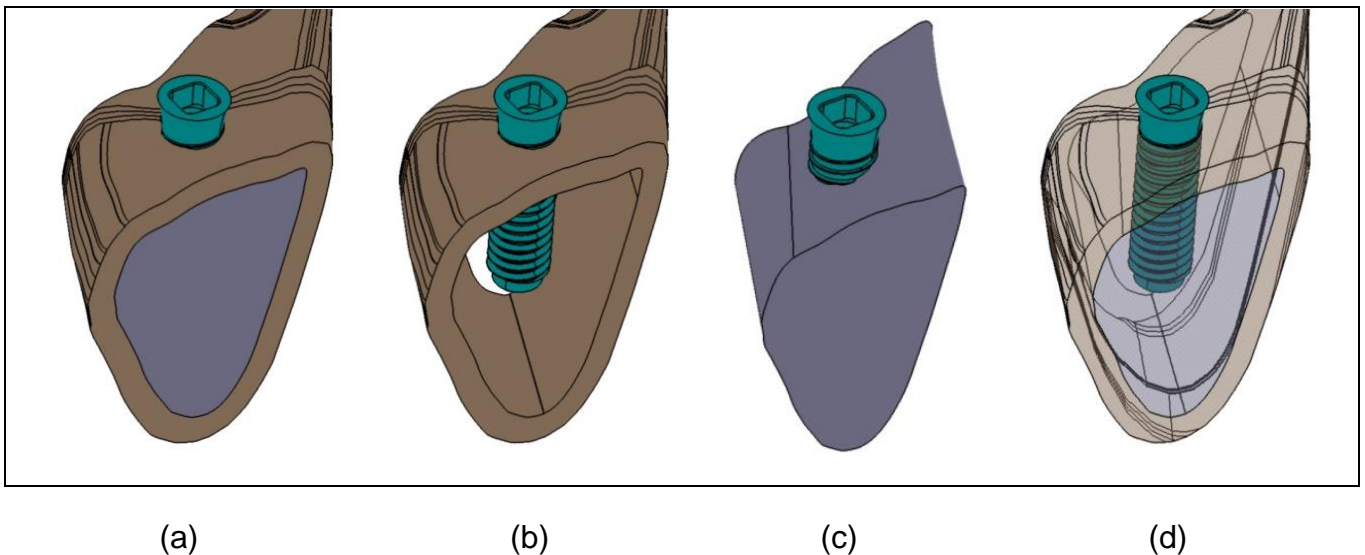


Figura 4.13 - Modelo geométrico analisado para os Modelos 01, 03 e 05 (MOD01, MOD03 e MOD05 da Figura 4.12): (a) modelo completo; (b) implante e osso cortical; (c) implante e osso esponjoso; (d) modelo completo destacando o implante comercial. Fonte: Próprio autor.

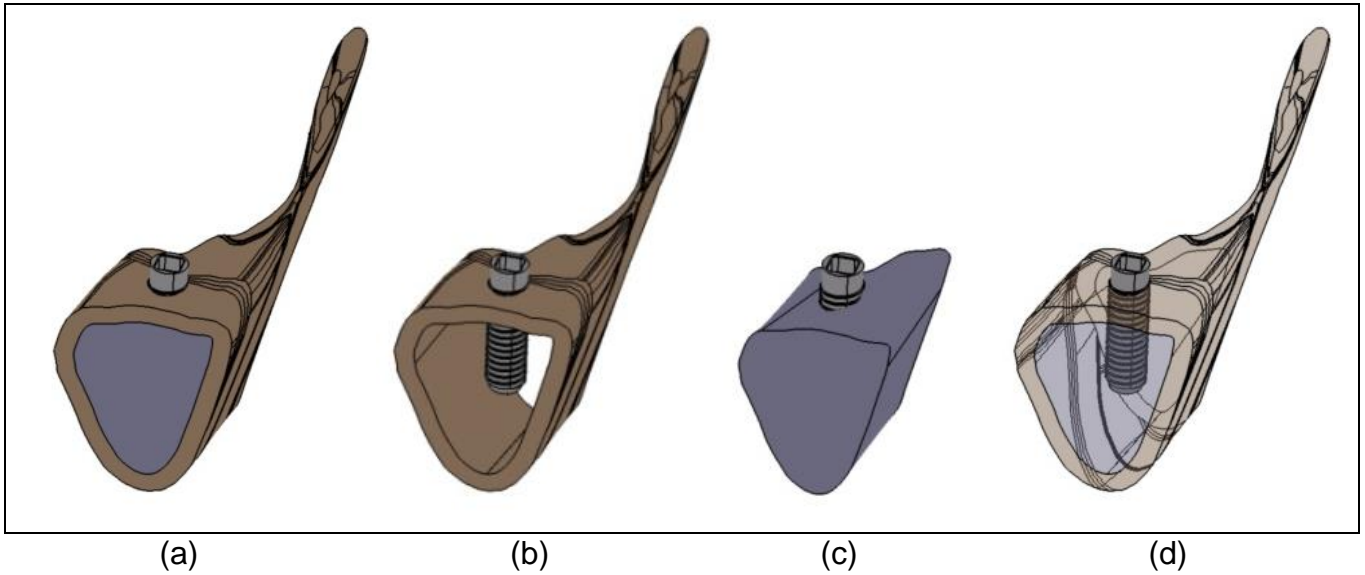


Figura 4.14 - Modelo geométrico analisado para os Modelos 02, 04 e 06: (a) modelo completo; (b) implante e osso cortical; (c) implante e osso esponjoso; (d) modelo completo destacando o implante proposta / autoral. Fonte: Próprio autor.



Figura 4.15 - Modelo geométrico analisado para os Modelos 07, 09 e 11: (a) modelo completo; (b) modelo completo destacando o implante comercial. Fonte: Próprio autor.

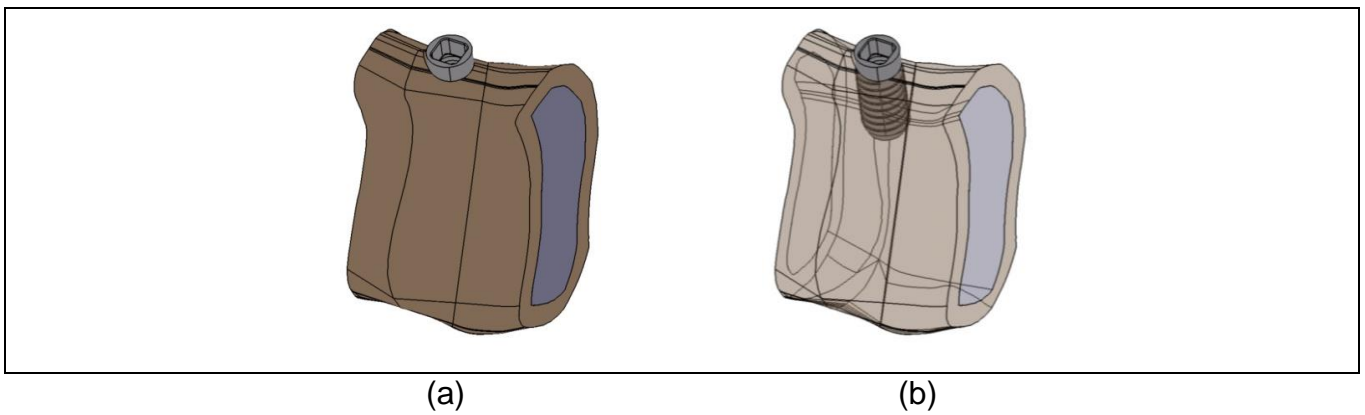


Figura 4.16 - Modelo geométrico analisado para os Modelos 08, 10 e 12: (a) modelo completo; (b) modelo completo destacando o implante proposta / autoral. Fonte: Próprio autor.

Para todos os modelos listados na Figura 4.11, foram aplicadas cargas mastigatórias de 50 N até 500 N, com acréscimo de 50 N entre um valor de carga e outro. E também, duas posições relativas diferentes do vetor carga mastigatórias. Uma delas onde a carga é aplicada na direção do eixo longitudinal do implante, e outra, aonde a carga realiza um ângulo de 45° com relação ao eixo longitudinal do implante.

A carga mastigatória é aplicada na face superior do implante conforme pode ser observado nas Figuras 4.17 e 4.18 a seguir. Vale ressaltar, que apesar delas estarem representando os casos de implantes comerciais, o mesmo parâmetro de carga é utilizado para os casos onde são usados os implantes dentários proposta/autorais.

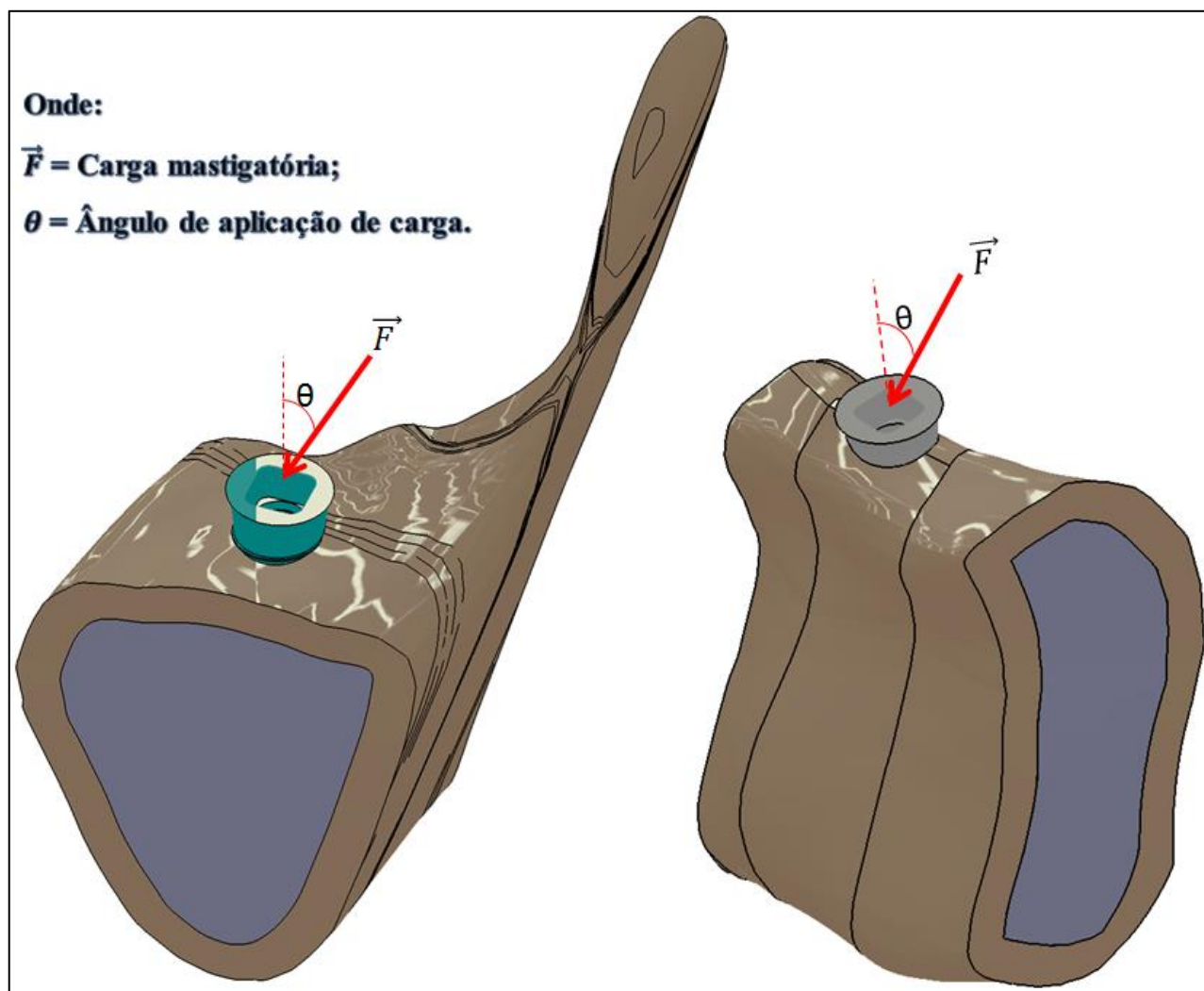


Figura 4.17 - Seção fatiada da mandíbula simplificada com carga mastigatória aplicada aos implantes comerciais. Fonte: Próprio autor.

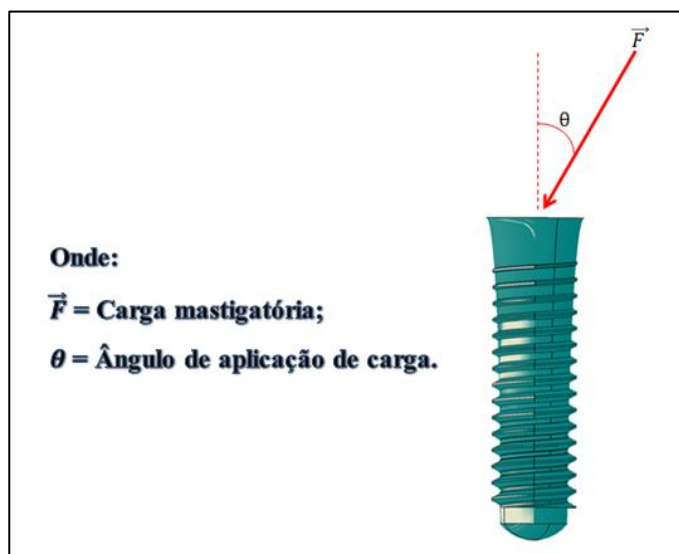


Figura 4.18 - Representação da carga externa aplicada ao implante comercial na simulação. Fonte: Próprio autor.

4.4.2.2. Discretização e malha de elementos finitos

Com os modelos geométricos definidos, a próxima etapa foi a discretização e geração da malha de elementos finitos. Para esta etapa, foi utilizado o elemento C3D4 que é um elemento tetraédrico de 1ª ordem definido pelo software Abaqus, que possui quatro nós por elemento. Os elementos da mandíbula possuem dimensões de 0,5 mm e os elementos do implante possuem 0,25 mm. Elementos menores foram definidos para o implante por ele ser o foco do estudo. Nas Tabelas 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 encontram-se os dados dos elementos e nós para todos os modelos avaliados, como a quantidade de nós e elementos por geometria.

Tabela 4.5 - Detalhamento da malha de elementos finitos para os modelos 01, 03 e 05.

	Tamanho médio do elemento	Tipo de Elemento	Quantidade de nós	Quantidade de elementos
Implante comercial para 3° molar	0,25 mm	C3D4	11146	45286
Osso cortical (região do 3° molar)	0,5 mm	C3D4	11115	44350
Osso esponjoso (região do 3° molar)	0,5 mm	C3D4	20900	99540

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4.6 - Detalhamento da malha de elementos finitos para os modelos 02, 04 e 06.

	Tamanho médio do elemento	Tipo de Elemento	Quantidade de nós	Quantidade de elementos
Implante autoral para 3° molar	0,25 mm	C3D4	10192	42204
Osso cortical (região do 3° molar)	0,5 mm	C3D4	11383	45473
Osso esponjoso (região do 3° molar)	0,5 mm	C3D4	20776	100224

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4.7 - Detalhamento da malha de elementos finitos para os modelos 07, 09 e 11.

	Tamanho médio do elemento	Tipo de Elemento	Quantidade de nós	Quantidade de elementos
Implante comercial para incisivo	0,25 mm	C3D4	6211	24736
Osso cortical (região do incisivo)	0,5 mm	C3D4	8517	33915
Osso esponjoso (região do incisivo)	0,5 mm	C3D4	7413	31371

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4.8 - Detalhamento da malha de elementos finitos para os modelos 08, 10 e 12.

	Tamanho médio do elemento	Tipo de Elemento	Quantidade de nós	Quantidade de elementos
Implante autoral para incisivo	0,25 mm	C3D4	10206	43984
Osso cortical (região do incisivo)	0,5 mm	C3D4	12022	49607
Osso esponjoso (região do incisivo)	0,5 mm	C3D4	11146	49003

Fonte: Próprio autor.

Dois exemplos de geração de malha podem ser observados nas Figuras 4.19 e 4.20. Assim como no caso anterior, apesar das figuras estarem exemplificando apenas os implantes comerciais, a metodologia para os implantes proposta / autorais é a mesma

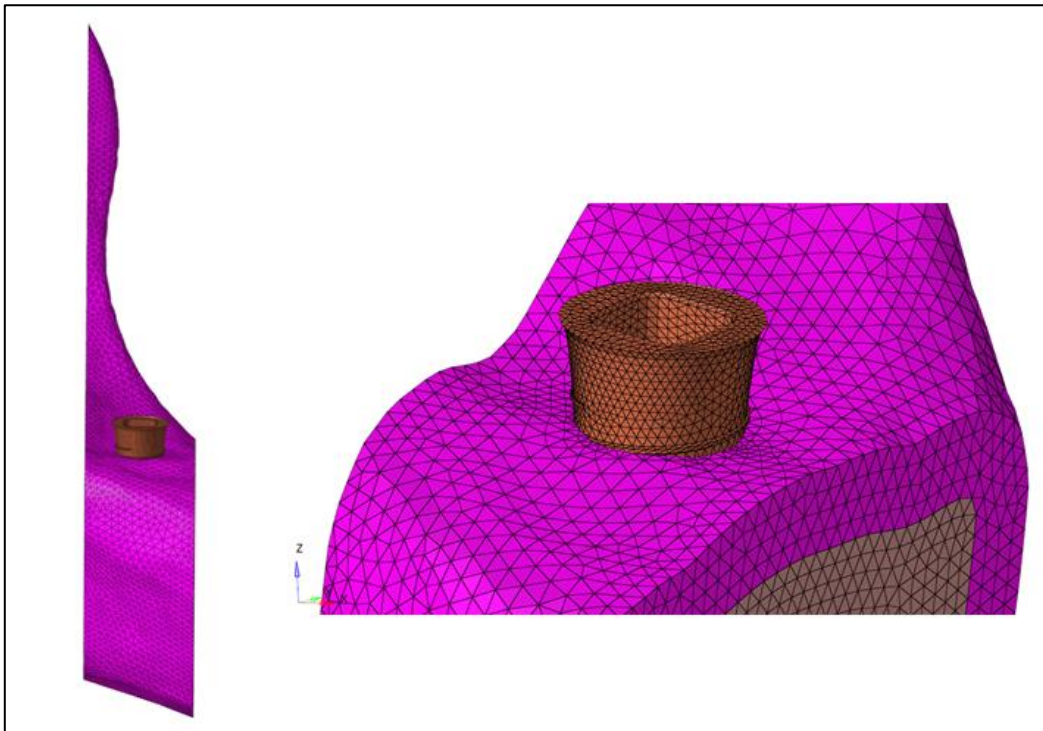


Figura 4.19 - Malha de elementos finitos gerada para a região do terceiro molar. Fonte: Próprio autor.

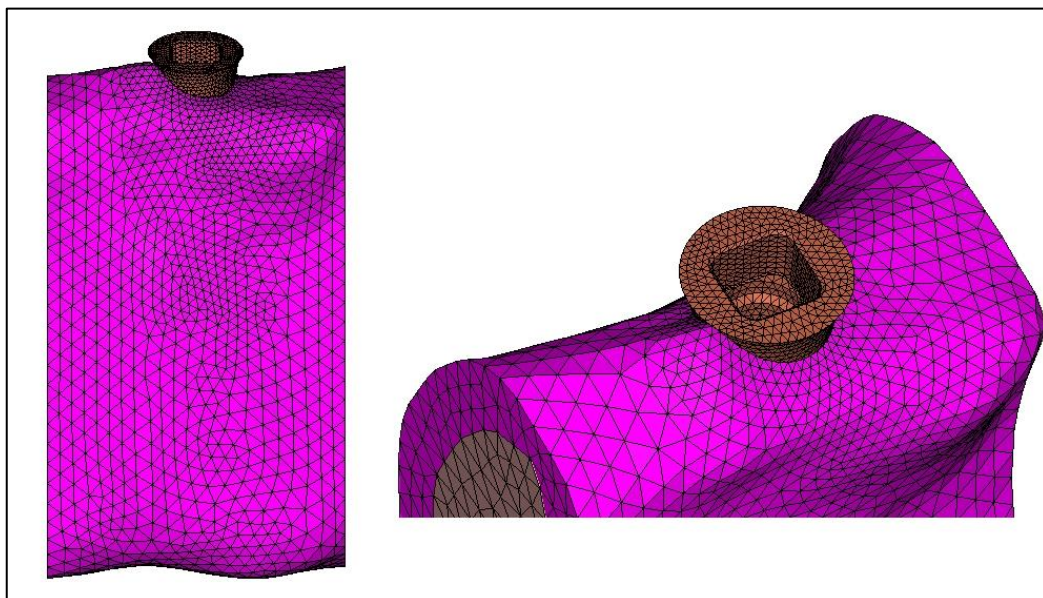


Figura 4.20 - Malha de elementos finitos gerada para a região do incisivo central. Fonte: Próprio autor.

4.4.2.3. Condições de contorno

Com a finalidade de simplificar o processamento computacional foi considerada a condição de contorno de suporte fixa sem graus de liberdade nas faces seccionadas na mandíbula. E por fim, contato do tipo TIE, ou seja, a condição de implante “colado” à mandíbula, sem graus de liberdade e sem a existência de atrito. Tais condições também podem ser visualizadas nas Figura 4.21 e 4.22.

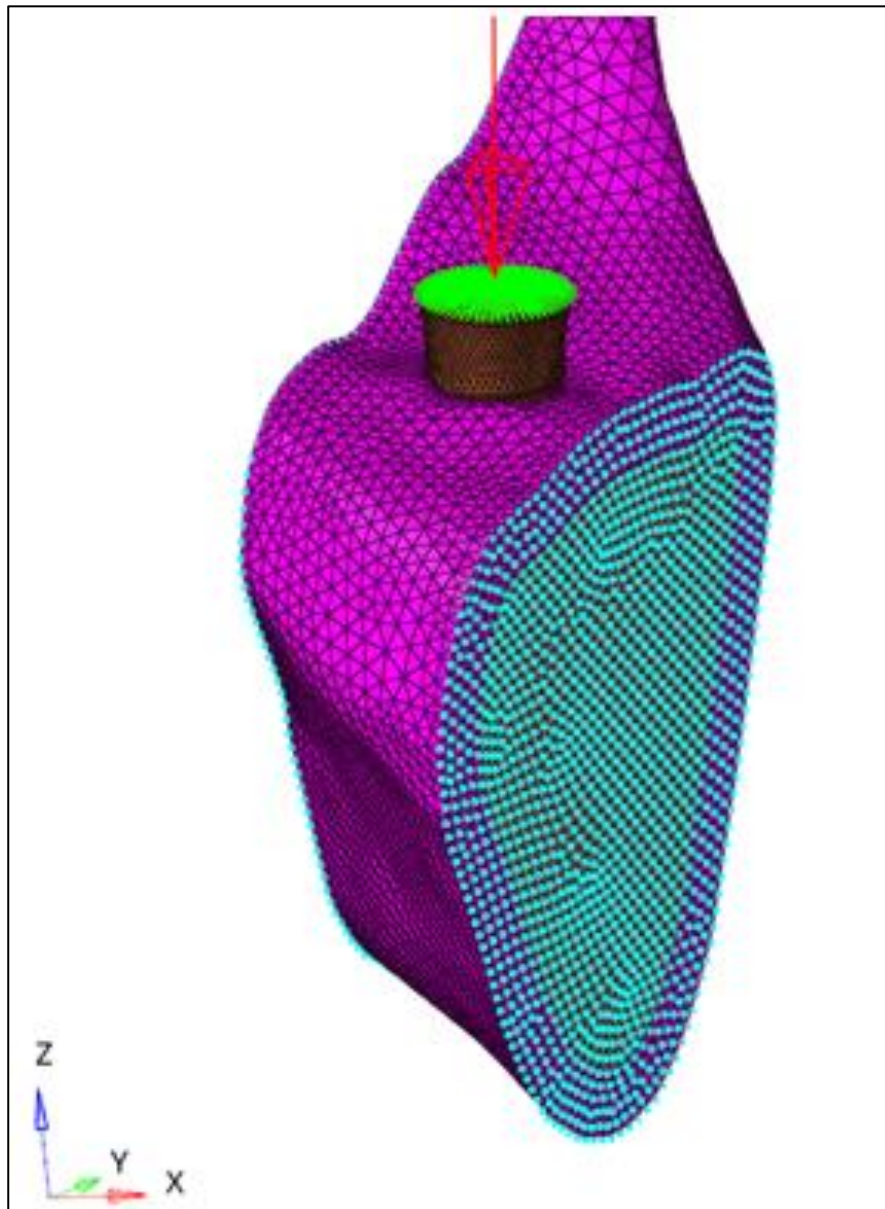


Figura 4.21 - Carga aplicada ao implante e condição de contorno na seção do 3º molar. Fonte: Próprio autor.

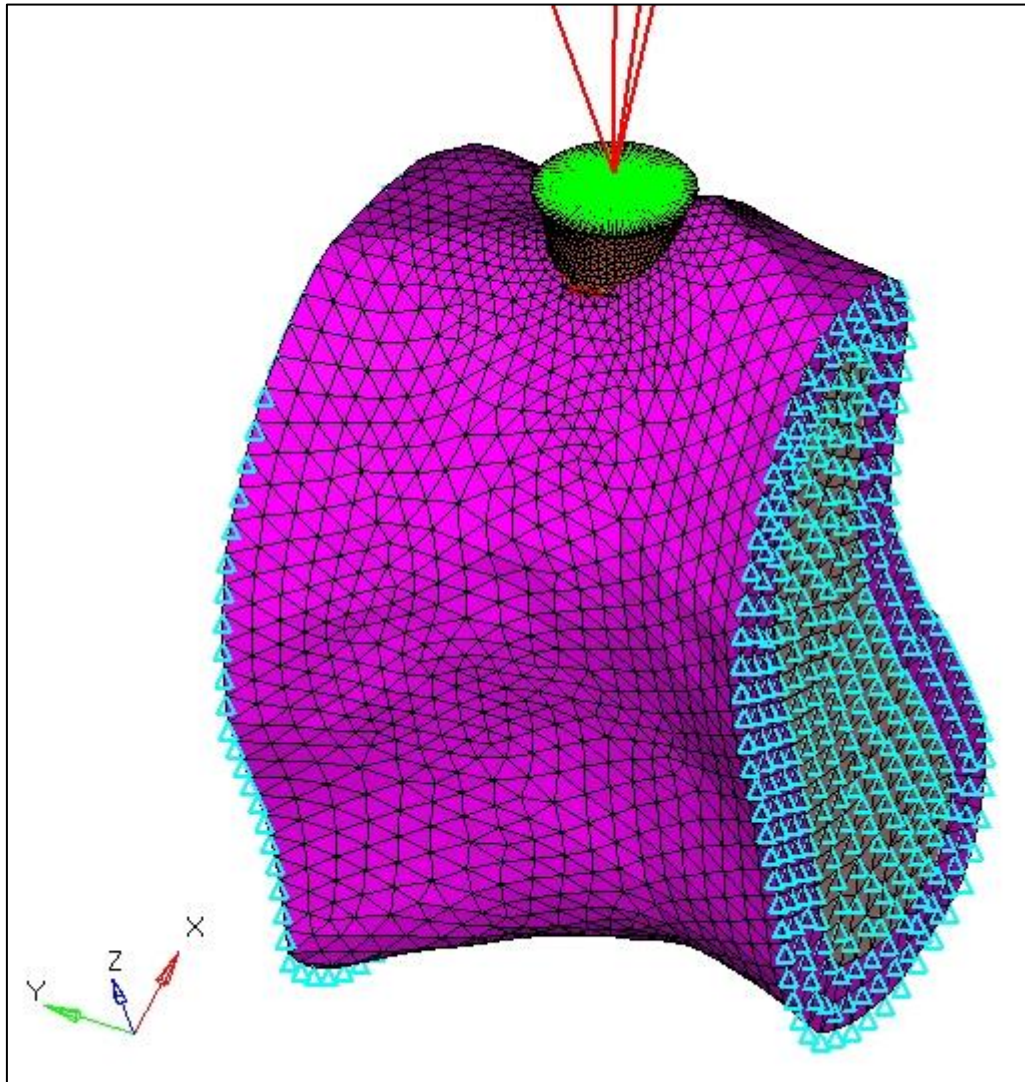


Figura 4.22 - Carga aplicada ao implante e condição de contorno na seção do incisivo central. Fonte: Próprio autor.

Com a finalidade de validação do tamanho de mandíbula utilizado, foram feitas três simulações considerando a mandíbula seccionada com largura equivalente à 2 vezes, 3 vezes e 4 vezes o diâmetro do implante. Nas três simulações foi considerado implante comercial de titânio com critério de falha de von Mises. Foram obtidos os resultados 238,9697 MPa; 238,8895 MPa e 238,7583 MPa respectivamente.

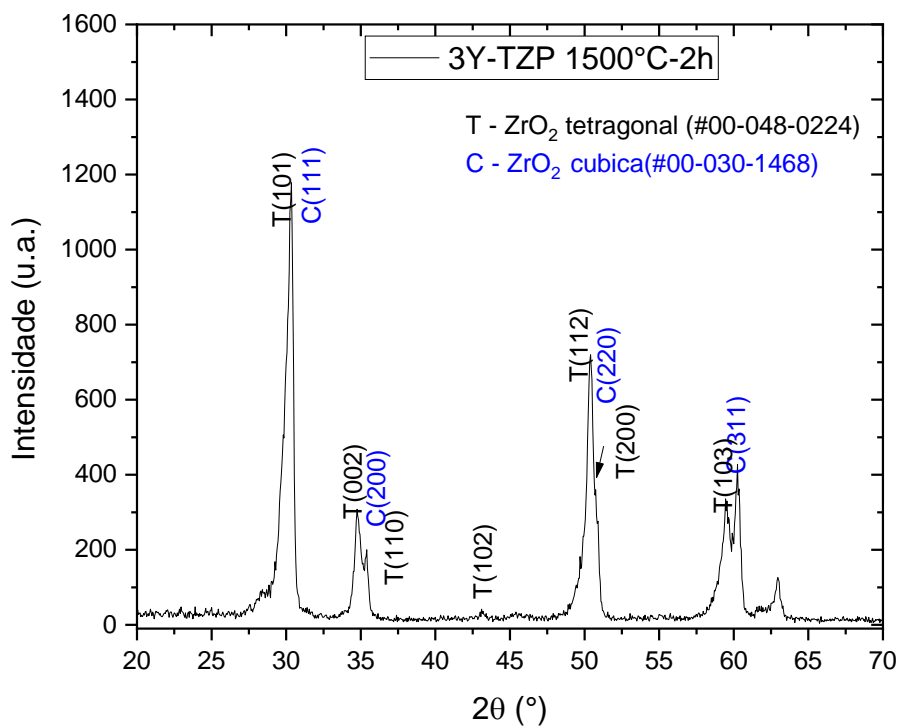
Como foram valores muito próximos, foi considerada a mandíbula com largura de 2 vezes o diâmetro do implante em todos os modelos gerados. Assim, foi possível obter resultados próximos aos de uma mandíbula com largura maior e diminuir o tempo de processamento do modelo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

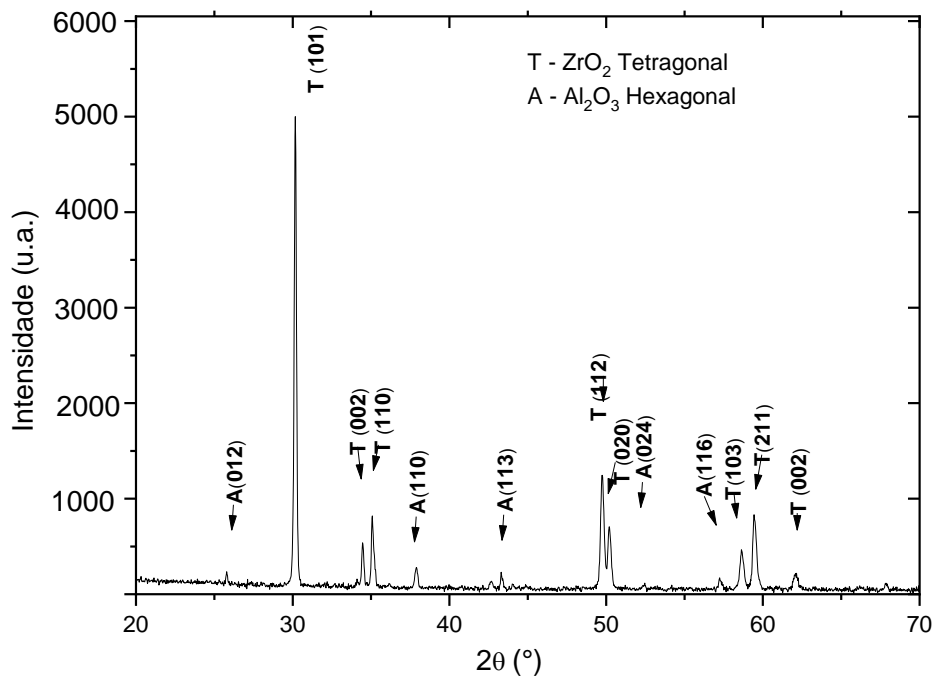
5.1. Caracterizações de amostras sinterizadas

As densidades relativas medidas para o grupo de amostras sinterizadas apresentaram valores de $99,5 \pm 0,3\%$ (3Y-TZP) e $99,3 \pm 0,2\%$ para Ce-TZP/ Al_2O_3 . Esses resultados são importantes para confirmar que a porosidade residual dessas cerâmicas apresenta valores baixos, que portanto não interferem significativamente das propriedades mecânicas do material. Dessa forma, os valores de densidade relativa obtidos para ambos os materiais cerâmicos foram considerados adequados para aplicações estruturais.

A Figura 5.1 mostra os difratogramas de raios X de amostras sinterizadas, submetidas à degradação hidrotérmica. Os difratogramas são de amostras com superfícies polidas, com perfil semelhante às superfícies originais sem polimento. A Tabela 5.1 apresenta os resultados do refinamento de Rietveld para os diferentes materiais avaliados neste trabalho.



(a)



(b)

Figura 5.1 - Difratoformas de raios-X das amostras cerâmicas sinterizadas.: a) 3Y-TZP; b) Ce-TZP/Al₂O₃.

Tabela 5.1 - Refinamento de Rietveld das cerâmicas estudadas nesse trabalho.

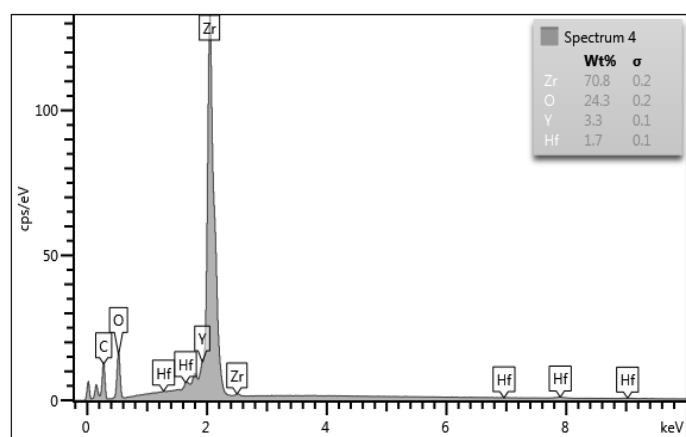
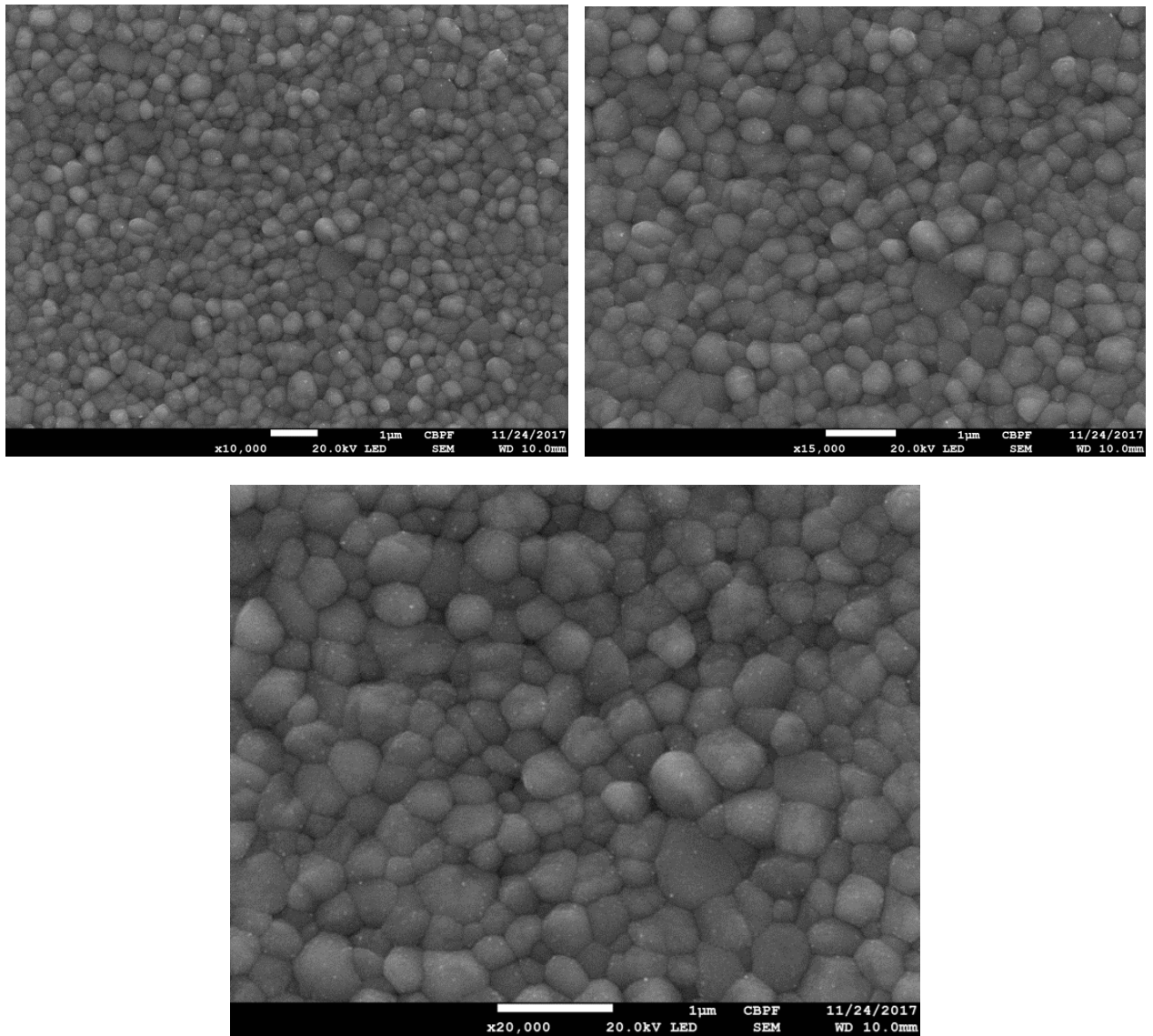
.Parametros de Rede	3Y-TZP	Ce-TZP/Al ₂ O ₃
ZrO ₂ –tetragonal (P42/nmc) (t-ZrO ₂) (LAMAS et. al., 2006)	a = 3.604(5) Å c = 5.178(5) Å V = 67.30 Å ³	a = 3.622(8) Å c = 5.213(3) Å V = 68.42 Å ³
Tetragonalidade (c/a√2)	1.015(8)	1.017(7)
Al ₂ O ₃ –hexagonal (R-3c) (α-Al ₂ O ₃) (LUTEROTTI & SCARDI, 1990)	-	a = 4.755(3) Å c = 12.998(9) Å V = 254.56 Å ³
Composição de fases	100% t-ZrO ₂	75.6% t-ZrO ₂ 24.4% α-Al ₂ O ₃

Fonte: Próprio autor.

Conforme ilustrado na tabela 5.1, as amostras sinterizadas de 3Y-TZP apresentam 100% de fase tetragonal, (t)-ZrO₂. Possível transformação de fase, $t \rightarrow m$, não foi detectada na análise de difração de raio X, possivelmente devido ao limite de detecção do difratômetro de raios X utilizado na caracterização, usualmente próximo a 3%. LANGE et al. (1982) propuseram que $t \rightarrow m$ transformações de policristais de ZrO₂ tetragonais estabilizados a 3% de Y₂O₃ (3Y-TZP) em meio aquoso ocorrem pela remoção de íons ítrio de superfícies particuladas por um processo de lixiviação local nas células unitárias tetragonais presentes em grãos superficiais. Ocorre uma desestabilização localizada da estrutura tetragonal, dando origem à nucleação de uma estrutura monoclinica quando a energia livre para a transformação é atingida no grão. Segundo os autores, o núcleo monoclinico cresce devido à depleção de ítrio até atingir um tamanho crítico. A partir deste momento inicia-se um processo autocatalítico e ocorre a transformação completa do grão sem necessidade de difusão de ítrio;

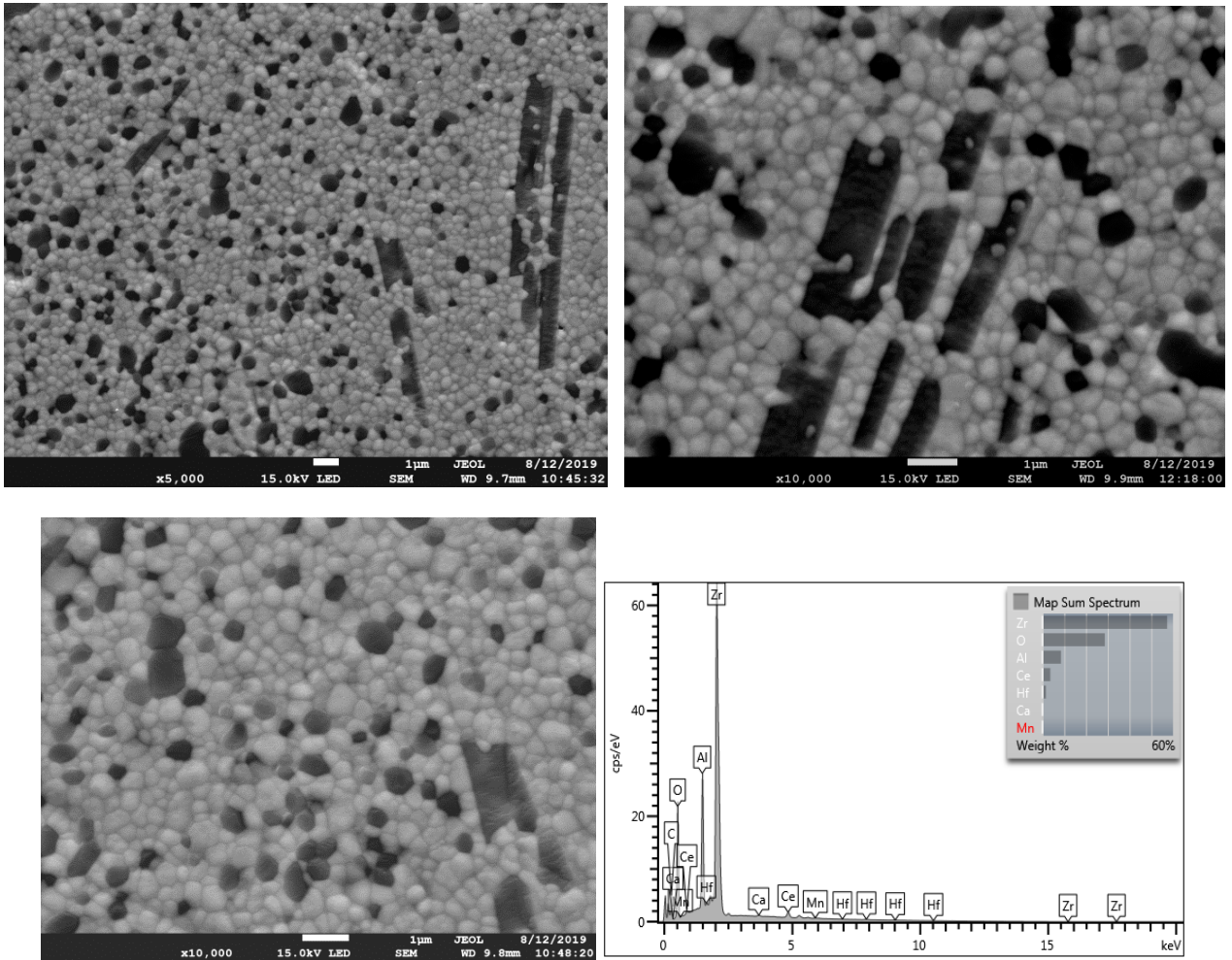
Por outro lado, o compósito Ce-TZP/Al₂O₃ apresenta, após sinterização, as fases α -Al₂O₃ utilizadas como reforço do material e a fase (t)-ZrO₂. A resistência à degradação deste compósito é verificada nos resultados de difração de raios X, onde o $t \rightarrow m$ não é observado para nenhuma condição de exposição realizada em autoclave. Esses resultados são consistentes com trabalhos anteriores (RAMESH et al., 2018) e são atribuídos à incorporação do Ce⁴⁺ na estrutura da zircônia que é mais compacta, com menos vacâncias, dificultando a troca iônica entre o soluto e os íons OH. Este efeito desestabilizaria a estrutura e promoveria uma transformação $t \rightarrow m$ precoce. Assim, grãos tetragonais de ZrO₂ estabilizados com CeO₂ são notavelmente mais estáveis do que ZrO₂ estabilizados com Y₂O₃. O refinamento de Rietveld realizado em amostras sinterizadas são indicativos de que a fase tetragonal ZrO₂ dos compósitos Ce-TZP/Al₂O₃ apresenta uma ligeira expansão dos parâmetros de rede ("a" = 3,62 Å, "c" = 5,21 Å), quando comparado ao 3Y-TZP ("a" = 3,60 Å, "c" = 5,17 Å), mas preservando a proporção entre os parâmetros "a" e "c". Com isso, a tetragonalidade ($c/a\sqrt{2}$) não é alterada significativamente, mantendo a relação $c/a\sqrt{2} = 1,015$ para 3Y-TZP monolítico e $c/a\sqrt{2} = 1,017$ para o composto Ce-TZP/ Al₂O₃.

As Figuras 5.2 e 5.3 mostra micrografias de amostras sinterizadas 3Y-TZP e Ce-TZP/Al₂O₃.

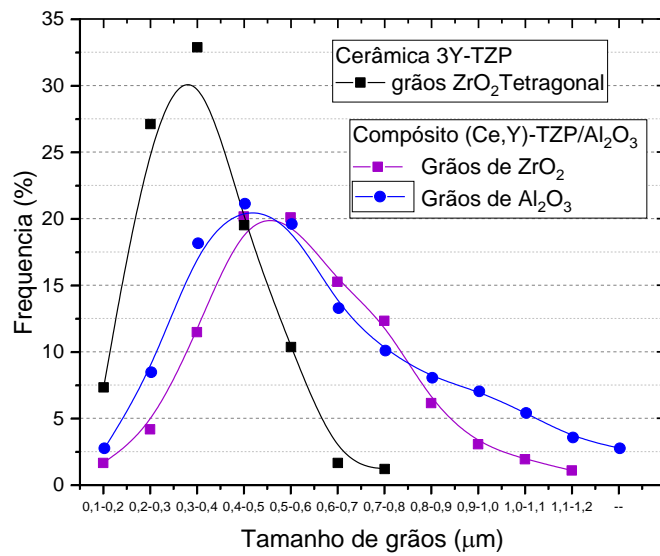


(a)

Figura 5.2 - Micrografias em MEV de cerâmicas 3Y-TZP sinterizadas,



(b)



(c)

Figura 5.3 - a) Micrografias em MEV de composto Ce-TZP/ Al_2O_3 , b) distribuição de tamanho de grãos das amostras sinterizadas.

Observa-se que as amostras 3Y-TZP, Figura 5.2 e Figura 5.3(b), apresentam grãos equiaxiais de (t)-ZrO₂ com distribuição de grãos monomodal estreita de tamanho médio de $0,48 \pm 0,17 \mu\text{m}$. As micrografias revelaram que os grãos tetragonais de ZrO₂ existentes neste material estão, em sua maioria, concentrados em uma faixa de tamanhos de grãos que permite maior capacidade de tenacidade. Basu (BASU, 2005) em sua revisão de literatura sobre os mecanismos de tenacidade do Y-TZP, afirma, com base em pesquisas anteriores, que grãos com tamanho médio entre 0,1 e 1,0 μm proporcionam melhores resultados de tenacidade à fratura desse material.

O compósito Ce-TZP/Al₂O₃, Figura 5.3, possui microestrutura complexa, contendo grãos tetragonais de ZrO₂ com tamanho de grão médio de $0,75 \pm 0,22 \mu\text{m}$ circundados por grãos de Al₂O₃ (fase escura) bem distribuídos. Esses grãos de alumina, observados neste compósito, apresentam duas morfologias bastante distintas: Parte da microestrutura apresenta grãos equiaxiais de Al₂O₃, homoganeamente dispersos na matriz de zircônia tetragonal, para todos os cortes micrográficos analisados. Neste caso, aproximadamente 75% dos grãos tem uma faixa de tamanho médio entre 0,3 e 0,7 μm e 25% com tamanho médio entre 0,7 e 1,2 μm . Outra parte dos cristais de alumina observados apresenta aspecto alongado, disperso aleatoriamente na matriz de zircônia. Esses grãos em forma de plaquetas apresentaram tamanhos acima de 10 μm e proporção entre 6:1 e 10:1.

A análise EDS realizada na interface entre os grãos de ZrO₂ e uma plaqueta mostrada na Figura 5.3, certifica que essas plaquetas são efetivamente Al₂O₃. A avaliação da micrografia com menor aumento mostrou algumas camadas de grãos de ZrO₂ na região circundante das plaquetas de Al₂O₃ existentes nos materiais sinterizados. Não são observados grãos esféricos de Al₂O₃ na vizinhança dessas camadas, indicativo de que essas plaquetas são desenvolvidas in situ por sinterização reativa, utilizando como fonte de partida as partículas de alumina presentes na matéria-prima e outras possíveis fontes presentes no pó de partida, além ao (m)-ZrO₂(Ce-ss).

Na vizinhança das plaquetas de alumina há uma alta concentração de ZrO₂ tetragonal. Conforme observado em trabalhos anteriores (NAKAMOTO et. al., 1998, NAWA, 1998, KERN, 2014). a formação de plaquetas de Al₂O₃ obtidas in situ, durante a sinterização em estado sólido de Ce-TZP/ Al₂O₃ ocorreu quando partículas de alumina foram misturadas com pequenas concentrações de óxidos dopantes como SrO, MnO, TiO₂ e CeO₂, dando origem a hexaluminatos (de diferentes metais). Nesses casos, os mecanismos de reação ainda não estão bem estabelecidos e requerem investigações mais extensas. A composição química

precisa deste pó cerâmico é desconhecida, dificultando o entendimento das reações associadas à formação desta fase.

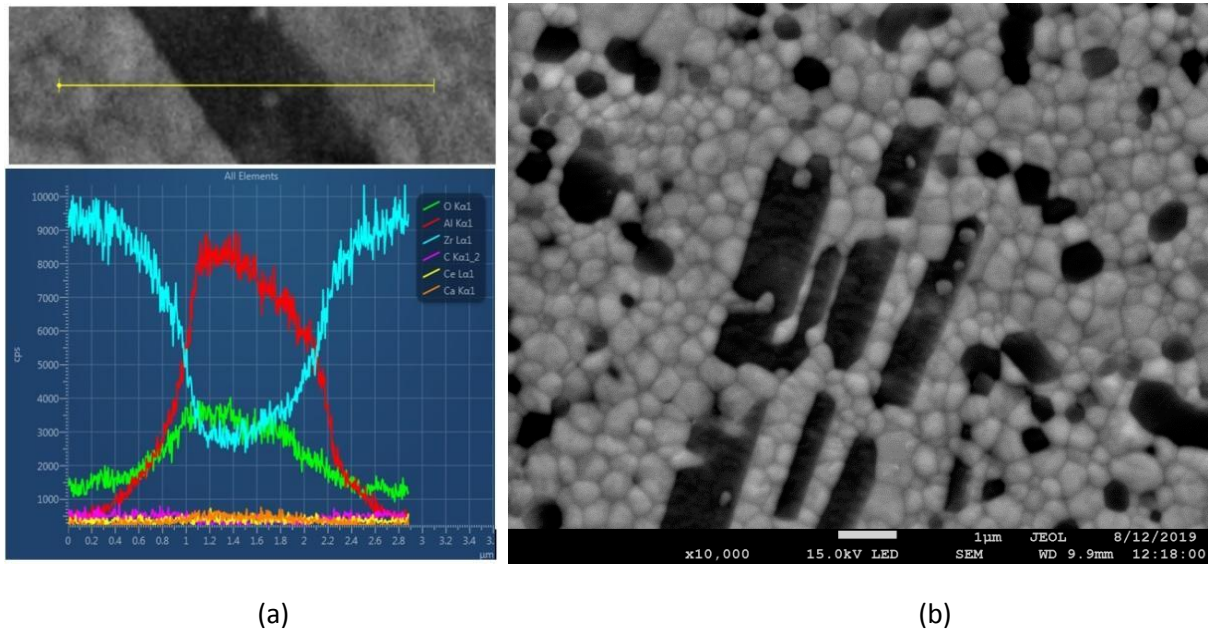


Figura 5.4 - (a) Mapeamento EDS do composto Ce-TZP/ Al_2O_3 , destacando as plaquetas de Al_2O_3 (fase escura), (b) detalhes da distribuição de grãos de zircônia ao redor de plaquetas de Al_2O_3 .

5.2. Propriedades mecânicas

A Tabela 5.2 mostra os resultados das propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos sinterizados após degradação hidrotermal.

Tabela 5.2 - Propriedades mecânicas de amostras sinterizadas (1500°C - 2h).

Material	Módulo de Elasticidade (GPa)	Dureza Vickers ($\text{HV}_{1000\text{gF}}$)	Tenacidade à Fratura ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	Resistência a Flexão (MPa)
3Y-TZP	195.3 ± 4.2	1325 ± 27	7.2 ± 0.5	861 ± 81
Ce-TZP/ Al_2O_3	228.3 ± 6.5	1427 ± 46	11.3 ± 0.4	1192 ± 90

Os materiais apresentaram módulo de Young na faixa de 195 GPa e 228 GPa para as cerâmicas 3Y-TZP e Ce-TZP/ Al_2O_3 respectivamente. Além disso, a dureza Vickers ficou em torno de 1325 ± 27 HV (3Y-TZP) e 1427 ± 46 HV Ce-TZP/ Al_2O_3) revelando um aumento de dureza e módulo de Young com adições de Al_2O_3 . Os valores de tenacidade à fratura foram calculados utilizando os valores de dureza Vickers e módulo de elasticidade. As medições de trincas, realizadas nas endentações, mostraram em todos os materiais, valores de “c/a”

abaixo de 2,5, caracterizando os sistemas de trincas Palmqvist. Os resultados do presente trabalho mostram que a tenacidade à fratura (K_{IC}) calculada para 3Y-TZP atingiu $7,2 \pm 0,5$ MPa.m^{1/2} enquanto os compósitos Ce-TZP/Al₂O₃ apresentaram valores medianos de K_{IC} de $11,3 \pm 0,4$ MPa.m^{1/2}, 57% maior quando comparado à cerâmica 3Y-TZP.

Os resultados de resistência à flexão biaxial apresentados na Tabela 5.2 indicaram que, para os corpos de prova 3Y-TZP, a resistência à fratura foi de 1192 MPa enquanto para os compósitos Ce-TZP/Al₂O₃ a resistência à fratura atingiu valores médios de 861 MPa. Os resultados da estatística de Weibull utilizados nos valores de resistência à flexão biaxial são apresentados na Figura 5.5. Observa-se que as amostras 3Y-TZP revelaram módulo de Weibull de $m = 10,8$ Para os compósitos Ce-TZP/Al₂O₃ valores de Weibull $m = 10,4$ foram observados, o que indica que ambos materiais, mesmo apresentando valores médios de resistência a flexão distintos, apresentam alta e similar confiabilidade com módulos de Weibull excelentes para materiais cerâmicos, os quais usualmente se apresentam entre $m = 3 - 6$.

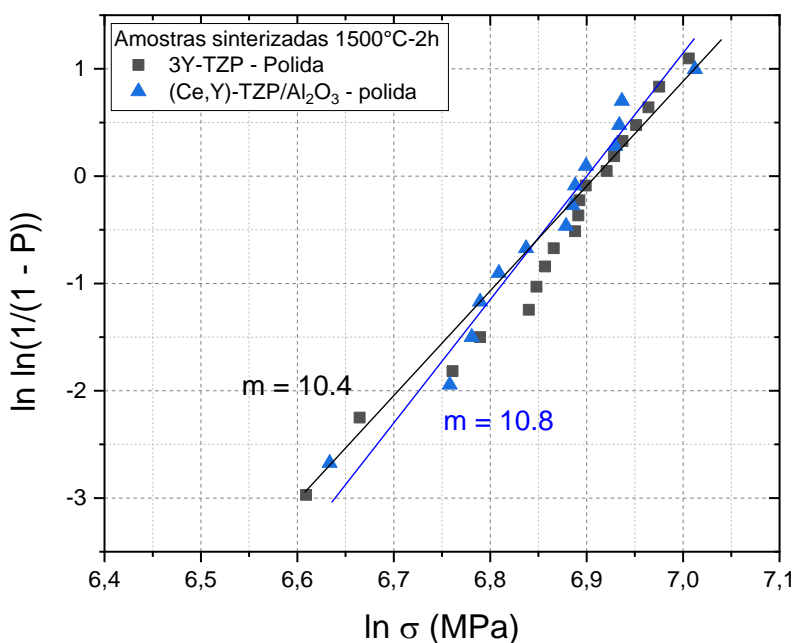


Figura 5.5 - Diagramas e Weibull de cerâmicas 3Y-TZP e Ce-TZP/Al₂O₃.

5.3. Simulações Numéricas

Todos os resultados para os critérios de falha podem ser observados de maneira detalhada conforme os Anexos I até V. As tabelas contêm os resultados das simulações considerando

cargas mastigatórias de 50 N até 500 N com incremento de 50 N em todos os casos independente do ângulo de aplicação da carga (45° ou 90°).

As distribuições de tensões para o implante isoladamente e para o conjunto geométrico implante + mandíbula também podem ser evidenciados de maneira mais detalhada nos Anexos VI a IX. Ao longo deste capítulo, as imagens estão focadas no implante isolado por ser o alvo do estudo e sofrer as impactos com a carga mastigatória. Todas as regiões de máximas independente do critério se localizam no implante e não na mandíbula.

Neste tópico o foco será discutir os resultados obtidos para diferentes materiais e geometrias com 500 N de carga mastigatória e ângulos de 90° e 45°, por serem os valores mais críticos.

5.3.1. Implante localizado no terceiro molar

Os primeiros implantes avaliados foram os de titânio para o terceiro molar (modelos descritos nas Figuras 4.5, 4.8, 4.13 e 4.14), por serem os modelos utilizados há mais tempo nas aplicações odontológicas. Seus principais resultados e distribuições de tensão podem ser visualizados na Figura 5.6. Conforme esperado, os resultados obtidos estão dentro dos parâmetros de cada critério, sendo mais críticos apenas nos casos de 500 N com 45° de ângulo de aplicação, cujo valor adimensional do critério de von Mises, que é o critério que mais se aproxima de valores experimentais, atingiu o valor unitário para o implante comercial.

O segundo tipo de implante avaliado foi o de zircônia tetragonal estabilizada em ítria (3Y-TZP) cujos resultados se encontram na Figura 5.7. Conforme citado anteriormente, como se trata de um material cerâmico (frágil) não é aconselhável aplicar o critério de von Mises que é voltado para materiais dúcteis, substituindo o mesmo pelo critério de Mohr Coulomb.

Por fim, também avaliado pelo critério de Mohr Coulomb, temos os resultados para os implantes do compósito Ce-TZP/Al₂O₃, conforme Figura 5.8. Avaliando as Figuras 5.7 e 5.8 podemos notar grande semelhança nos resultados de ambos os materiais cerâmicos. Os casos mais críticos de ruptura para ambos nos deu um valor de aproximadamente 0,325 muito inferiores ao limite que novamente é o valor unitário adimensional ($MC \leq 1$).

Em todos os casos a distribuição de tensões pela geometria é semelhante, sendo que as regiões onde os máximos se localizam no topo do implante, aonde a carga mastigatória é aplicada ou nas roscas iniciais mais próximas a esta região.

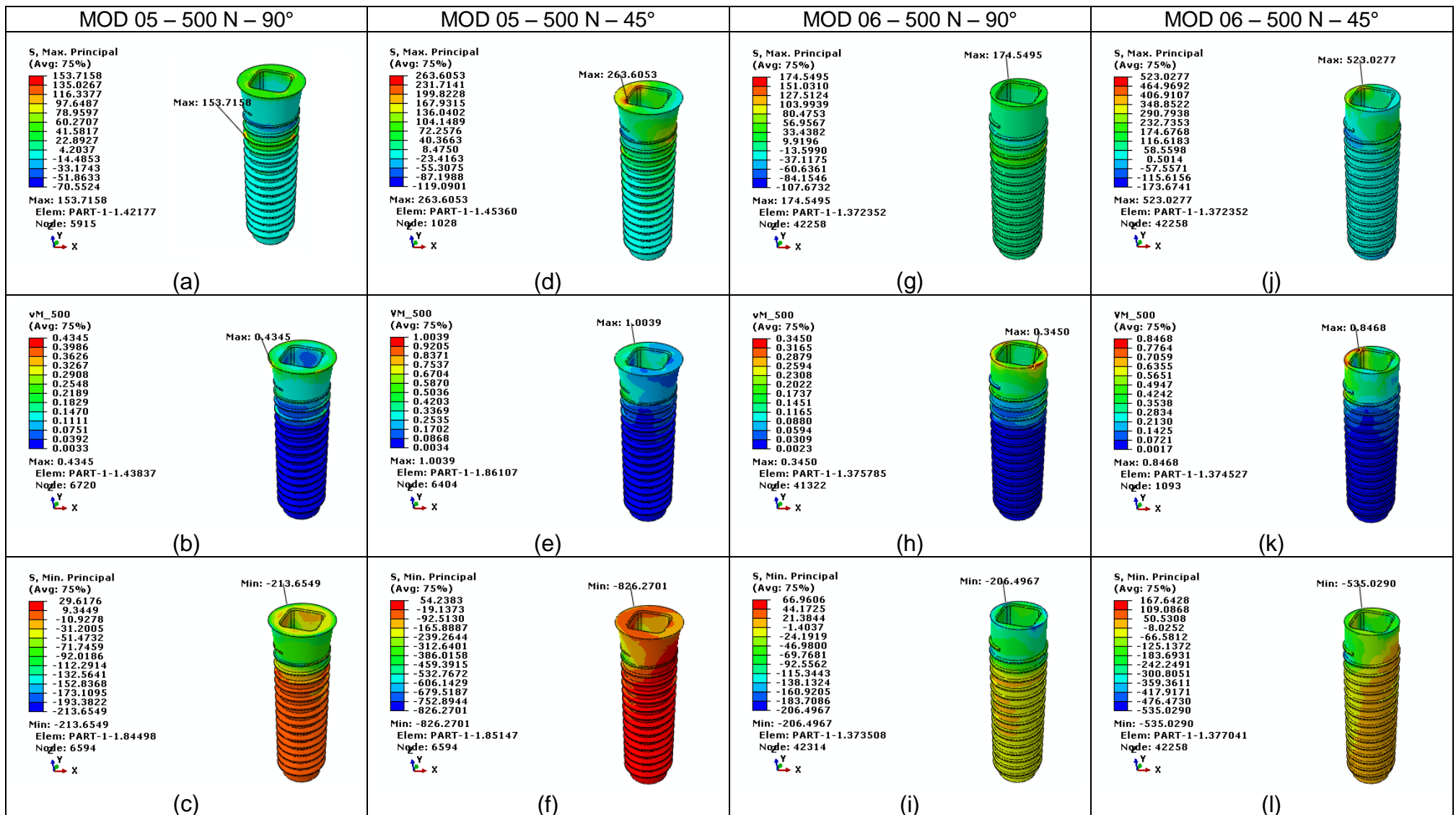


Figura 5.6 - Resultados das simulações para implante do terceiro molar utilizando Titânio e 500 N de carga mastigatória. Implante comercial e 90°: (a) Max Principal; (b) Von Mises; (c) Min Principal. Implante comercial e 45°: (d) Max Principal; (e) Von Mises; (f) Min Principal. Implante autoral e 90°: (g) Max Principal; (h) Von Mises; (i) Min Principal. Implante autoral e 45°: (j) Max Principal; (k) Von Mises; (l) Min Principal. Fonte: Próprio autor.

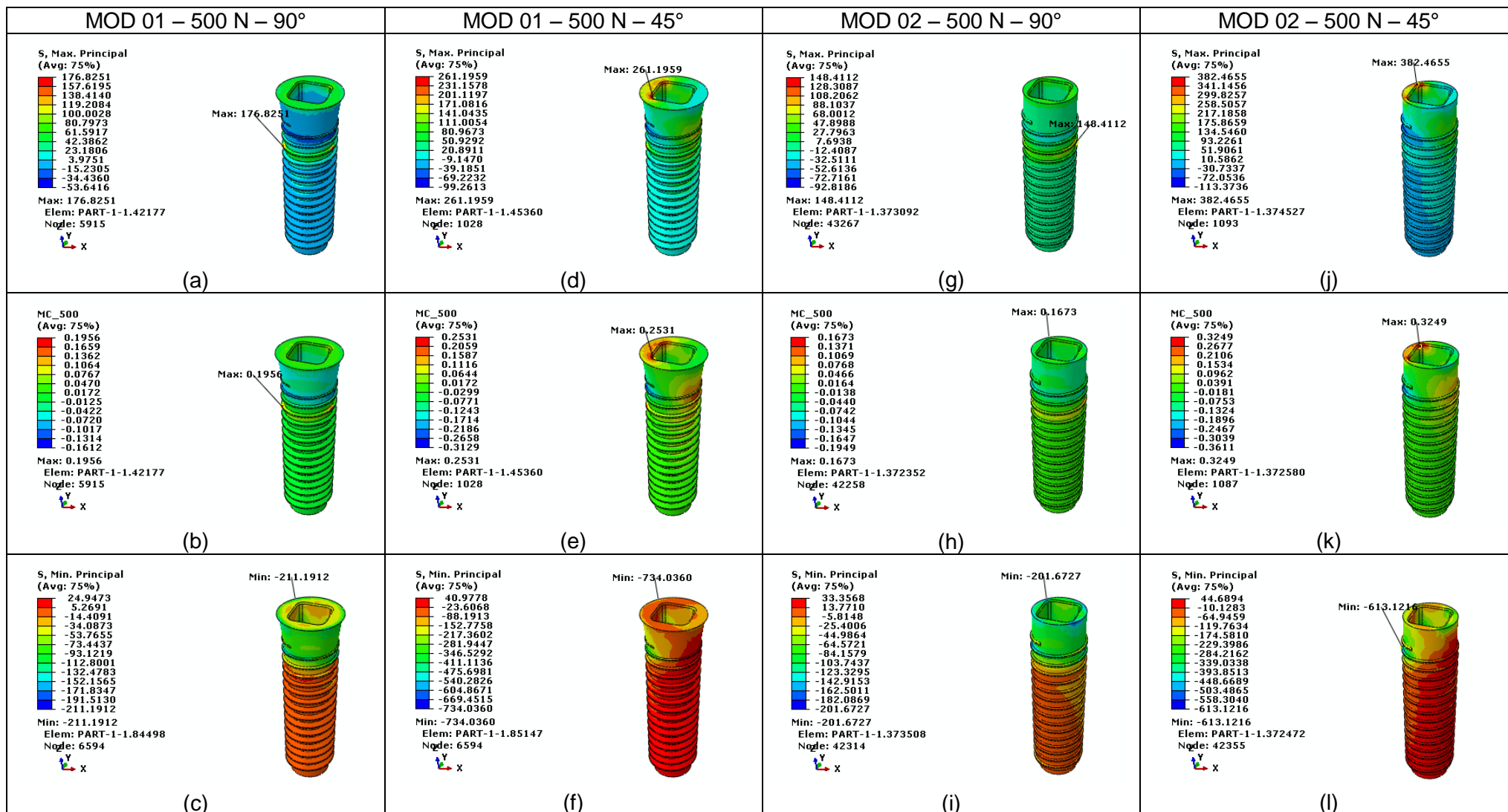


Figura 5.7 - Resultados das simulações para implante do terceiro molar utilizando cerâmica 3Y-TZP e 500 N de carga mastigatória. Implante comercial e 90°: (a) Max Principal; (b) Mohr Coulomb; (c) Min Principal. Implante comercial e 45°: (d) Max Principal; (e) Mohr Coulomb; (f) Min Principal. Implante autoral e 90°: (g) Max Principal; (h) Mohr Coulomb; (i) Min Principal. Implante autoral e 45°: (j) Max Principal; (k) Mohr Coulomb; (l) Min Principal. Fonte: Próprio autor.

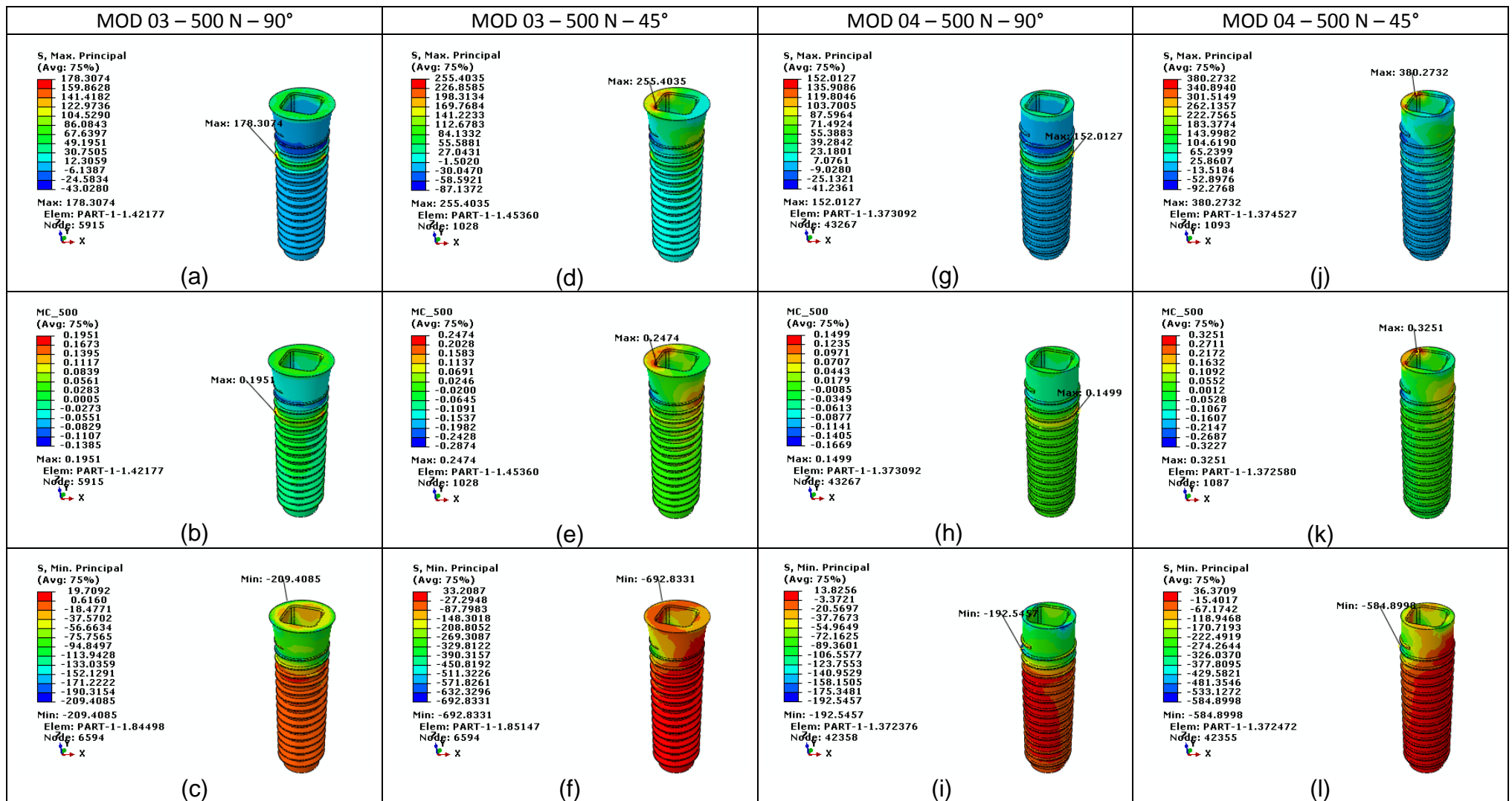


Figura 5.8 - Resultados das simulações para implante do terceiro molar utilizando cerâmica Ce-TZP/Al₂O₃ e 500 N de carga mastigatória. Implante comercial e 90°: (a) Max Principal; (b) Mohr Coulomb; (c) Min Principal. Implante comercial e 45°: (d) Max Principal; (e) Mohr Coulomb; (f) Min Principal. Implante autoral e 90°: (g) Max Principal; (h) Mohr Coulomb; (i) Min Principal. Implante autoral e 45°: (j) Max Principal; (k) Mohr Coulomb; (l) Min Principal. Fonte: Próprio autor.

5.3.2. Implante para incisivo central

O segundo grupo de implantes avaliado foi o de implantes para incisivo central (Figuras 4.6, 4.9, 4.15 e 4.16). Uma região oposta ao terceiro molar cujas cargas mastigatórias são maiores, este por sua vez normalmente possui cargas mais baixas. Porém, como um fator de segurança, foi considerada a mesma intensidade (de 50 N até 500 N). Além da geometria da mandíbula ser diferente, o comprimento do implante também é menor que o anterior.

Mais uma vez, por ser o nosso padrão comparativo de mercado, o primeiro material avaliado foi o titânio cujas distribuições de tensão e resultados para 500 N de carga mastigatória se encontram na Figura 5.9. Os resultados também foram positivos, de fato ainda melhores que para o terceiro molar. A tensão equivalente de von Mises mais alta foi de 0,7522. Aproximadamente 2/3 do valor unitário limite do parâmetro (75%).

Já as Figuras 5.10 e 5.11 demonstram os resultados de implantes de 3Y-TZP e Ce-TZP/ Al_2O_3 respectivamente. Novamente é possível observar semelhanças nos resultados de ambos os materiais frágeis. O pior resultado para ambos atingiu aproximadamente 34% apenas do limite unitário estipulado pelo critério de Mohr Coulomb, tendo ligeira variação centesimal entre os resultados de ambos.

A avaliação em diferentes cargas mastigatórias e em regiões diferentes da mandíbula com resultados positivos para os critérios de falha elástica/ruptura aumentam a variação de amostragens e conseqüentemente a confiabilidade mecânica destes materiais no uso odontológico.

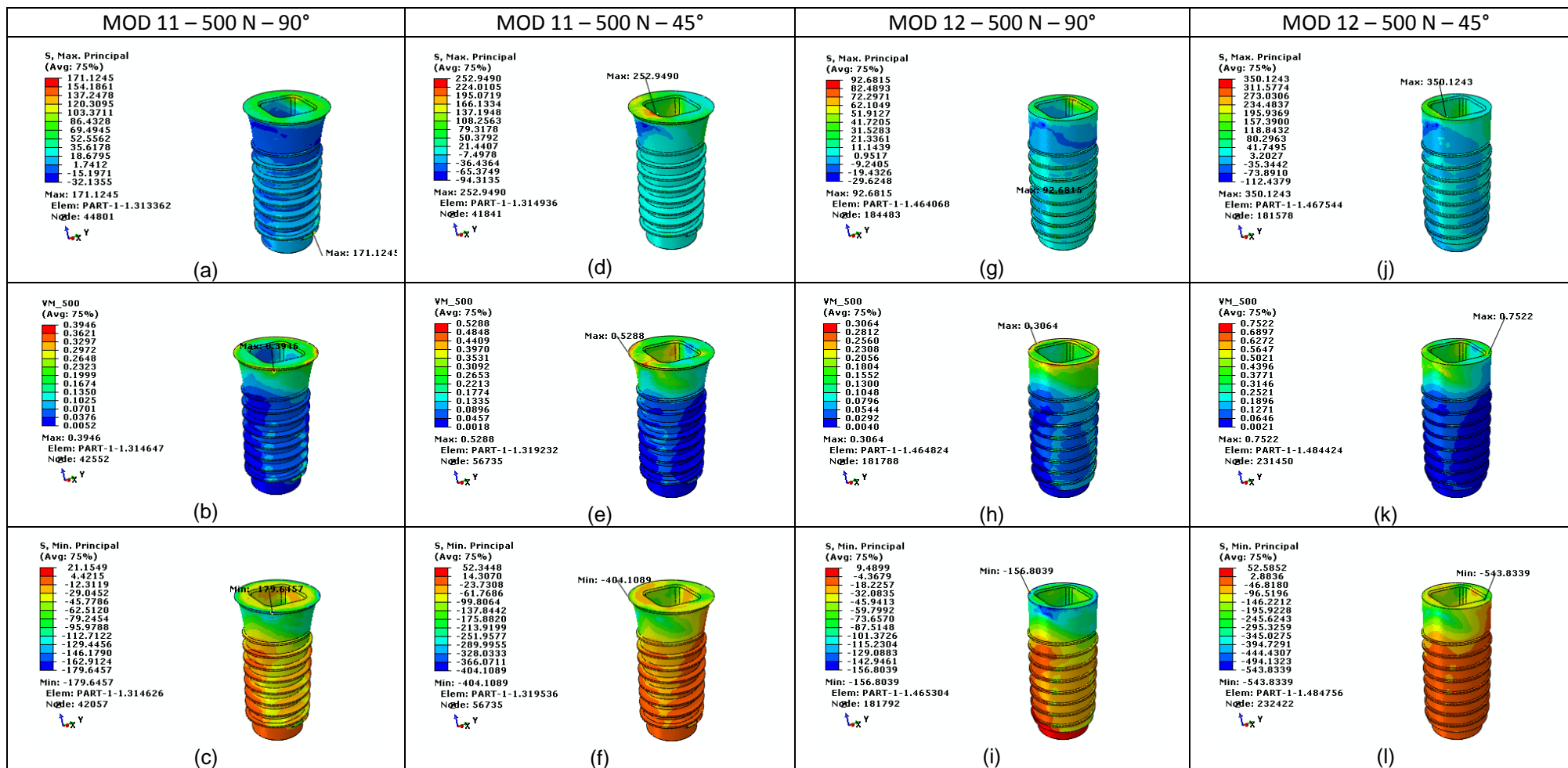


Figura 5.9 - Resultados das simulações para implante do incisivo central utilizando Titânio e 500 N de carga mastigatória. Implante comercial e 90°: (a) Max Principal; (b) Von Mises; (c) Min Principal. Implante comercial e 45°: (d) Max Principal; (e) Von Mises; (f) Min Principal. Implante autoral e 90°: (g) Max Principal; (h) Von Mises; (i) Min Principal. Implante autoral e 45°: (j) Max Principal; (k) Von Mises; (l) Min Principal. Fonte: Próprio autor.

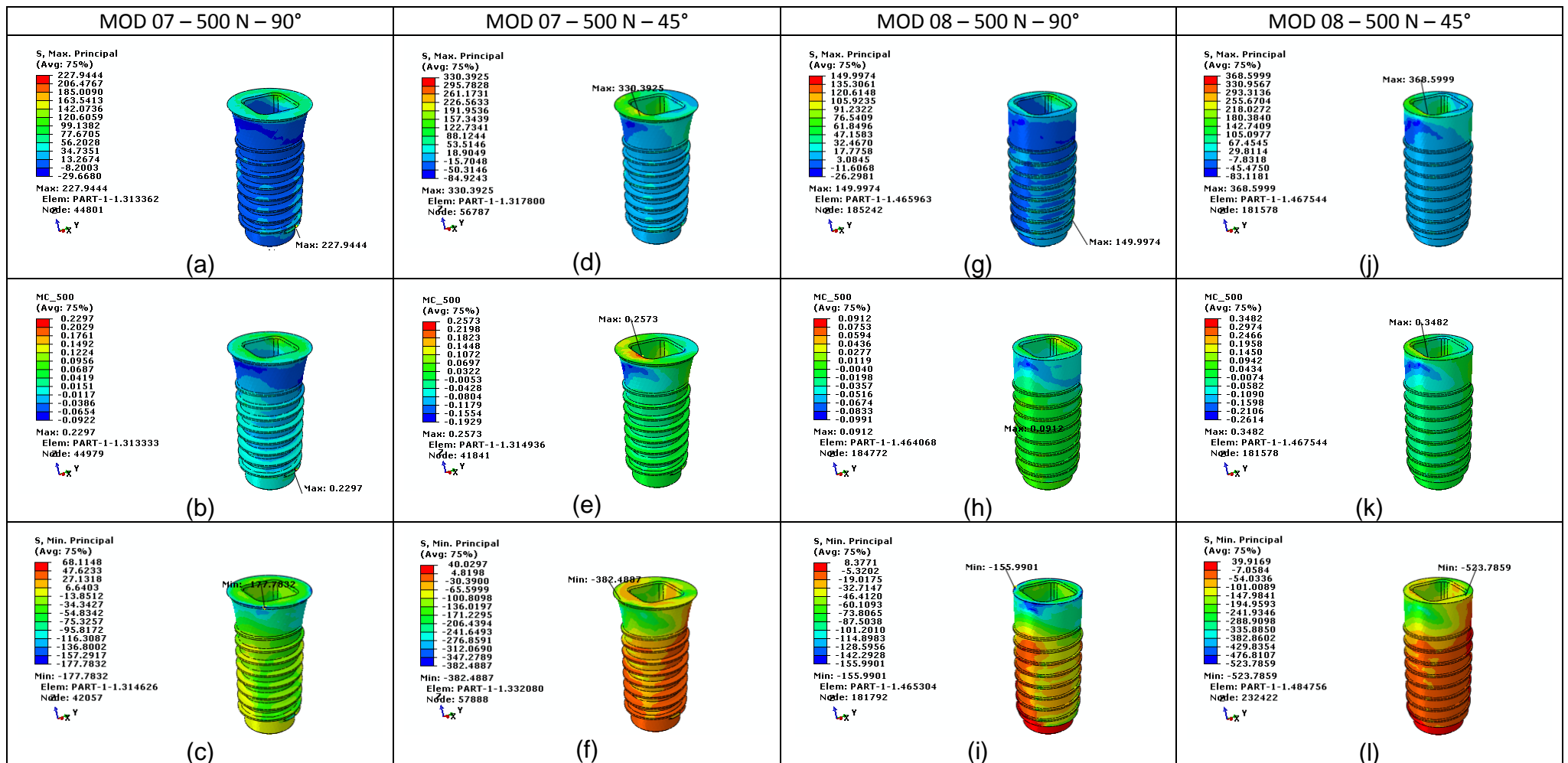


Figura 5.10 - Resultados das simulações para implante do incisivo central utilizando cerâmicas 3Y-TZP e 500 N de carga mastigatória. Implante comercial e 90°: (a) Max Principal; (b) Mohr Coulomb; (c) Min Principal. Implante comercial e 45°: (d) Max Principal; (e) Mohr Coulomb; (f) Min Principal. Implante autoral e 90°: (g) Max Principal; (h) Mohr Coulomb; (i) Min Principal. Implante autoral e 45°: (j) Max Principal; (k) Mohr Coulomb; (l) Min Principal. Fonte: Próprio autor.

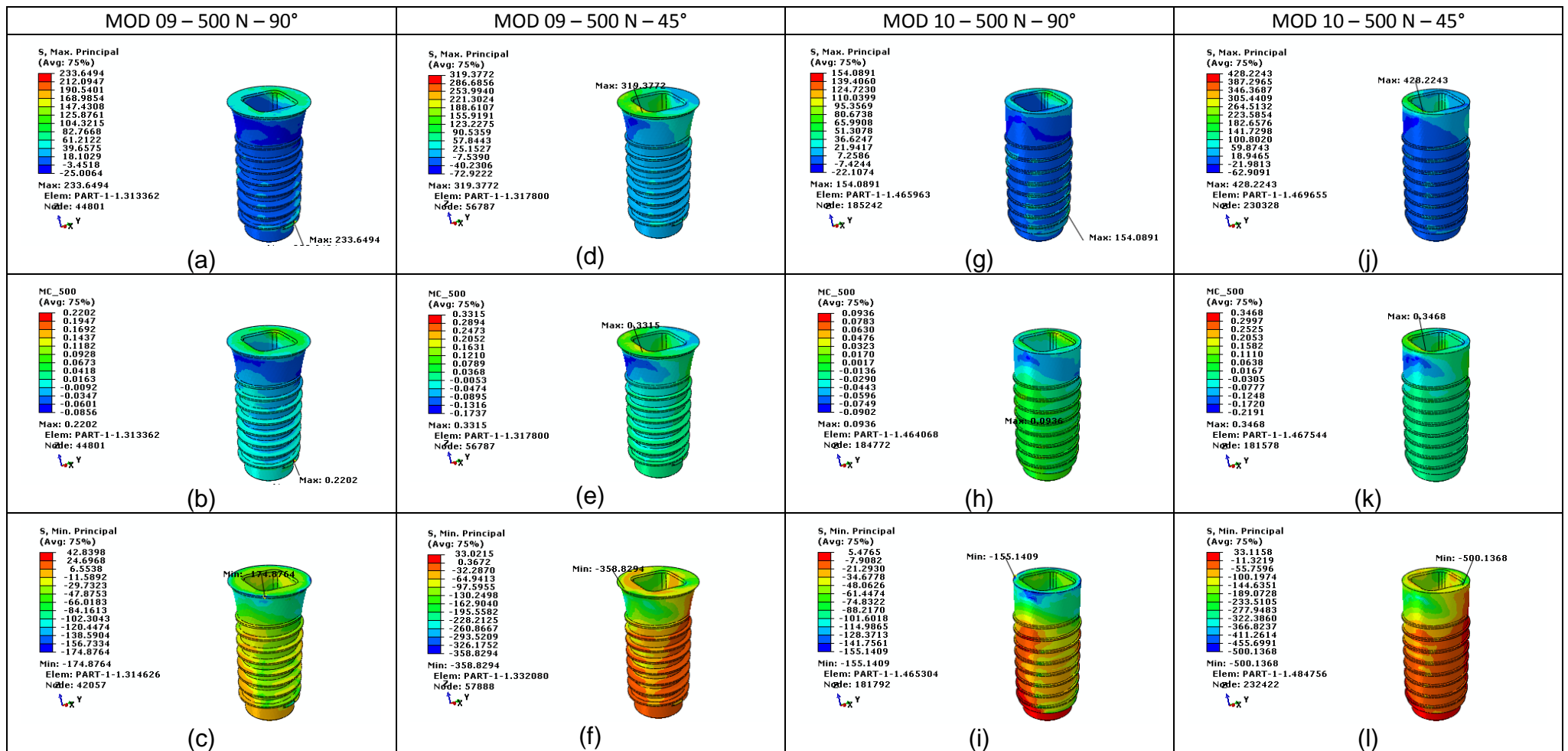


Figura 5.11 - Resultados das simulações para implante do incisivo central utilizando cerâmicas Ce-TZP/Al₂O₃ e 500 N de carga mastigatória. Implante comercial e 90°: (a) Max Principal; (b) Mohr Coulomb; (c) Min Principal. Implante comercial e 45°: (d) Max Principal; (e) Mohr Coulomb; (f) Min Principal. Implante autoral e 90°: (g) Max Principal; (h) Mohr Coulomb; (i) Min Principal. Implante autoral e 45°: (j) Max Principal; (k) Mohr Coulomb; (l) Min Principal. Fonte: Próprio autor.

5.3.3. Estudo de envelhecimento ósseo

A seguir serão aplicadas as degradações de módulo de elasticidade dos ossos cortical e esponjoso em função do envelhecimento com as informações descritas no item 4.3.

Os gráficos desenvolvidos neste tópico ilustram a variação dos resultados de Mohr Coulomb, para os materiais frágeis, e von Mises para o titânio de acordo com o envelhecimento por serem os principais critérios de falha utilizados neste trabalho.. Cada um contempla dois modelos, implante comercial com seus pontos representados por quadrados, e implante autoral, com seus pontos representados por triângulos. A carga mastigatória considerada para os mesmos foi a de valor extremo, 500 N, com e sem ângulo de aplicação (ou seja, 90° e 45°).

As Figuras 5.12 a 5.15 são os resultados de Mohr Coulomb para 3Y-TZP e Ce-TZP/Al₂O₃ respectivamente, as Figuras 5.16 e 5.17 demonstram os resultados de von Mises para Titânio. Todas estas para implantes do terceiro molar

Enquanto as Figuras 5.18 a 5.21 também são os resultados de Mohr Coulomb para 3Y-TZP e Ce-TZP/Al₂O₃ respectivamente e as Figuras 5.22 e 5.23 também demonstram os resultados de von Mises para Titânio. Porém, estas para implantes do incisivo central.

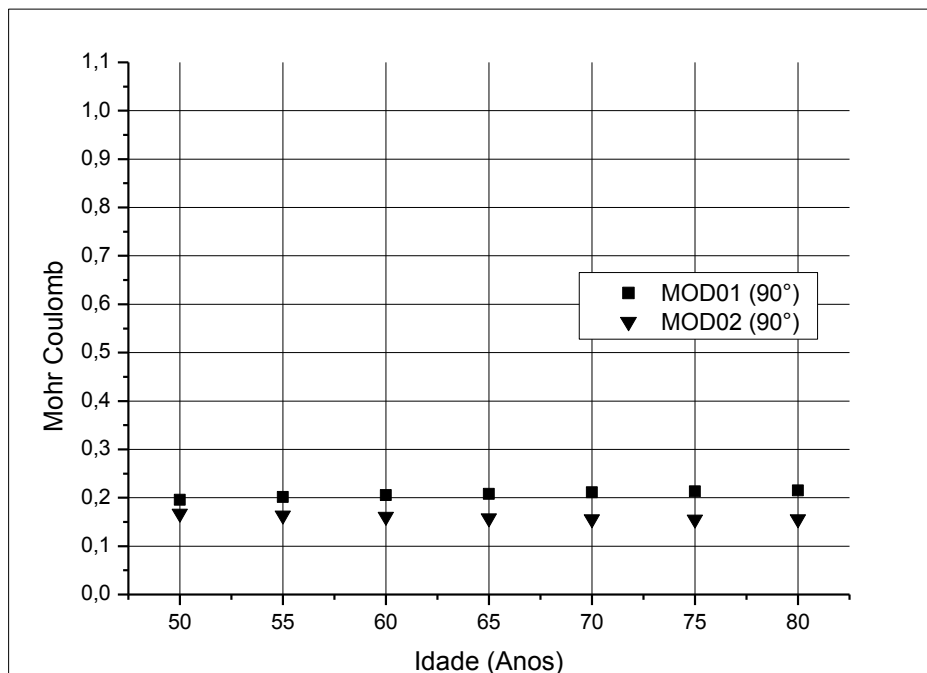


Figura 5.12 - Estudo de resultados para o critério de falha de Mohr Coulomb para implantes de terceiro molar comercial (MOD01) e autoral (MOD02) de 3Y-TZP com 500 N/90°. Fonte: Próprio autor

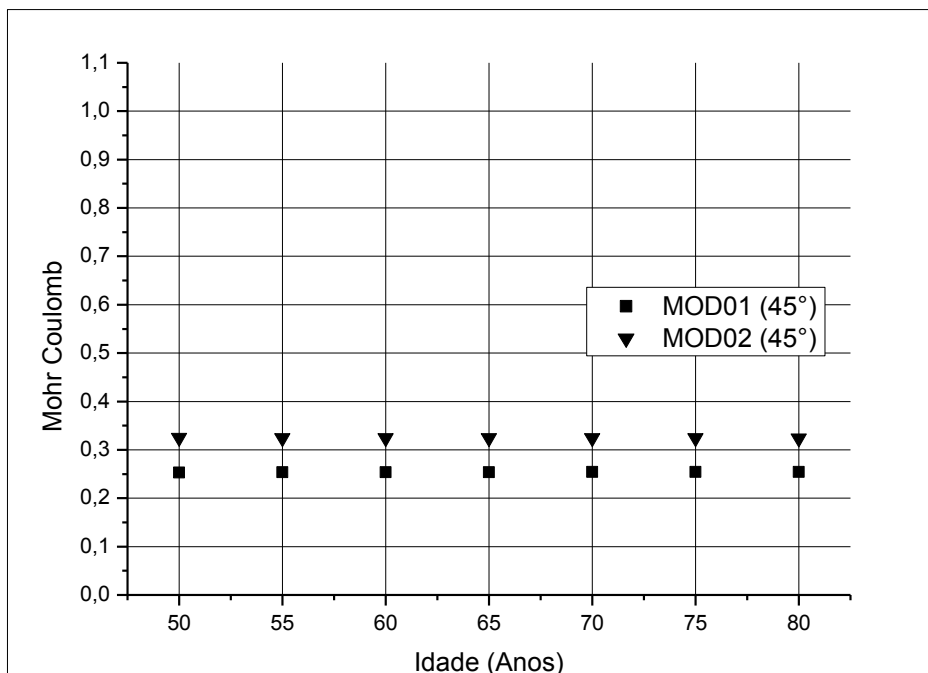


Figura 5.13 - Estudo de resultados para o critério de falha de Mohr Coulomb para implantes de terceiro molar comercial (MOD01) e autoral (MOD02) de 3Y-TZP com 500 N/45°. Fonte: Próprio autor

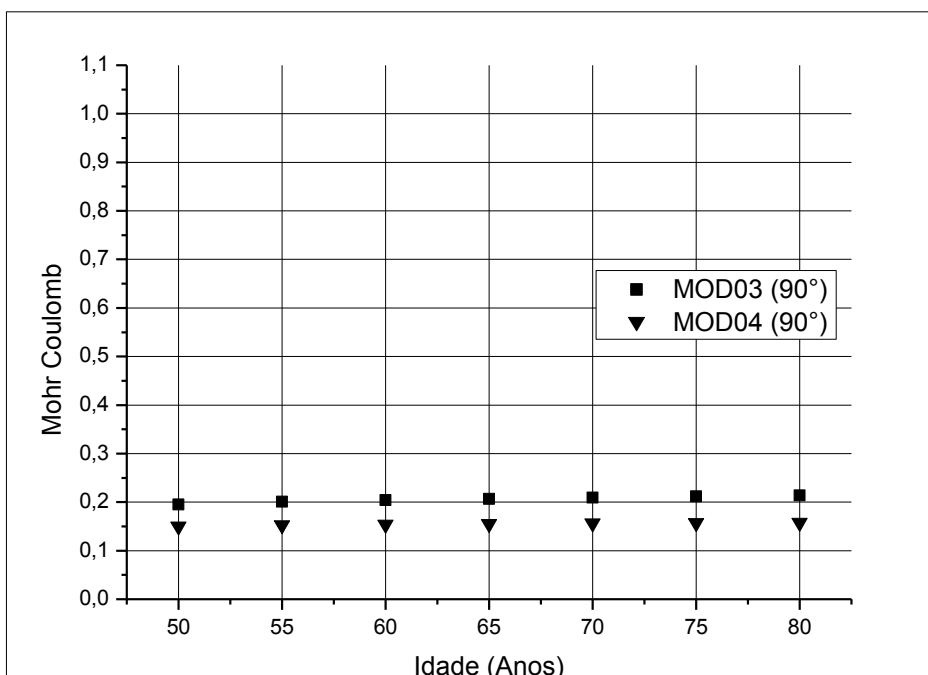


Figura 5.14 - Estudo de resultados para o critério de falha de Mohr Coulomb para implantes de terceiro molar comercial (MOD03) e autoral (MOD04) de Ce-TZP/Al₂O₃ com 500 N/90°. Fonte: Próprio autor

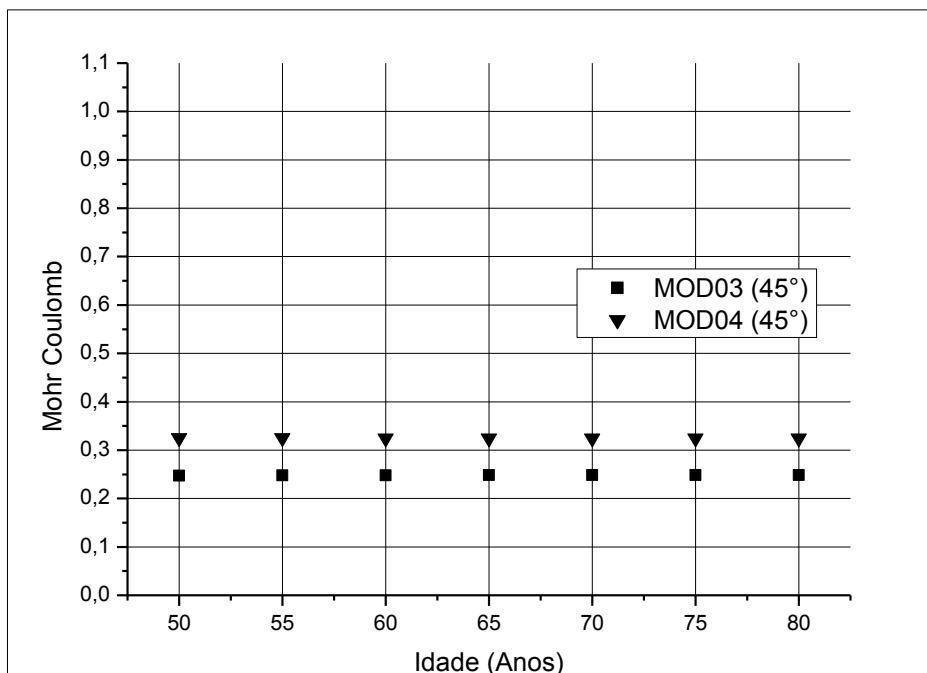


Figura 5.15 - Estudo de resultados para o critério de falha de Mohr Coulomb para implantes de terceiro molar comercial (MOD03) e autoral (MOD04) de Ce-TZP/Al₂O₃ com 500 N/45°. Fonte: Próprio autor

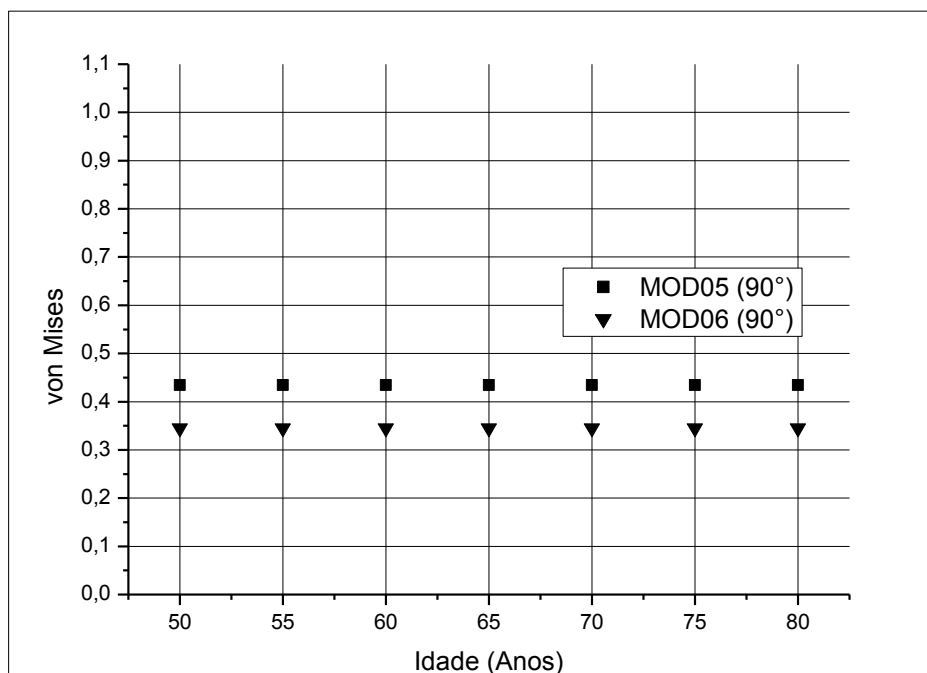


Figura 5.16 - Estudo de resultados para o critério de falha de von Mises para implantes de terceiro molar comercial (MOD05) e autoral (MOD06) de Titânio com 500 N/90°. Fonte: Próprio autor

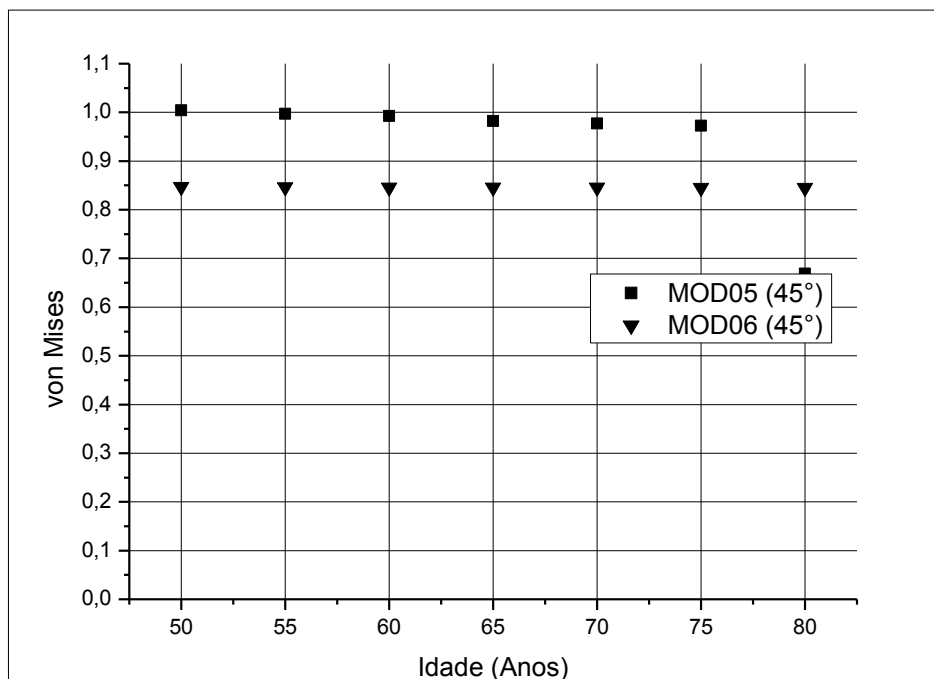


Figura 5.17 - Estudo de resultados para o critério de falha de von Mises para implantes de terceiro molar comercial (MOD05) e autoral (MOD06) de Titânio com 500 N/45°. Fonte: Próprio autor

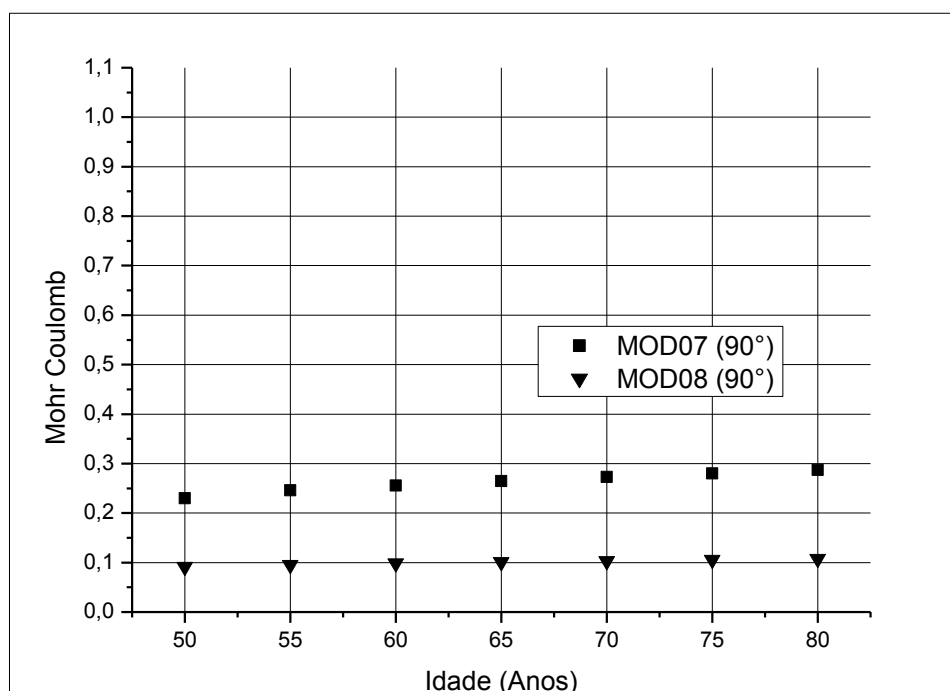


Figura 5.18 - Estudo de resultados para o critério de falha de Mohr Coulomb para implantes de incisivo central comercial (MOD07) e autoral (MOD08) de 3Y-TZP com 500 N/90°. Fonte: Próprio autor

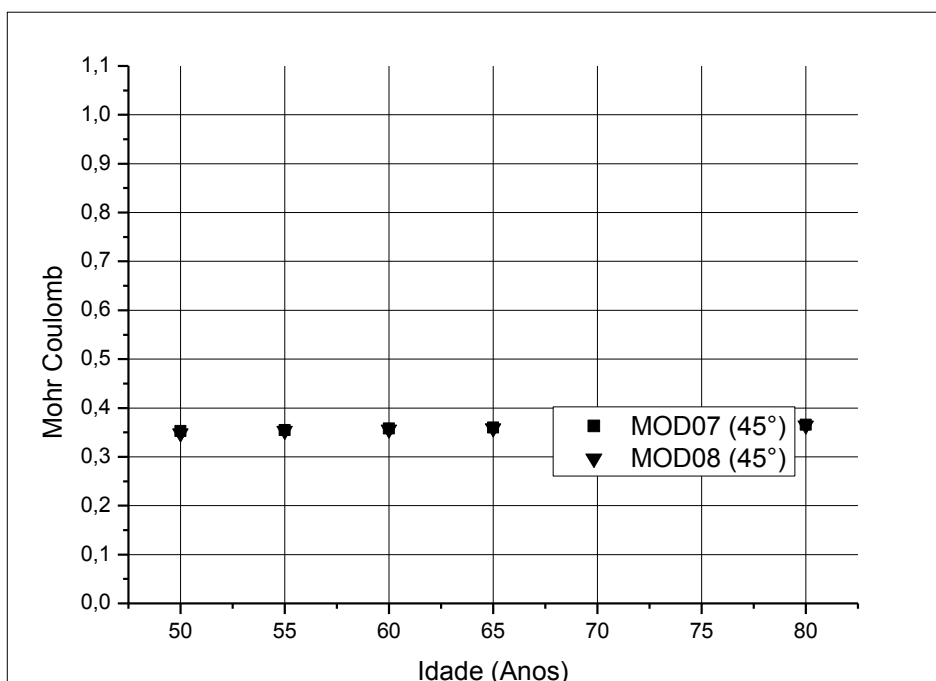


Figura 5.19 - Estudo de resultados para o critério de falha de Mohr Coulomb para implantes de incisivo central comercial (MOD07) e autoral (MOD08) de 3Y-TZP com 500 N/45°. Fonte: Próprio autor

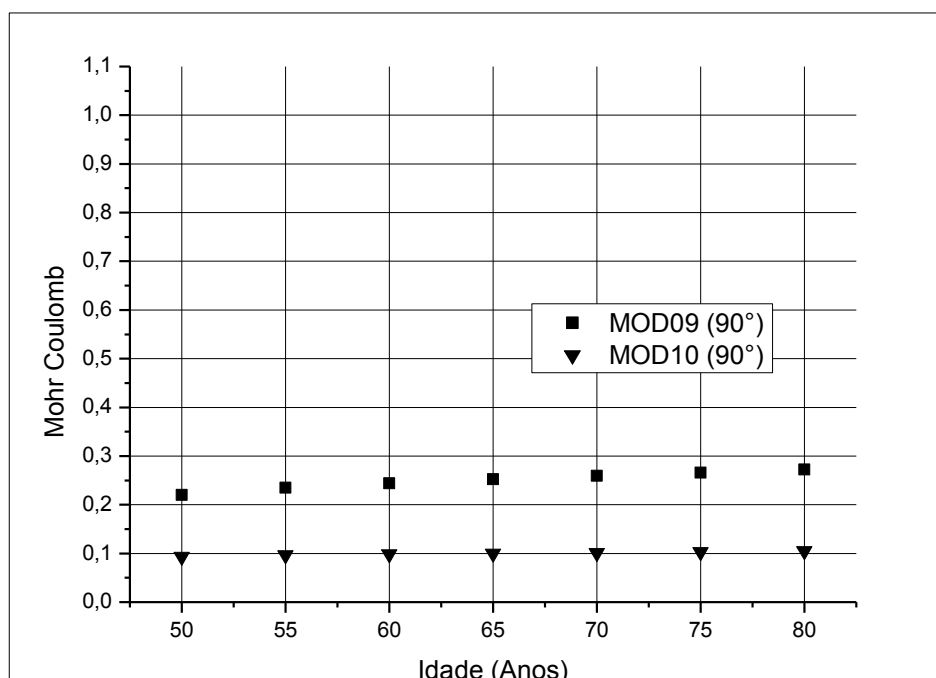


Figura 5.20 - Estudo de resultados para o critério de falha de Mohr Coulomb para implantes de incisivo central comercial (MOD09) e autoral (MOD10) de Ce-TZP/Al₂O₃ com 500 N/90°. Fonte: Próprio autor

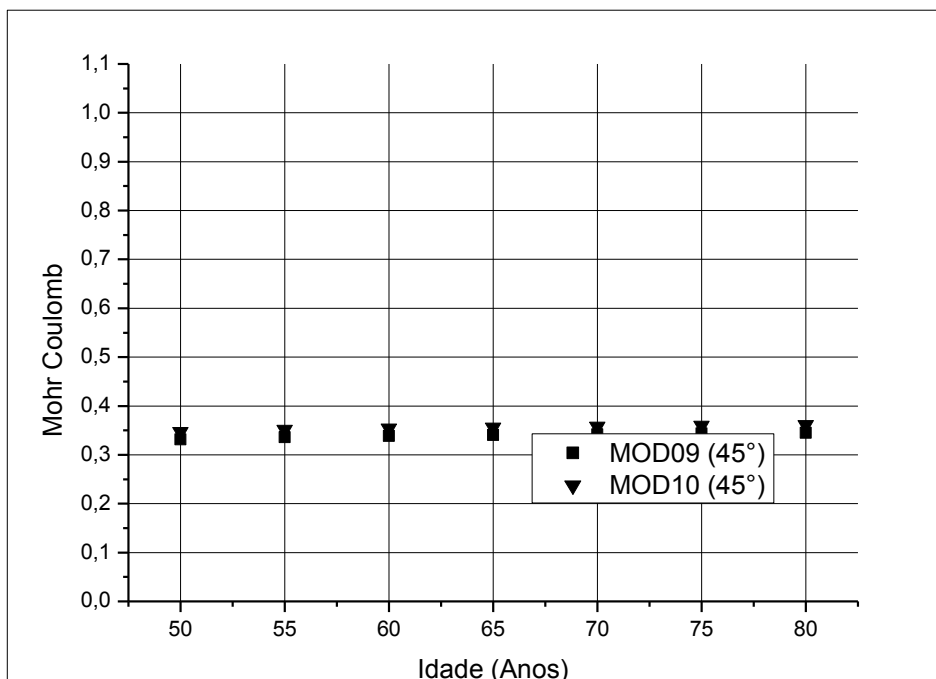


Figura 5.21 - Estudo de resultados para o critério de falha de Mohr Coulomb para implantes de incisivo central comercial (MOD09) e autoral (MOD10) de Ce-TZP/ Al_2O_3 com 500 N/45°. Fonte: Próprio autor

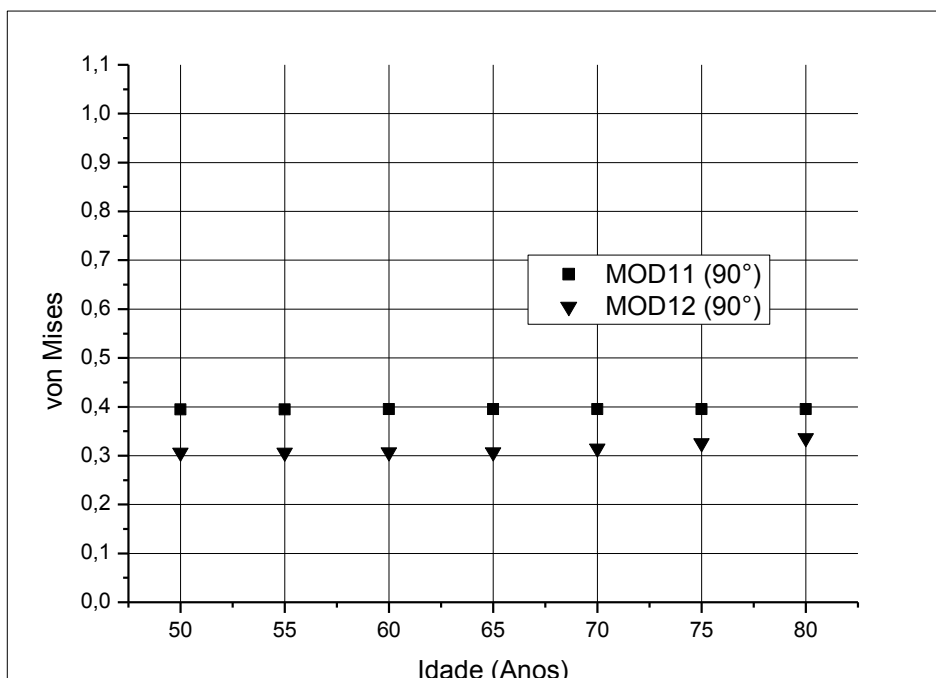


Figura 5.22 - Estudo de resultados para o critério de falha de von Mises para implantes de incisivo central comercial (MOD11) e autoral (MOD12) de Titânio com 500 N/90°. Fonte: Próprio autor

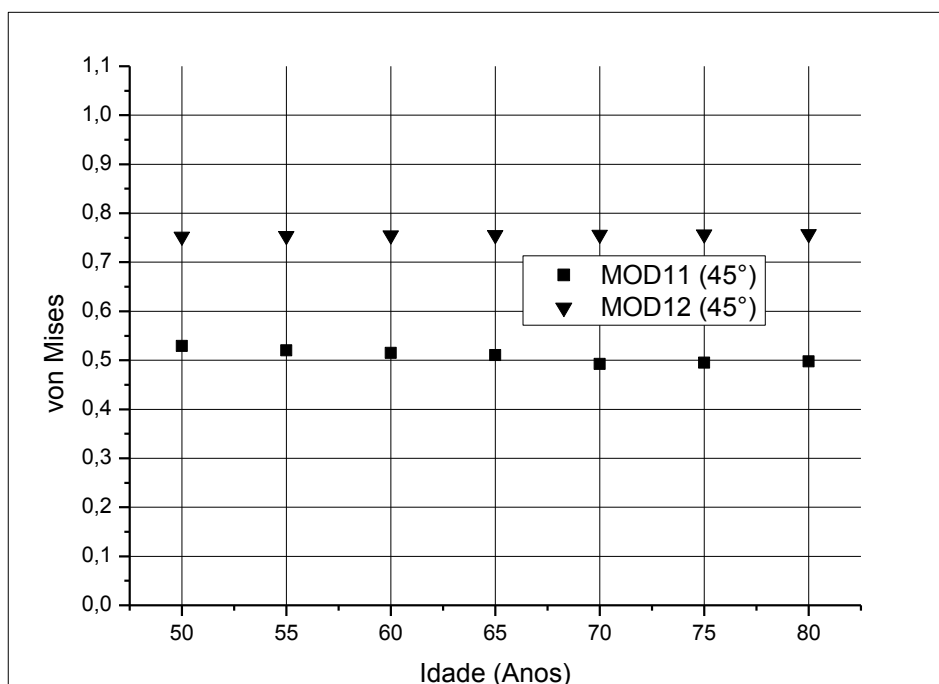


Figura 5.23 - Estudo de resultados para o critério de falha de von Mises para implantes de incisivo central comercial (MOD11) e autoral (MOD12) de Titânio com 500 N/45°. Fonte: Próprio autor

Para todos os gráficos é possível visualizar um mesmo padrão de comportamento para as curvas de implante comercial e implante autoral, apesar de intensidades de resultados diferentes, tanto para o titânio quanto para os materiais cerâmicos.

Ao aplicar a carga perpendicular ao implante (90°) em todos os casos os resultados foram mais favoráveis para o implante autoral. Independentemente do tipo de material, da região na mandíbula (terceiro molar ou incisivo central), ou da faixa de idade avaliada. Ou seja, os valores adimensionais foram inferiores de maneira geral para os modelos de implante autoral, sendo o mesmo menos propenso a falha elástica e ruptura.

Já para os casos com ângulo de carga mastigatória iguais a 45° com relação ao eixo longitudinal do implante, na maioria dos casos prevaleceram resultados mais favoráveis nos implantes comerciais. Exceção apenas nos Modelos 06 e 08 referentes ao implante de titânio para o terceiro molar e ao implante de 3Y-TZP para o incisivo central respectivamente. Vale ressaltar que apesar disto os implantes de 3Y-TZP ainda possuem valores aceitáveis para o critério de Mohr Coulomb para este caso avaliado, inferiores a 50% do valor limite de confiabilidade.

Como já esperado do Titânio utilizado como padrão ouro, mesmo avaliando o Modelo 05 (Implante comercial de titânio para terceiro molar) onde os valores ficaram mais próximos do limite do critério de von Mises, houve um excelente comparativo entre os resultados com o envelhecimento, ou seja, pouca variação entre os mesmos.

Se avaliarmos o Modelo 07 (Implante comercial de 3Y-TZP para incisivo central) com 500 N e 90°, que foi o caso onde houve a maior variação de 50 anos para 80 anos, os valores continuam aceitáveis e dentro do critério. A variação por Mohr Coulomb foi de 0,2297 para 0,2873, ou seja, apenas 20% de aumento com relação ao valor inicial e ainda muito inferior ao limite unitário do critério.

Ou seja, apesar da degradação das propriedades ocorrerem ao longo dos anos, não necessariamente há variações significativas nos resultados do critério de Mohr Coulomb para os materiais cerâmicos, tanto 3Y-TZP quanto Ce-TZP/ Al_2O_3 , avaliados deixarem de ser utilizados, aumentando ainda mais sua confiabilidade mecânica em aplicações odontológicas.

Para avaliações mais aprofundadas, nos Anexos I a V se encontram todos resultados para os critérios de falha com cargas de 50 N a 500 N variando a cada 50 N e com todas as idades também presentes nos gráficos deste tópico. Ou seja, de 50 a 80 anos variando a cada 5 anos.

Nos Anexos VI a IX se encontram as imagens com as distribuições de tensões também em função da idade para os critérios de von Mises e Mohr Coulomb.

6. CONCLUSÕES

Os materiais cerâmicos propostos nessa dissertação, e obtidos a partir de pós comerciais de alta qualidade, e processados de forma convencional e sinterizados a 1500°C-2h, indicam a viabilidade de obter corpos densos com porosidade residual, microestrutura refinada e com alta resistência a degradação hidrotérmica. As propriedades mecânicas obtidas estão de acordo com as normas exigidas para fabricação de implantes cerâmicos, e os valores de resistência a flexão média do 3Y-TZP e Ce-TZP/Al₂O₃ foram de 1192 MPa e 861 MPa respectivamente, com modulo de Weibull superior a m=10, o que confere aos materiais potencial de segurança para suas aplicações como implante dentário.

Este resultado é corroborado pelos resultados da análise de risco de falha realizada em projetos de implantes comerciais e autorais com base nos critérios de Mohr-Coulomb (3Y-TZP e Ce-TZP/Al₂O₃) e von Mises (titânio), ambos avaliando o resultado inferior a 1 unidade (adimensional) como critério de confiabilidade.

Na maioria dos modelos avaliados os resultados para o implante autoral foram mais favoráveis à não falha elástica do que os implantes de modelo comercial. E para aumentar ainda mais a variação da amostragem de modelos numéricos, foram utilizadas duas regiões opostas de carregamento da mandíbula, terceiro molar e incisivo central. Aumentando conseqüentemente a confiabilidade mecânica das cerâmicas.

A distribuição de tensões na geometria do implante é semelhante em todos os modelos, sendo que as regiões onde os máximos se localizam é no topo do implante, aonde a carga mastigatória é aplicada, ou nas roscas iniciais mais próximas a esta região.

Para todas as avaliações feitas com os materiais cerâmicos, os resultados foram inferiores a 50% do limite estabelecido pelo critério de confiabilidade, apesar da avaliação realizada considerando a degradação de propriedades ósseas. Assim, com base nesses achados numéricos-experimentais preliminares, as cerâmicas 3Y-TZP e Ce-TZP/Al₂O₃ mostram grande o potencial de uso para substituir o titânio na fabricação de implantes dentários atuais, mesmo que utilizados por um longo período de tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU LG, QUINTINO MN, ALVES, MFRP, HABIBE CH, RAMOS AS, SANTOS C., **Influence of the microstructure on the life prediction of hydrothermal degraded 3Y-TZP bioceramics**, Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(5): 10830-40.

AL-AMLEH B, LYONS K, SWAIN M. **Clinical trials in zirconia: a systematic review**. J Oral Rehabil 2010; 37: 641–652.

ALVES FILHO, A. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE**. 6.ed. São Paulo: Ed. Érica, 2013.298p.

ALVES MFRP, RIBEIRO S, SUZUKI PA; STRECKER K., SANTOS C., **Effect of Fe₂O₃ Addition and Sintering Temperature on mechanical Properties and Translucence of Zirconia Dental Ceramics with Different Y₂O₃ Content**, Materials Research. 2021; 24(2): e20200402

AMARANTE J. E. A., PEREIRA M. V. S., SOUZA G. M., ALVES M. F. R. P. , BRUNO GALVÃO SIMBA B. G, SANTOS C., 2020, **Effect of hydrothermal aging on the properties of zirconia with different levels of translucency**, Journal of the mechanical behavior of biomedical materials 109 , pp., 103847

AMARANTE JEV, PEREIRA MVS, SOUZA GM, ALVES MFRP, SIMBA BG, SANTOS C, **Roughness and its effects on flexural strength of dental yttria-stabilized zirconia ceramics**, Materials Science & Engineering A, 2019, 739: 149–157.

ASTM C1327-15, 2015, **Standard test method for Vickers indentation hardness of advanced ceramics**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1-10.

ASTM E1876-15, 2015, **Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration**, ASTM International, West Conshohocken, PA 1-17.

ASTM: C-1421-10, **Standard Test Method for Determination of Fracture Toughness of Advanced Ceramics at Ambient Temperature**, 2010, 1-33.

BASU, B. **Toughening of yttria-stabilised tetragonal zirconia ceramics**. Institute of Materials, Minerals and Mining and ASM International. International Materials Reviews, 50 (4), 2005, pp. 239–256.

BERNARDI-MARTÍN S., MOSHTAGHIOUN B.M., GARCÍA D.G., DOMÍNGUEZ-RODRÍGUEZ A., **Grain-boundary cation diffusion in ceria tetragonal zirconia determined by constant-strain-rate deformation tests**, J. Eur. Ceram. Soc., 34, 2014, pp. 4469-4472

BG SIMBA, C SANTOS, K STRECKER, AA. ALMEIDA JUNIOR, GL ADABO, **Recovery of Tetragonal Phase from Previously Transformed Y-TZP**. Materials Research, 2016, 19: 829-833.

BOCCACCINI A.R., ONDRACEK G., MAZILU O., WINDELBERG D.,J. **Mech. Behav. Mater**, 4. 1993, p119

BOCCACCINI D.N., BOCCACCINI A.R.,J. **Nondestructive Evaluation** Vol 16 N°4. 1997, p187

BORESI, A.; SCHIMIDT, R.; SIDEBOTTOM, O. M. **Advanced Mechanics of Materials**. 5.ed. New York: John Willey & Sons, Inc. 1997. p3-84.

BUČEVAC D, KOSMAČ T, KOCJAN A, **The influence of yttrium-segregation-dependent phase partitioning and residual stresses on the aging and fracture behaviour of 3Y-TZP ceramics**. Acta Biomaterialia, 2017; 62: 306–316.

BURLINGTON DB, **Steam re-sterilization causes deterioration of zirconia ceramic heads of total hip prostheses**. US Food and Drug Administration warning, May 21, 1997.

CALLISTER, WILLIAM D., JR. **Materials Science and Engineering An Introduction**. 2018. e10. Hoboken, NJ. p9.

CHEVALIER J, CALES B, DROUIN JM, **Low-temperature aging of Y-TZP ceramics**. J. Am. Ceram. Soc., 1999, 82(8): 2150– 2154.

CHEVALIER J, DEVILLE S, MÜNCH E, JULLIAN R, LAIR F, **Critical effect of cubic phase on aging in 3 mol% yttria-stabilized zirconia ceramics for hip replacement prosthesis**. Biomaterials, 2004; 25: 5539 - 5545.

CHEVALIER J, Gremillard L, **The tetragonal-monoclinic transformation in zirconia: lessons learned and future trends**. J. Am. Cer. Soc. 92, 2009, 1901–1920.

CHEVALIER J., **A new testing protocol for zirconia dental implants**. Dental materials 31, 2015, 15–25

- CHEVALIER J., **What future for zirconia as a biomaterial?** *Biomaterials* 27(4), 2006, p535–543.
- CIONCA N, HASHIM D, MOMBELLI A, **Zirconia dental implants: Where are we now, and where are we heading**, *Periodontology* 2000, Vol. 73, 2017, 241–258
- COUTINHO, I. **Sinterização e propriedades mecânicas de compósitos cerâmicos (Ce,Y)-TZP/Al₂O₃**. Dissertação de Mestrado, UFF, 2020.
- CUTLER, R. A. et al. **ChemInform Abstract: High-Toughness Ce-TZP/Al₂O₃ Ceramics with Improved Hardness and Strength**. *ChemInform*, [S. l.], v. 22, n. 16, p. no-no, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1002/chin.199116007>
- DAGUANO, J. **Biovidros e vitrocerâmicos bioativos do sistema 3CaO.P₂O₅-SiO₂-MgO para aplicações biomédicas: processamento e caracterizações estruturais, mecânicas e biológicas**. Tese de doutorado, USP/EEL, 2011.
- DEGEN T., SADKI M., BRON E., KÖNIG U., NÉNERT G., **The high score suite**, *Powder Diffr.* 2014, 29 S2, pp. S13.
- DEVILLE S, GREMILLARD L, CHEVALIER J, FANTOZZI G, **A critical comparison of methods for the determination of the aging sensitivity in biomedical grade yttria-stabilized zirconia**. *J. Biomed. Mater. Research Part B: Applied Biomaterials*, 205; 72B: 239-245.
- DOWLING, N. E. **“Mechanical behavior of materials”**, Prentice-hall, New Jersey, 1993, Chapter 9: Fatigue of materials: introduction and stress approach.
- EBEID K, WILLE S, HAMDY A, SALAH T, EL-ETREBY A, KERN M, **Effect of changes in sintering parameters on monolithic translucent zirconia**, *Dental Materials*, 2014; 30 (12): e419–e424.
- EICHLER J, RÖDEL J, EISELE U, HOFFMAN M, **Effect of grain size on mechanical properties of submicrometer 3Y-TZP: fracture strength and hydrothermal degradation**, *J. Am. Ceram. Soc.* 2007; 90: 2830–2836.
- EVANS AG, BURLINGAME N, DRORY M, KRIVEN WM, **Martensitic transformations in zirconia particles - particle size effects and toughening**, *Acta Metallurgic*, 1981; 29: 447 - 456

- GARVIE RC, NICHOLSON PS. **Phase analysis in zirconia systems**. J. Am. Ceram. Soc., 1972; 55(6): 303 - 305.
- GUAZZATO, M. ALBAKRY M., RINGER S. P., SWAIN M. V., 2004, **Strength, fracture toughness and microstructure of a selection of all-ceramic materials**. Part II. Zirconia-based dental ceramics, Dental Materials, 20 (5) pp.449-456.
- GUO T., K. GULATI, H. ARORA, P. HAN, B. FOURNIER, S. IVANOVSKI, **Orchestrating Soft Tissue Integration at the Transmucosal Region of Titanium Implants**, Acta Biomater 124 (2021) 33–49.
- GUO X, SCHOBER T, **Water Incorporation in Tetragonal Zirconia**. J. Am. Ceram. Soc., 2004; 87(4): 746–748.
- HANNINK RHJ, KELLY PM, MUDDLE BC, **Transformation toughening in zirconia containing ceramics**. J. Am. Ceram. Soc. 83 (2000) 461–487.
- HELLENBRANDT, M., 2004, **The inorganic crystal structure database (ICSD) —present and future**. Crystallography Reviews 10 (1), pp.17-22.
- HG SCOTT, **Phase relationships in the zirconia-yttria system**. Journal of Materials Science, 1975, 10(9): 1527–1535.
- HOU B, KIM S, KIM T, KIM J, HONG S, BAHN CB, KIM JH, **The Hydration Structure at Yttria-Stabilized Cubic Zirconia (110)-Water Interface with Sub-Ångström Resolution**. Scientific Reports, 2016; 6(1): 1-7.
- ICDD - **Powder diffraction file, International Centre for Diffraction Data**, Ed. by S. Kabekkodu (ed by) 12 Campus Boulevard, Newton Square, Pennsylvania , 2016, 19073-3272.
- International Organization for Standardization, ISO 10993-1:2018, **Biological evaluation of medical devices - Part 1: Evaluation and testing within a risk management process.**, 5 ed, 41p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, **ISO 13356-15, Implants for surgery -- Ceramic materials based on yttria-stabilized tetragonal zirconia (Y-TZP)**, ISO 13356, 2015: 13p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, **ISO 6872-15**, Dentistry - Ceramic materials, ISO 6872, 2015-06: 28p

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, **ISO 6872**, “Dentistry: ceramic materials”, Int. Stand. Org. (2015).

JANNER S.F., M. GAHLERT, D.D. BOSSHARDT, S. ROEHLING, S. MILZ, F. HIGGINBOTTOM, D. BUSER, D.L. COCHRAN, **Bone response to functionally loaded, two-piece zirconia implants: a preclinical histometric study**, Clin. Oral Implants Res. 29 (3) (2018) 277–289.

JIANG L, LIAO Y, WAN Q, LI W, **Effects of sintering temperature and particle size on the translucency of zirconium dioxide dental ceramic**. J. Mat. Science: Mat. Medicine, 2011; 22 (11): 2429–2435.

JONES. D.W.; “**Desenvolvimento da Cerâmica Odontológica – Uma Perspectiva Histórica**”, Clin Odontol Am Norte – Simpósio sobre Cerâmicas, pp. 1-26, 1988.

KELLY PM, ROSE LRF, **The martensitic transformation in ceramics - Its role in transformation toughening**. Progress in Materials Science, 2002; 47(5): 463–557.

KELLY, J.R., NISHIMURA, I., CAMPBELL, S.D., “**Ceramics in Dentistry: Historical Roots and Current Prospectives**”, J Prosthet Dent, v.75, n.1, pp. 18-32, 1996.

KELLY, R.; DENRY, I. **Stabilized Zirconia As A Structural Ceramic: An Overview**. Dental Materials, V. 24, 2008. p. 289-298

KERN F., 2014, **A comparison of microstructure and mechanical properties of 12Ce-TZP reinforced with alumina and in situ formed strontium- or lanthanum hexaaluminate precipitates**, Journal of the European Ceramic Society 34 (2014) 413–423.

KERN F., GADOW R., 2014, **In situ platelet reinforcement of alumina and zirconia matrix nanocomposites - one concept, different reinforcement mechanisms**, Advances in Science and Technology 87 pp.118-125.

KISI EH, KENNEDY SJ, HOWARD CJ, **Neutron Diffraction Observations of Ferroelastic Domain Switching and Tetragonal-to-Monoclinic Transformation in Ce-TZP**, J. Am. Ceram. Soc. 80(3) (1997) 621–628.

- KLUG HP, ALEXANDER LE, **X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials**. 2nd Ed. New York: John Wiley; (1974).
- KUNTZ, D. **Nanocrystalline-Matrix Ceramic Composites for Improved Fracture Toughness**. 2004. MRS Online Proceedings Library.
- LAMAS D.G., ROSSO A.M., ANZORENA S.M., FERNÁNDEZ A., BELLINO M.G., CABEZAS M.D., RECA N.E. W., CRAIEVICH A.F., 2006, **Crystal structure of pure ZrO₂ nanopowders**, Scripta Materialia, 55 (6), pp.553-556.
- LANGE FF, **Transformation toughening: Part 2 contribution to fracture- toughness**. J Mater Sci 17 (1982) 235–239.
- LIANG K.M., GU K.F., GU S.R., **Toughness mechanism and fracture characteristic of ZrO, in ZTA**, J. Chin. Cerum,1993, (23) 5 pp. 477.
- LIN, C. L , WANG, J. C., KUO, Y. C. **Numerical simulation on the biomechanical interactions of tooth/implant-supported system under various occlusal forces with rigid/non-rigid connections**. Journal of Biomechanics 39, 2006. p453–463.
- LIU, P. R.; ESSIG, M. E. **Panorama of dental CAD/CAM restorative systems**. Compend Contin. Educ. Dent. 2008; 29:482–488.
- LUTTEROTTI, L. SCARDI, P., **Simultaneous structure and size-strain refinement by the Rietveld method Journal of Applied Crystallography**, 1990, 23, pp. 246-252.
- MA Y, KISI EH, KENNEDY SJ, **Neutron Diffraction Study of Ferroelasticity in a 3% mol Y₂O₃–ZrO₂**, J Am. Ceram. Soc., 84(2) (2001) 399–405.
- MANICONE PF, ROSSI IOMMETTI P, RAFFAELLI L. **An overview of zirconia ceramics: basic properties and clinical applications**. J Dent 2007; 35(11): 819–26.
- MATSON, 1996 MATSON, M.R. **Estudo das tensões de von Mises em dentes íntegros e dentes que receberam facetas laminadas de porcelana**. São Paulo, 1996, 66p. Tese (Mestrado) – Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo.
- MATSUI K, HORIKOSHI H, OHMACHI N, OHGAI M, YOSHIDA H, IKUHARA Y, **Cubic-Formation and Grain-Growth Mechanisms in Tetragonal Zirconia Polycrystal**. J. Am. Ceram. Soc., 2003; 86(8): 1401–1408.

- MAZILU P., ONDRACEK G., **Thermal Effects in Fracture of Multiphase Materials**, Proc. Euromech Colloquium 255, Tokyo, New York, 1989, p214-230.
- MISCH CE. **Rationale for dental implants**. In: Misch CE, ed. **Dental Implant Prosthetics**. 2nd ed. St Louis: Mosby; 2015.
- MIYAZAKI, T.; NAKAMURA, T.; MATSUMURA, H.; BAN, S.; KOBAYASHI, T. **Current status of zirconia restoration**. J. Prosthodont. Res. 2013; 57:236–61.
- NAKAMOTO M. N. S., SEKINO T., NIIHARA K., **Tough and Strong Ce-TZP/Alumina Nanocomposites Doped with Titania**, Ceramics International 24 (1998) 497-506.
- NAKAMURA K, KANNO T, MILLEDING P, ORTENGREN U. **Zirconia as a dental implant abutment material: a systematic review**. Int J Prosthodont 2010; 23: 299–309.
- NAWA M, BAMBA N, SEKINO T, NIIHARA K., **The effect of TiO₂ addition on strengthening and toughening in intragranular type of 12Ce-TZP/Al₂O₃ nanocomposite**. J Eur Ceram Soc 18, 1998, pp. 209–219.
- NAWA M, NAKAMOTO S, SEKINO T, NIIHARA K., **Tough and strong Ce-TZP/Alumina nanocomposite doped with titania**. Ceram Int . 24, 1998, pp.497–506.
- NETTO, P.T. **Estudo das tensões transmitidas à mandíbula por uma prótese totalmente implanto-suportada, variando-se o padrão oclusal, através do método de elementos finitos**. São Paulo, 1995. 105p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo.
- NIIHARA K., MORENA R., HASSELMAN D.P.H., **Indentation fracture toughness of brittle materials for palmqvist crack**. Fract Mech Ceram 5, 1998, pp. 97–105.
- NOGUTI J. **The role of fluoride on the process of titanium corrosion in oral cavity**. Biometals 2012; 25(5) : 859–62.
- NUTU E., S. AHMAD, S. PASTRAMA, **Influence of bone elastic properties on the predicted stress distribution in the dental implant vicinity**, Materials Today: Proceedings 4 (2017) 5904–5908.
- P. C. SILVA, L. P. MOREIRA, M. F. R. P. ALVES, L. Q. B. CAMPOS, B. G. SIMBA, C. DOS SANTOS, **Experimental analysis and finite element modeling of the piston-on-three balls testing of Y-TZP ceramic**, Cerâmica 66 (2020) 377.

- PANDEY A.K., BISWAS K., **In vitro cytocompatibility, ageing and wear behavior of ceria stabilized zirconia bioceramic**, Ceram. Int. 40, 2014, pp. 15889–15895.
- PELED M, ARDEKIAN L, TAGGER-GREEN N, ET AL. **Dental implants in patients with type 2 diabetes mellitus: a clinical study**. Implant Dent. 2003;12:116–122.
- PICONI, C. MACCAURO, G. **Zirconia as a ceramic biomaterial**, Biomaterials (1999). p. 20.
- PIOTROWSKI B, BAPTISTA AA, PATOOR E, BRAVETTI P, EBERHARDT A, LAHEURTE P, **Interaction of bone–dental implant with new ultra low modulus alloy using a numerical approach**, Materials Science and Engineering C , 2014, 38: 151–160.
- QUINN J.B., QUINN G.D., **A practical and systematic review of Weibull statistics for reporting strengths of dental materials**, Dental materials 26, 2010, p135–147.
- RAMESH S, SARA LEE KY, TAN CY, Review article, **A review on the hydrothermal ageing behaviour of Y-TZP ceramics**, Ceramics International , 2018, 44: 20620-20634.
- RAUCHS G, FETT T, MUNZ D, OBERACKER R., **Tetragonal-to-monoclinic phase transformation in CeO₂-stabilised zirconia under uniaxial loading**. J Eur Ceram Soc 21, 2001, pp.:2229–2241.
- RESNIK R.R., **Misch's Contemporary Implant Dentistry**, 4 ed, Elsevier, 2021, p20,258,450
- RIETVELD H. M., **A profile refinement method for nuclear and magnetic structures**, J. Appl.Cryst. (1969). 2, pp. 65-71.
- RODRIGUES, MARTINS P, **Tecnologia de Deformação Plástica Vol. I - Fundamentos teóricos**, 2a Edição, Escolar Editora, 2010, Lisboa, Portugal: 160-163.
- ROSE L.R.F., SWAIN M.V., **Transformation zone shape in ceria-partially stabilised zirconia**. Acta Metall 36, 1998, pp.955–962.
- ROY M, WHITESIDE L, KATERBERG B, STEIGER J, **Phase transformation, roughness, and microhardness of artificially aged yttria- and magnesia-stabilized zirconia femoral heads**. J. Biomed. Mater. Res. 2007, 83: 1096–1102.
- SADOWSKY. **Has zirconia made a material difference in implant prosthodontics**. Dental Materials. 2020: e36

SANON C., CHEVALIER J., DOUILLARD T., CATTANI-LORENTE M., SCHERRER S. S., GREMILLARD L., **A new testing protocol for zirconia dental implants**, Dental Materials, 31(1), 2015, pp.15-25.

SCHMAUDER S, SCHUBERT H, **Significance of Internal Stresses for the Martensitic Transformation in Yttria-Stabilized Tetragonal Zirconia Polycrystals During Degradation**, J. Am. Ceram. Soc. 1986; 69(7): 534 - 540.

SHIGLEY, JOSEPH E. "**Projeto de Engenharia mecânica**", 7ed, Bookman 2005, Capítulo 6: Falhas resultantes de carregamento estático.

SIVARAMAN K., CHOPRA A., NARAYAN A. I., BALAKRISHNAN D., **Review: Is zirconia a viable alternative to titanium for oral implant? A critical review**, Journal of Prosthodontic Research, 62 (2), 2018, pp.121-133.

SOUZA RC, DUARTE RN, ALVES MFRP, DAGUANO JKMB, SANTOS C, STRECKER K, **Cyclic fatigue behaviour of hydrothermally aged 3Y-TZP ceramics in 4-point bending tests**, Processing and Application of Ceramics 2021, 15(2): 184–194.

STEVENS R, **An introduction to zirconia: Zirconia and zirconia ceramics**. 2nd Ed. Twickenham: Magnesium elektronik, 1986, (Magnesium Elektron Publications, n113).

STRAUMANN 2019. **Basic information on the surgical and prosthetic procedures**. Disponível em: < <https://www.slideshare.net/JulianaBlenda/materiais-para-implantes-dentrios> >. Acesso em 15 de dez de 2021

STRAUMANN 2021, **Catalogo de produtos Straumann**. Disponível em: <https://www.straumann.com/content/dam/mediacenter/straumann/en/documents/catalog/product-catalog/452.200-en_interactive.pdf>. Acesso em 23 de fev de 2021.

SWAB J., 1991, **Low temperature degradation of Y-TZP materials**. J Mater Sci 26, pp.6706–6714.

TAGLIARENI JM, CLARKSON E. **Basic concepts and techniques of dental implants**. Dent Clin North Am. 2015; p255–264. <https://doi.org/10.1016/J.CDEN.2014.10.005>.

TAYA M., HAYASHI S., KOBAYASHI A.S., YOON H.S., **Toughening of a particulate-reinforced ceramic-matrix composite by thermal residual stress**. J Am Ceram Soc, 73 (5), 1990 pp. 1382.

TORAYA H, YOSHIMURA M, SOMIYA S, **Calibration curve for quantitative analysis of the monoclinic-tetragonal ZrO₂ system by X-ray diffraction.** J. Am. Ceram. Soc. 1984; 67(6): c119 - c121.

TSAI J.-FONG , CHON U., RAMACHANDRAN N. , SHETTY D. K., **Transformation Plasticity and Toughening in CeO₂-Partially-Stabilized Zirconia–Alumina (Ce-TZP/Al₂O₃) Composites Doped with MnO**, J Am Cceram Soc, 75(5), 1992, pp 1219-1238 .

TSAI, J.-F. et al. **Transformation Plasticity and Toughening in CeO₂-Partially-Stabilized Zirconia-Alumina (Ce-TZP/Al₂O₃) Composites Doped with MnO.** Journal of the American Ceramic Society, [S. l.], v. 75, n. 5, p. 1229–1238, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1992.tb05562.x>

TSUKUMA K, SHIMADA M., **Strength, fracture toughness and Vickers hardness of CeO₂– stabilized tetragonal ZrO₂ polycrystals (Ce-TZP).** J Mater Sci. ;20, 1985, pp.1178–1184.

TSUKUMA K., **Mechanical properties and thermal stability of CeO₂ containing zirconia polycrystals.** Am Cram Soc Bull 65, 1986, pp.1386–1389.

TSUKUMA, K.; SHIMADA, M. **Strength, fracture toughness and Vickers hardness of CeO₂-stabilized tetragonal ZrO₂ polycrystals (Ce-TZP).** Journal of Materials Science, [S. l.], v. 20, n. 4, p. 1178–1184, 1985 b. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf01026311>

ULLMAN DG. **The mechanical design process, Vol. 2.** NewYork:: McGraw-Hill; 1992

VAGKOPOULOUS, T. et al. **Zirconia in Dentistry: Part 1. Discovering the Nature of a Upcoming Bioceramic.** The European Journal of Esthetic Dentistry, v. 4, n. 2, 2009. Disponível em: < <http://befaith.com.tw/UserFiles/File/JOURNAL/2010%2004/52.pdf> >.

VAREZ, E. GARCIA-GONZALEZ, J. JOLLY, J. SANZ, **Structural characterization of Ce_{1-x}Zr_xO₂ (0≤x≤1) samples prepared at 1650°C by solid state reaction: A combined TEM and XRD study,** Journal of the European Ceramic Society, 27, 13–15, 2007, pp. 3677-3682.

WEI C, GREMILLARD L, **Towards the prediction of hydrothermal ageing of 3Y-TZP bioceramics from processing parameters.** Acta Materialia, 2018, 144: 245–256.

YANG., G., LI J-C., G-C WANG, M. YASHIMA, S-L. MIN, T-C. CHEN, **Investigation on Strengthening and Toughening Mechanisms of Ce-TZP/Al₂O₃ Nanocomposites**, **Metallurgical and Materials Transactions A**, 37A, 2006, pp.1969-1975.

YANGA J., H. XIANG, **A three-dimensional finite element study on the biomechanical behavior of an FGBM dental implant in surrounding bone**, *Journal of Biomechanics* 40 (2007) 2377–2385

YASHIMA M. , HIROSE T., KATANO S., SUZUKI Y., KAKIHANA M., YOSHIMURA M., **Structural changes of ZrO₂-CeO₂ solid solutions around the monoclinic-tetragonal phase boundary**. 2015. *Phys. Rev. B* 51, 8018.

YOSHIMURA H.N., MOLISANI A.L., SIQUEIRA G.R., CAMARGO A.C., NARITA N.E., CESAR P.F., GOLDENSTEIN H., **Efeito da porosidade nas propriedades mecânicas de uma alumina de elevada pureza**. *Cerâmica* 51. 2005; p240

YOSHIMURA M, NOMA T, KAWABATA K, SOMIYA S, **Role of H₂O on the degradation process of Y-TZP**. *J. Mat. Sci. Lett.*, 1987; 6(4): 465 - 467.

YOUNG WC, BUDYNAS RG, **Roark's Formulas for Stress and Strain**, 7th Edition, McGraw-Hill, 2002, New York, USA: p37.

Yu C.S., Shetty D.K.. 1989, **Transformation zone shape, size, and crack growth resistance (R-curve) behaviour of ceria-partially-stabilised zirconia polycrystals** .*J Am Ceram Soc* *Ceram Soc* 72 pp. 921–928.

ZHANG F, VANMEENSEL K, INOKOSHI M, BATUK M, HADERMANN J, VAN MEERBEEK B, VLEUGELS J, **3Y-TZP ceramics with improved hydrothermal degradation resistance and fracture toughness**. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2014; 34(10): 2453 - 2463.

ANEXO I: Resultados para o Critério de Tensão Max Principal em MPa

Até 50 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	17,6825	35,6550	53,0475	70,7300	88,4125	106,0950	123,7775	141,4601	159,1426	176,8251
MOD02	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	14,8411	29,6822	44,5233	59,3645	74,2056	89,0467	103,8878	118,7289	133,5701	148,4112
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	17,8307	35,6615	53,4922	71,3230	89,1538	106,9845	124,8153	142,6460	160,4768	178,3074
MOD04	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	15,2013	30,4025	45,6038	60,8051	76,0064	91,2076	106,4089	121,6102	136,8114	152,0127
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	15,3716	30,7432	46,1147	61,4863	76,8579	92,2295	107,6010	122,9726	138,3442	153,7158
MOD06	Autorial	Titânio de alta pureza	17,4550	34,9099	52,3649	69,8198	87,2748	104,7297	122,1847	139,6396	157,0946	174,5495
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	22,7944	45,5889	68,3833	91,1778	113,9723	136,7667	159,5612	182,3556	205,1501	227,9444
MOD08	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	14,9997	29,9995	44,9992	59,9990	74,9988	89,9985	104,9983	119,9980	134,9978	149,9974
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	23,3649	46,7299	70,0948	93,4597	116,8247	140,1896	163,5545	186,9194	210,2844	233,6494
MOD10	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	15,4089	30,8178	46,2267	61,6356	77,0445	92,4534	107,8623	123,2712	138,6801	154,0891
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	17,1124	34,2249	51,3373	68,4498	85,5623	102,6747	119,7872	136,8996	154,0121	171,1245
MOD12	Autorial	Titânio de alta pureza	9,2681	18,5363	27,8044	37,0726	46,3408	55,6089	64,8771	74,1452	83,4134	92,6815

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	26,1196	52,2392	78,3588	104,4783	130,5979	156,7175	182,8371	208,9567	235,0763	261,1959
MOD02	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	38,2466	76,4931	114,7396	152,9861	191,2326	229,4791	267,7256	305,9721	344,2186	382,4651
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	25,5404	51,0807	76,6211	102,1614	127,7018	153,2421	178,7824	204,3228	229,8631	255,4035
MOD04	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	38,0273	76,0546	114,0820	152,1093	190,1367	228,1640	266,1913	304,2187	342,2460	380,2732
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	26,3605	52,7211	79,0817	105,4423	131,8029	158,1635	184,5241	210,8847	237,2453	263,6053
MOD06	Autorial	Titânio de alta pureza	52,3028	104,6055	156,9082	209,2109	261,5136	313,8163	366,1190	418,4217	470,7244	523,0277
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	33,0393	66,0785	99,1178	132,1570	165,1963	198,2355	231,2747	264,3140	297,3532	330,3925
MOD08	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	36,8600	73,7200	110,5800	147,4399	184,2999	221,1599	258,0198	294,8798	331,7398	368,5999
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	31,9377	63,8754	95,8132	127,7509	159,6887	191,6264	223,5641	255,5019	287,4396	319,3772
MOD10	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	42,8224	85,6449	128,4673	171,2897	214,1122	256,9346	299,7570	342,5794	385,4019	428,2243
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	25,2949	50,5898	75,8847	101,1796	126,4745	151,7694	177,0643	202,3592	227,6541	252,9490
MOD12	Autorial	Titânio de alta pureza	35,0124	70,0248	105,0373	140,0497	175,0622	210,0746	245,0870	280,0995	315,1119	350,1243

55 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	18,2369	36,4739	54,7108	72,9478	91,1847	109,4217	127,6586	145,8956	164,1325	182,3695
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	15,1894	30,3788	45,5681	60,7575	75,9469	91,1362	106,3256	121,5149	136,7043	151,8938
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	18,3529	36,7059	55,0588	73,4118	91,7648	110,1177	128,4707	146,8236	165,1766	183,5294
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	15,5188	31,0376	46,5564	62,0753	77,5941	93,1129	108,6318	124,1506	139,6694	155,1882
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	16,0618	32,1236	48,1855	64,2473	80,3092	96,3710	112,4329	128,4947	144,5566	160,6182
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	17,2605	34,5210	51,7815	69,0420	86,3025	103,5630	120,8235	138,0840	155,3445	172,6050
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	24,4202	48,8403	73,2605	97,6806	122,1008	146,5209	170,9410	195,3612	219,7813	244,2015
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	16,0580	32,1160	48,1740	64,2319	80,2899	96,3479	112,4058	128,4638	144,5218	160,5798
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	24,9260	49,8519	74,7779	99,7039	124,6299	149,5558	174,4818	199,4078	224,3337	249,2597
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	16,4019	32,8038	49,2057	65,6076	82,0095	98,4114	114,8133	131,2152	147,6171	164,0191
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	18,6888	37,3776	56,0665	74,7553	93,4442	112,1330	130,8218	149,5107	168,1995	186,8882
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	9,8705	19,7409	29,6114	39,4819	49,3524	59,2228	69,0933	78,9638	88,8342	98,7046

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	26,1544	52,3088	78,4632	104,6175	130,7719	156,9263	183,0806	209,2350	235,3894	261,5439
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	38,2210	76,4419	114,6629	152,8838	191,1048	229,3258	267,5467	305,7677	343,9886	382,2096
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	25,5727	51,1455	76,7182	102,2909	127,8637	153,4364	179,0091	204,5818	230,1546	255,7273
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	38,0049	76,0098	114,0147	152,0196	190,0245	228,0294	266,0343	304,0392	342,0441	380,0490
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	26,4231	52,8463	79,2694	105,6925	132,1157	158,5388	184,9619	211,3850	237,8082	264,2313
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	50,6192	101,2383	151,8575	202,4766	253,0958	303,7149	354,3340	404,9532	455,5723	506,1915
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	33,4992	66,9983	100,4975	133,9966	167,4958	200,9949	234,4940	267,9932	301,4923	334,9916
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	42,3362	84,6723	127,0085	169,3447	211,6809	254,0170	296,3532	338,6894	381,0255	423,3616
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	32,3395	64,6790	97,0185	129,3580	161,6975	194,0370	226,3765	258,7160	291,0555	323,3949
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	43,1368	86,2735	129,4103	172,5471	215,6839	258,8206	301,9574	345,0942	388,2309	431,3676
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	32,7259	65,4518	98,1778	130,9037	163,6297	196,3556	229,0815	261,8075	294,5334	327,2592
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	35,6351	71,2702	106,9052	142,5403	178,1754	213,8104	249,4455	285,0805	320,7156	356,3508

60 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	18,5658	37,1317	55,6975	74,2633	92,8292	111,3950	129,9608	148,5266	167,0925	185,6582
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	15,3919	30,7838	46,1757	61,5676	76,9595	92,3514	107,7433	123,1352	138,5271	153,9191
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	18,6620	37,3239	55,9859	74,6478	93,3098	111,9717	130,6336	149,2956	167,9575	186,6195
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	15,7025	31,4051	47,1076	62,8101	78,5127	94,2152	109,9177	125,6202	141,3228	157,0254
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	16,4813	32,9626	49,4440	65,9253	82,4067	98,8880	115,3693	131,8507	148,3320	164,8132
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	17,1186	34,2373	51,3559	68,4745	85,5932	102,7118	119,8304	136,9490	154,0677	171,1864
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	25,4390	50,8781	76,3171	101,7562	127,1953	152,6343	178,0734	203,5124	228,9515	254,3904
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	16,7217	33,4435	50,1652	66,8870	83,6088	100,3305	117,0523	133,7740	150,4958	167,2174
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	25,8986	51,7971	77,6957	103,5942	129,4928	155,3913	181,2898	207,1884	233,0869	258,9856
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	17,0198	34,0396	51,0594	68,0792	85,0990	102,1188	119,1386	136,1584	153,1782	170,1980
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	19,7051	39,4101	59,1152	78,8202	98,5253	118,2303	137,9353	157,6404	177,3454	197,0506
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	10,2421	20,4841	30,7262	40,9682	51,2103	61,4523	71,6943	81,9364	92,1784	102,4205

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	26,1729	52,3458	78,5187	104,6916	130,8645	157,0374	183,2103	209,3832	235,5561	261,7290
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	38,2061	76,4123	114,6184	152,8245	191,0307	229,2368	267,4429	305,6490	343,8552	382,0613
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	25,5900	51,1800	76,7699	102,3599	127,9499	153,5398	179,1298	204,7197	230,3097	255,8998
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	37,9920	75,9839	113,9759	151,9679	189,9599	227,9518	265,9438	303,9358	341,9277	379,9197
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	26,4586	52,9171	79,3757	105,8342	132,2928	158,7513	185,2098	211,6684	238,1269	264,5855
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	49,5282	99,0564	148,5846	198,1128	247,6410	297,1692	346,6974	396,2256	445,7538	495,2821
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	33,7692	67,5385	101,3077	135,0770	168,8463	202,6155	236,3848	270,1540	303,9233	337,6925
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	37,6024	75,2049	112,8073	150,4098	188,0123	225,6147	263,2172	300,8196	338,4221	376,0244
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	32,5739	65,1479	97,7218	130,2957	162,8697	195,4436	228,0175	260,5914	293,1654	325,7393
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	43,3136	86,6273	129,9409	173,2545	216,5682	259,8818	303,1954	346,5090	389,8227	433,1363
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	33,0999	66,1999	99,2998	132,3998	165,4998	198,5997	231,6997	264,7996	297,8996	330,9995
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	36,0111	72,0222	108,0333	144,0444	180,0555	216,0666	252,0777	288,0888	324,0999	360,1110

65 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	18,8404	37,6808	56,5212	75,3616	94,2020	113,0424	131,8828	150,7232	169,5636	188,4039
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	15,5587	31,1174	46,6761	62,2348	77,7935	93,3522	108,9109	124,4696	140,0283	155,5871
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	18,9196	37,8392	56,7588	75,6784	94,5980	113,5176	132,4372	151,3568	170,2764	189,1959
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	15,8533	31,7066	47,5599	63,4132	79,2665	95,1198	110,9731	126,8264	142,6797	158,5330
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	16,8375	33,6749	50,5124	67,3499	84,1874	101,0248	117,8623	134,6998	151,5372	168,3746
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	16,9828	33,9657	50,9485	67,9313	84,9142	101,8970	118,8798	135,8626	152,8455	169,8283
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	26,3235	52,6470	78,9704	105,2939	131,6174	157,9408	184,2643	210,5877	236,9112	263,2348
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	17,2983	34,5965	51,8948	69,1931	86,4914	103,7896	121,0879	138,3862	155,6844	172,9827
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	26,7393	53,4785	80,2178	106,9541	133,6934	160,4317	187,1701	213,9085	240,6468	267,3926
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	17,5534	35,1069	52,6603	70,2137	87,7672	105,3206	122,8740	140,4274	157,9809	175,5344
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	20,6053	41,2106	61,8159	82,4213	103,0266	123,6319	144,2373	164,8426	185,4479	206,0531
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	10,5608	21,1216	31,6824	42,2431	52,8039	63,3647	73,9254	84,4862	95,0470	105,6079

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	26,1871	52,3741	78,5612	104,7482	130,9353	157,1223	183,3093	209,4964	235,6834	261,8706
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	38,1940	76,3879	114,5819	152,7759	190,9699	229,1638	267,3578	305,5518	343,7457	381,9397
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	25,6032	51,2064	76,8097	102,4129	128,0162	153,6194	179,2226	204,8259	230,4291	256,0322
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	37,9814	75,9628	113,9442	151,9256	189,9070	227,8884	265,8698	303,8512	341,8326	379,8141
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	26,4870	52,9740	79,4610	105,9480	132,4350	158,9220	185,4090	211,8960	238,3830	264,8700
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	38,3175	76,6350	114,9525	153,2701	191,5876	229,9051	268,2227	306,5402	344,8577	383,1751
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	33,9929	67,9859	101,9788	135,9718	169,9648	203,9577	237,9507	271,9436	305,9366	339,9295
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	37,8299	75,6598	113,4898	151,3197	189,1497	226,9796	264,8095	302,6395	340,4694	378,2992
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	32,7673	65,5345	98,3018	131,0690	163,8363	196,6035	229,3707	262,1380	294,9052	327,6726
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	43,4554	86,9108	130,3662	173,8216	217,2770	260,7324	304,1878	347,6432	391,0986	434,5540
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	33,4165	66,8330	100,2495	133,6660	167,0825	200,4990	233,9155	267,3320	300,7485	334,1651
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	36,3289	72,6577	108,9866	145,3155	181,6444	217,9732	254,3021	290,6310	326,9598	368,2887

70 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	19,0830	38,1659	57,2489	76,3318	95,4148	114,4977	133,5806	152,6636	171,7465	190,8296
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	15,7043	31,4086	47,1129	62,8172	78,5215	94,2258	109,9301	125,6344	141,3387	157,0430
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	19,3103	38,6206	57,9309	77,2412	96,5515	115,8618	135,1721	154,4824	173,7927	193,1029
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	15,9845	31,9690	47,9534	63,9379	79,9224	95,9068	111,8913	127,8757	143,8602	159,8448
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	17,1567	34,3134	51,4702	68,6269	85,7837	102,9404	120,0971	137,2539	154,4106	171,5672
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	16,8480	33,6960	50,5440	67,3920	84,2400	101,0880	117,9360	134,7840	151,6320	168,4800
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	27,1323	54,2647	81,3970	108,5294	135,6618	162,7941	189,9265	217,0588	244,1912	271,3235
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	17,8259	35,6517	53,4776	71,3034	89,1293	106,9551	124,7809	142,6068	160,4326	178,2586
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	27,5053	55,0106	82,5259	110,0212	137,5315	165,0378	192,5441	220,0504	247,5567	275,0530
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	18,0393	36,0786	54,1179	72,1572	90,1965	108,2358	126,2751	144,3144	162,3537	180,3931
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	21,4437	42,8875	64,3312	85,7749	107,2187	128,6624	150,1061	171,5498	192,9936	214,4373
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	10,8491	21,6981	32,5472	43,3963	54,2454	65,0944	75,9435	86,7926	97,6416	108,4907

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	26,1985	52,3971	78,5956	104,7942	130,9928	157,1913	183,3899	209,5884	235,7870	261,9854
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	38,1834	76,3668	114,5502	152,7336	190,9170	229,1004	267,2838	305,4672	343,6506	381,8340
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	25,6140	51,2280	76,8420	102,4560	128,0700	153,6840	179,2980	204,9120	230,5260	256,1400
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	37,9723	75,9445	113,9168	151,8891	189,8614	227,8336	265,8059	303,7782	341,7504	379,7226
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	26,5112	53,0223	79,5335	106,0447	132,5559	159,0670	185,5782	212,0894	238,6005	265,1117
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	38,3017	76,6035	114,9052	153,2069	191,5087	229,8104	268,1121	306,4138	344,7156	383,0173
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	34,1891	68,3783	102,5674	136,7565	170,9457	205,1348	239,3239	273,5130	307,7022	341,8913
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	38,0295	76,0589	114,0884	152,1179	190,1474	228,1768	266,2063	304,2358	342,2652	380,2946
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	32,9362	65,8723	98,8085	131,7446	164,6808	197,6169	230,5530	263,4892	296,4253	329,3616
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	43,5760	87,1520	130,7280	174,3039	217,8799	261,4559	305,0318	348,6078	392,1838	435,7599
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	33,6995	67,3990	101,0985	134,7980	168,4975	202,1970	235,8965	269,5960	303,2955	336,9950
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	36,6126	73,2252	109,8378	146,4504	183,0630	219,6756	256,2882	292,9008	329,5134	366,1620

75 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	19,3208	38,6416	57,9624	77,2833	96,6041	115,9249	135,2458	154,5666	173,8874	193,2081
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	15,8351	31,6701	47,5052	63,3403	79,1754	95,0104	110,8455	126,6806	142,5156	158,3507
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	19,6990	39,3979	59,0969	78,7958	98,4948	118,1937	137,8926	157,5916	177,2905	196,9896
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	16,1020	32,2040	48,3060	64,4080	80,5100	96,6120	112,7140	128,8160	144,9180	161,0200
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	17,4501	34,9003	52,3504	69,8006	87,2508	104,7009	122,1511	139,6012	157,0514	174,5014
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	16,7125	33,4249	50,1374	66,8499	83,5624	100,2748	116,9873	133,6998	150,4122	167,1246
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	27,8893	55,7786	83,6680	111,5573	139,4467	167,3360	195,2253	223,1147	251,0040	278,8932
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	18,3199	36,6397	54,9596	73,2795	91,5994	109,9192	128,2391	146,5590	164,8788	183,1987
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	28,2198	56,4395	84,6593	112,8791	141,0989	169,3186	197,5384	225,7582	253,9779	282,1977
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	18,4921	36,9843	55,4764	73,9686	92,4608	110,9529	129,4451	147,9372	166,4294	184,9215
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	22,2416	44,4833	66,7249	88,9666	111,2083	133,4499	155,6916	177,9332	200,1749	222,4164
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	14,4702	28,9404	43,4106	57,8808	72,3510	86,8212	101,2914	115,7616	130,2318	144,7020

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	26,2081	52,4162	78,6243	104,8324	131,0405	157,2486	183,4567	209,6648	235,8729	262,0809
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	38,1740	76,3479	114,5219	152,6959	190,8699	229,0438	267,2178	305,3918	343,5657	381,7397
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	25,6230	51,2460	76,8690	102,4921	128,1151	153,7381	179,3612	204,9842	230,6072	256,2302
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	37,9641	75,9283	113,8924	151,8565	189,8207	227,7848	265,7489	303,7130	341,6772	379,6413
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	26,5322	53,0645	79,5967	106,1289	132,6612	159,1934	185,7256	212,2578	238,7901	265,3223
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	38,2874	76,5748	114,8622	153,1496	191,4370	229,7244	268,0118	306,2992	344,5866	382,8740
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	34,3657	68,7313	103,0970	137,4626	171,8283	206,1939	240,5595	274,9252	309,2908	343,6566
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	38,2091	76,4182	114,6273	152,8364	191,0455	229,2546	267,4637	305,6728	343,8819	382,0909
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	33,0876	66,1753	99,2609	132,3505	165,4372	198,5246	231,6120	264,6994	297,7869	330,8763
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	43,6813	87,3626	131,0439	174,7252	218,4065	262,0878	305,7691	349,4504	393,1317	436,8130
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	33,9587	67,9173	101,8760	135,8347	169,7934	203,7520	237,7107	271,6694	305,6280	339,5867
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	36,8722	73,7444	110,6166	147,4888	184,3610	221,2332	258,1054	294,9776	331,8498	368,7220

80 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	19,7178	39,4357	59,1535	78,8714	98,5893	118,3071	138,0250	157,7428	177,4607	197,1784
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	15,9543	31,9085	47,8628	63,8171	79,7714	95,7256	111,6799	127,6342	143,5884	159,5426
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	20,0632	40,1264	60,1897	80,2529	100,3162	120,3794	140,4426	160,5059	180,5691	200,6322
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	16,2088	32,4177	48,6265	64,8353	81,0442	97,2530	113,4618	129,6706	145,8795	162,0883
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	17,7234	35,4468	53,1703	70,8937	88,6172	106,3406	124,0640	141,7875	159,5109	177,2342
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	16,5752	33,1505	49,7257	66,3009	82,8762	99,4514	116,0266	132,6018	149,1771	165,7524
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	28,6067	57,2134	85,8201	114,4268	143,0335	171,6402	200,2469	228,8536	257,4603	286,0671
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	18,7883	37,5766	56,3650	75,3533	94,1417	112,9900	131,8383	150,6867	169,5350	188,3832
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	28,8947	57,7895	86,6842	115,5789	144,4737	173,3684	202,2631	231,1578	260,0526	288,9473
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	18,9197	37,8394	56,7590	75,6787	94,5984	113,5180	132,4377	151,3573	170,2770	189,1968
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	23,0099	46,0198	69,0298	92,0397	115,0497	138,0596	161,0695	184,0795	207,0894	230,0992
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	14,9751	29,9502	44,9253	59,9003	74,8754	89,8505	104,8255	119,8006	134,7757	149,7508

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	26,2161	52,4322	78,6484	104,8645	131,0807	157,2968	183,5129	209,7291	235,9452	262,1612
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	38,1654	76,3309	114,4963	152,6617	190,8272	228,9926	267,1580	305,3234	343,4889	381,6543
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	25,6307	51,2613	76,8920	102,5226	128,1533	153,7839	179,4145	205,0452	230,6758	256,3065
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	37,9568	75,9136	113,8703	151,8271	189,7839	227,7406	265,6974	303,6541	341,6109	379,5677
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	26,5508	53,1016	79,6525	106,2033	132,7542	159,3050	185,8558	212,4067	238,9575	265,5082
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	38,2742	76,5484	114,8226	153,0967	191,3709	229,6451	267,9192	306,1934	344,4676	382,7419
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	34,5268	69,0537	103,5805	138,1074	172,6343	207,1611	241,6880	276,2148	310,7417	345,2685
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	38,3732	76,7464	115,1196	153,4928	191,8660	230,2392	268,6124	306,9856	345,3588	383,7321
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	33,2255	66,4510	99,6766	132,9021	166,1277	199,3532	232,5787	265,8043	299,0298	332,2552
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	43,0463	86,0926	129,1389	172,1852	215,2315	258,2778	301,3241	344,3704	387,4167	430,4629
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	34,1993	68,3985	102,5978	136,7971	170,9964	205,1956	239,3949	273,5942	307,7934	341,9926
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	37,1130	74,2260	111,3390	148,4520	185,5650	222,6780	259,7910	296,9040	334,0170	371,1300

ANEXO II: Resultados para o Critério de Tensão Min Principal em MPa

Até 50 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-21,1191	-42,2382	-63,3573	-84,4765	-105,5956	-126,7147	-147,8338	-168,9529	-190,0720	-211,1912
MOD02	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	-20,1673	-40,3345	-60,5018	-80,6691	-100,8363	-121,0036	-141,1709	-161,3381	-181,5054	-201,6727
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-20,9408	-41,8817	-62,8225	-83,7634	-104,7043	-125,6451	-146,5860	-167,5268	-188,4677	-209,4085
MOD04	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	-19,2546	-38,5091	-57,7637	-77,0183	-96,2729	-115,5274	-134,7820	-154,0366	-173,2911	-192,5457
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	-21,3655	-42,7310	-64,0965	-85,4620	-106,8274	-128,1929	-149,5584	-170,9239	-192,2894	-213,6549
MOD06	Autorial	Titânio de alta pureza	-21,8878	-43,7755	-65,6633	-87,5510	-109,4388	-131,3265	-153,2143	-175,1021	-196,9898	-218,8776
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-17,7783	-35,5566	-53,3350	-71,1133	-88,8917	-106,6700	-124,4483	-142,2267	-160,0050	-177,7832
MOD08	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	-15,5990	-31,1980	-46,7970	-62,3960	-77,9950	-93,5940	-109,1930	-124,7920	-140,3910	-155,9901
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-17,4876	-34,9753	-52,4629	-69,9506	-87,4383	-104,9259	-122,4136	-139,9012	-157,3889	-174,8764
MOD10	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	-15,5141	-31,0282	-46,5423	-62,0564	-77,5705	-93,0846	-108,5987	-124,1128	-139,6269	-155,1409
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	-17,9646	-35,9291	-53,8937	-71,8583	-89,8229	-107,7874	-125,7520	-143,7166	-161,6811	-179,6457
MOD12	Autorial	Titânio de alta pureza	-15,6804	-31,3608	-47,0412	-62,7216	-78,4020	-94,0824	-109,7628	-125,4432	-141,1236	-156,8039

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-73,4036	-146,8072	-220,2108	-293,6144	-367,0180	-440,4216	-513,8252	-587,2288	-660,6324	-734,0360
MOD02	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	-61,3122	-122,6243	-183,9364	-245,2485	-306,5606	-367,8727	-429,1848	-490,4969	-551,8090	-613,1216
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-69,2833	-138,5666	-207,8499	-277,1332	-346,4165	-415,6998	-484,9831	-554,2664	-623,5497	-692,8331
MOD04	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	-58,4900	-116,9800	-175,4699	-233,9599	-292,4499	-350,9398	-409,4298	-467,9197	-526,4097	-584,8998
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	-82,6270	-165,2540	-247,8810	-330,5080	-413,1350	-495,7620	-578,3890	-661,0160	-743,6430	-826,2701
MOD06	Autorial	Titânio de alta pureza	-58,6504	-117,3009	-175,9514	-234,6019	-293,2524	-351,9029	-410,5534	-469,2039	-527,8544	-586,5043
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-38,2489	-76,4977	-114,7466	-152,9955	-191,2444	-229,4932	-267,7421	-305,9910	-344,2398	-382,4887
MOD08	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	-52,3786	-104,7572	-157,1358	-209,5143	-261,8929	-314,2715	-366,6500	-419,0286	-471,4072	-523,7859
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-35,8829	-71,7659	-107,6488	-143,5318	-179,4148	-215,2977	-251,1807	-287,0636	-322,9466	-358,8294
MOD10	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	-50,0137	-100,0274	-150,0410	-200,0547	-250,0684	-300,0820	-350,0957	-400,1093	-450,1230	-500,1368
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	-40,4109	-80,8218	-121,2327	-161,6436	-202,0545	-242,4654	-282,8763	-323,2872	-363,6981	-404,1089
MOD12	Autorial	Titânio de alta pureza	-54,3834	-108,7668	-163,1502	-217,5336	-271,9170	-326,3004	-380,6838	-435,0672	-489,4506	-543,8339

55 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-21,0694	-42,1388	-63,2083	-84,2777	-105,3472	-126,4166	-147,4861	-168,5555	-189,6250	-210,6942
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-20,1764	-40,3527	-60,5291	-80,7054	-100,8818	-121,0581	-141,2344	-161,4108	-181,5871	-201,7635
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-20,8912	-41,7823	-62,6735	-83,5647	-104,4559	-125,3470	-146,2382	-167,1294	-188,0205	-208,9117
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-19,8650	-39,7300	-59,5950	-79,4599	-99,3249	-119,1899	-139,0548	-158,9198	-178,7848	-198,6498
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	-21,3841	-42,7681	-64,1522	-85,5362	-106,9203	-128,3043	-149,6883	-171,0724	-192,4564	-213,8405
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	-21,2615	-42,5230	-63,7845	-85,0460	-106,3075	-127,5690	-148,8305	-170,0920	-191,3535	-212,6150
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-17,7818	-35,5636	-53,3453	-71,1271	-88,9089	-106,6906	-124,4724	-142,2541	-160,0359	-177,8178
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-15,5943	-31,1885	-46,7828	-62,3771	-77,9714	-93,5656	-109,1599	-124,7542	-140,3484	-155,9427
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-17,4906	-34,9812	-52,4718	-69,9624	-87,4530	-104,9436	-122,4342	-139,9248	-157,4154	-174,9059
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-15,5662	-31,1324	-46,6985	-62,2647	-77,8309	-93,3970	-108,9632	-124,5293	-140,0955	-155,6618
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	-17,9681	-35,9363	-53,9044	-71,8726	-89,8408	-107,8089	-125,7771	-143,7452	-161,7134	-179,6814
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	-15,6747	-31,3493	-47,0240	-62,6986	-78,3733	-94,0479	-109,7225	-125,3972	-141,0718	-156,7466

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-44,2663	-88,5325	-132,7988	-177,0650	-221,3313	-265,5975	-309,8637	-354,1300	-398,3962	-442,6625
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-63,1780	-126,3561	-189,5341	-252,7122	-315,8902	-379,0683	-442,2463	-505,4244	-568,6024	-631,7803
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-43,2992	-86,5984	-129,8976	-173,1968	-216,4960	-259,7952	-303,0944	-346,3936	-389,6928	-432,9920
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-58,9193	-117,8386	-176,7579	-235,6771	-294,5964	-353,5157	-412,4349	-471,3542	-530,2735	-589,1929
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	-81,1629	-162,3259	-243,4888	-324,6518	-405,8148	-486,9777	-568,1407	-649,3036	-730,4666	-811,6295
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	-55,4058	-110,8115	-166,2173	-221,6230	-277,0288	-332,4345	-387,8402	-443,2460	-498,6517	-554,0576
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-37,4899	-74,9797	-112,4696	-149,9594	-187,4493	-224,9391	-262,4289	-299,9188	-337,4086	-374,8986
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-52,4364	-104,8727	-157,3091	-209,7454	-262,1818	-314,6181	-367,0544	-419,4908	-471,9271	-524,3635
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-35,5775	-71,1550	-106,7324	-142,3099	-177,8874	-213,4648	-249,0423	-284,6197	-320,1972	-355,7748
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-50,0491	-100,0982	-150,1473	-200,1964	-250,2455	-300,2946	-350,3437	-400,3928	-450,4419	-500,4911
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	-42,7051	-85,4101	-128,1152	-170,8203	-213,5254	-256,2304	-298,9355	-341,6406	-384,3456	-427,0506
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	-54,5242	-109,0485	-163,5727	-218,0970	-272,6213	-327,1455	-381,6698	-436,1940	-490,7183	-545,2424

60 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-21,0304	-42,0607	-63,0911	-84,1215	-105,1519	-126,1822	-147,2126	-168,2430	-189,2733	-210,3036
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-20,1816	-40,3633	-60,5449	-80,7265	-100,9082	-121,0898	-141,2714	-161,4530	-181,6347	-201,8163
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-20,8527	-41,7054	-62,5581	-83,4108	-104,2635	-125,1162	-145,9689	-166,8216	-187,6743	-208,5270
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-20,2310	-40,4619	-60,6929	-80,9238	-101,1548	-121,3857	-141,6166	-161,8476	-182,0785	-202,3095
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	-21,3825	-42,7650	-64,1475	-85,5300	-106,9125	-128,2950	-149,6775	-171,0600	-192,4425	-213,8249
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	-20,8971	-41,7942	-62,6914	-83,5885	-104,4857	-125,3828	-146,2799	-167,1771	-188,0742	-208,9712
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-17,7839	-35,5678	-53,3518	-71,1357	-88,9197	-106,7036	-124,4875	-142,2715	-160,0554	-177,8392
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-15,5914	-31,1827	-46,7741	-62,3654	-77,9568	-93,5481	-109,1394	-124,7308	-140,3221	-155,9135
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-17,4924	-34,9848	-52,4772	-69,9696	-87,4620	-104,9544	-122,4468	-139,9392	-157,4316	-174,9240
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-16,0280	-32,0560	-48,0840	-64,1120	-80,1400	-96,1680	-112,1960	-128,2240	-144,2520	-160,2800
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	-17,9705	-35,9409	-53,9114	-71,8818	-89,8523	-107,8227	-125,7931	-143,7636	-161,7340	-179,7045
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	-15,6711	-31,3421	-47,0132	-62,6843	-78,3554	-94,0264	-109,6975	-125,3686	-141,0396	-156,7107

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-43,6856	-87,3712	-131,0568	-174,7424	-218,4280	-262,1136	-305,7992	-349,4848	-393,1704	-436,8561
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-63,4342	-126,8684	-190,3027	-253,7369	-317,1712	-380,6054	-444,0396	-507,4739	-570,9081	-634,3422
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-42,7468	-85,4935	-128,2403	-170,9871	-213,7339	-256,4806	-299,2274	-341,9742	-384,7209	-427,4677
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-59,1345	-118,2689	-177,4034	-236,5379	-295,6724	-354,8068	-413,9413	-473,0758	-532,2102	-591,3447
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	-80,2017	-160,4034	-240,6051	-320,8069	-401,0086	-481,2103	-561,4121	-641,6138	-721,8155	-802,0172
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	-53,4937	-106,9875	-160,4812	-213,9749	-271,9687	-326,3624	-380,7561	-435,1498	-489,5436	-534,9374
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-37,0316	-74,0632	-111,0947	-148,1263	-185,1579	-222,1894	-259,2210	-296,2525	-333,2841	-370,3158
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-52,4637	-104,9275	-157,3912	-209,8549	-262,3187	-314,7824	-367,2461	-419,7098	-472,1736	-524,6373
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-35,6186	-71,2371	-106,8557	-142,4743	-178,0929	-213,7114	-249,3300	-284,9486	-320,5671	-356,1858
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-50,0637	-100,1274	-150,1911	-200,2548	-250,3185	-300,3822	-350,4459	-400,5096	-450,5733	-500,6371
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	-42,1253	-84,2505	-126,3758	-168,5011	-210,6264	-252,7516	-294,8769	-337,0022	-379,1274	-421,2527
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	-54,6039	-109,2078	-163,8117	-218,4156	-273,0195	-327,6234	-382,2273	-436,8312	-491,4351	-546,0389

65 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-20,9920	-41,9840	-62,9760	-83,9680	-104,9600	-125,9520	-146,9440	-167,9360	-188,9280	-209,9201
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-20,3074	-40,6148	-60,9222	-81,2296	-101,5370	-121,8444	-142,1518	-162,4592	-182,7666	-203,0739
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-21,1025	-42,2049	-63,3074	-84,4098	-105,5123	-126,6147	-147,7171	-168,8196	-189,9220	-211,0246
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-20,5388	-41,0776	-61,6164	-82,1552	-102,6940	-123,2328	-143,7716	-164,3104	-184,8492	-205,3881
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	-21,3734	-42,7468	-64,1201	-85,4935	-106,8669	-128,2402	-149,6136	-170,9869	-192,3603	-213,7338
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	-20,7385	-41,4770	-62,2155	-82,9500	-103,6885	-124,4258	-145,1631	-165,9004	-186,6377	-207,3850
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-17,7858	-35,5715	-53,3573	-71,1430	-88,9288	-106,7145	-124,5002	-142,2860	-160,0717	-177,8576
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-15,5889	-31,1778	-46,7667	-62,3556	-77,9445	-93,5334	-109,1223	-124,7112	-140,3001	-155,8890
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-17,8978	-35,7956	-52,6934	-71,5912	-88,9890	-106,7868	-124,5846	-142,3824	-160,1802	-178,9781
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-16,4248	-32,8496	-49,2744	-65,6992	-82,1240	-98,5488	-114,9736	-131,3984	-147,8232	-164,2479
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	-17,9725	-35,9450	-53,9175	-71,8900	-89,8625	-107,8350	-125,8075	-143,7800	-161,7525	-179,7251
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	-15,6679	-31,3359	-47,0038	-62,6718	-78,3398	-94,0077	-109,6757	-125,3436	-141,0116	-156,6795

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-43,1837	-86,3673	-129,5510	-172,7346	-215,9183	-259,1019	-302,2855	-345,4692	-388,6528	-431,8366
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-63,6257	-127,2513	-190,8770	-254,5027	-318,1284	-381,7540	-445,3797	-509,0054	-572,6310	-636,2567
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-42,9266	-85,8531	-128,7797	-171,7063	-214,6329	-257,5594	-300,4860	-343,4126	-386,3391	-429,2657
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-59,2905	-118,5809	-177,8714	-237,1619	-296,4524	-355,7428	-415,0333	-474,3238	-533,6142	-592,9047
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	-79,3421	-158,6841	-238,0262	-317,3683	-396,7104	-476,0524	-555,3945	-634,7366	-714,0786	-793,4207
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	-51,9030	-103,8059	-155,7089	-207,6119	-259,5149	-311,4178	-363,3208	-415,2238	-467,1267	-519,0297
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-36,6831	-73,3661	-110,0492	-146,7323	-183,4154	-220,0984	-256,7815	-293,4646	-330,1476	-366,8307
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-52,4822	-104,9644	-157,4466	-209,9288	-262,4110	-314,8932	-367,3754	-419,8576	-472,3398	-524,8220
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-35,6477	-71,2953	-106,9430	-142,5906	-178,2383	-213,8859	-249,5335	-285,1812	-320,8288	-356,4766
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-50,0719	-100,1438	-150,2157	-200,2876	-250,3595	-300,4314	-350,5033	-400,5752	-450,6471	-500,7189
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	-41,6276	-83,2552	-124,8829	-166,5105	-208,1382	-249,7658	-291,3934	-333,0211	-374,6487	-416,2762
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	-54,6675	-109,3350	-164,0026	-218,6701	-273,3377	-328,0052	-382,6727	-437,3403	-492,0078	-546,6752

70 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-21,0753	-42,1507	-63,2260	-84,3014	-105,3768	-126,4521	-147,5275	-168,6028	-189,6782	-210,7534
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-20,5975	-41,1950	-61,7924	-82,3899	-102,9874	-123,5848	-144,1823	-164,7797	-185,3772	-205,9748
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-21,5773	-43,1545	-64,7318	-86,3090	-107,8863	-129,4635	-151,0407	-172,6180	-194,1952	-215,7726
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-20,8127	-41,6253	-62,4380	-83,2507	-104,0634	-124,8760	-145,6887	-166,5014	-187,3140	-208,1266
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	-21,3589	-42,7179	-64,0769	-85,4357	-106,7947	-128,1536	-149,5126	-170,8715	-192,2305	-213,5894
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	-20,7667	-41,5335	-62,3002	-83,0669	-103,8337	-124,6004	-145,3671	-166,1338	-186,9006	-207,6673
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-17,9134	-35,8268	-53,7402	-71,6536	-89,5670	-107,4804	-125,3938	-143,3072	-161,2206	-179,1340
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-15,9619	-31,9238	-47,8857	-63,8476	-79,8095	-95,7714	-111,7333	-127,6952	-143,6571	-159,6189
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-18,3668	-36,7336	-55,1005	-73,4673	-91,8342	-110,2010	-128,5678	-146,9347	-165,3015	-183,6682
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-16,7845	-33,5691	-50,3536	-67,1382	-83,9228	-100,7073	-117,4919	-134,2764	-151,0610	-167,8454
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	-17,9744	-35,9488	-53,9232	-71,8976	-89,8720	-107,8464	-125,8208	-143,7952	-161,7696	-179,7442
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	-15,6651	-31,3302	-46,9953	-62,6603	-78,3254	-93,9905	-109,6555	-125,3206	-140,9857	-156,6508

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-43,1120	-86,2241	-129,3362	-172,4482	-215,5603	-258,6724	-301,7844	-344,8965	-388,0086	-431,1205
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-63,7769	-127,5538	-191,3307	-255,1076	-318,8845	-382,6614	-446,4383	-510,2152	-573,9921	-637,7689
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-43,4242	-86,8484	-130,2726	-173,6969	-217,1211	-260,5453	-303,9696	-347,3938	-390,8180	-434,2421
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-59,4096	-118,8193	-178,2289	-237,6385	-297,0482	-356,4578	-415,8674	-475,2770	-534,6867	-594,0963
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	-78,5362	-157,0724	-235,6086	-314,1448	-392,6810	-471,2172	-549,7534	-628,2896	-706,8258	-785,3620
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	-51,5207	-103,0413	-154,5620	-206,0826	-257,6033	-309,1239	-360,6445	-412,1652	-463,6858	-515,2065
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-36,2969	-72,5939	-108,8908	-145,1877	-181,4847	-217,7816	-254,0785	-290,3754	-326,6724	-362,9694
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-52,4949	-104,9897	-157,4846	-209,9795	-262,4744	-314,9692	-367,4641	-419,9590	-472,4538	-524,9487
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-34,1791	-68,3583	-102,5374	-136,7166	-170,8958	-205,0749	-239,2541	-273,4332	-307,6124	-341,7914
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-50,0759	-100,1517	-150,2276	-200,3034	-250,3793	-300,4551	-350,5309	-400,6068	-450,6826	-500,7586
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	-41,1767	-82,3533	-123,5300	-164,7066	-205,8833	-247,0599	-288,2365	-329,4132	-370,5898	-411,7665
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	-54,7211	-109,4423	-164,1634	-218,8845	-273,6057	-328,3268	-383,0479	-437,7690	-492,4902	-547,2113

75 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-21,5392	-43,0783	-64,6175	-86,1567	-107,6959	-129,2350	-150,7742	-172,3134	-193,8525	-215,3917
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-20,8632	-41,7264	-62,5895	-83,4527	-104,3159	-125,1790	-146,0422	-166,9053	-187,7685	-208,6318
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-22,0153	-44,0306	-66,0459	-88,0612	-110,0765	-132,0918	-154,1071	-176,1224	-198,1377	-220,1529
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-21,0626	-42,1252	-63,1879	-84,2505	-105,3132	-126,3758	-147,4384	-168,5011	-189,5637	-210,6262
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	-21,3405	-42,6810	-64,0215	-85,3621	-106,7026	-128,0431	-149,3837	-170,7242	-192,0647	-213,4051
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	-20,7917	-41,5834	-62,3750	-83,1667	-103,9584	-124,7500	-145,5417	-166,3333	-187,1250	-207,9167
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-18,3786	-36,7572	-55,1358	-73,5145	-91,8931	-110,2717	-128,6504	-147,0290	-165,4076	-183,7862
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-16,3100	-32,6201	-48,9301	-65,2401	-81,5502	-97,8602	-114,1702	-130,4802	-146,7903	-163,1003
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-18,8051	-37,6102	-56,4153	-75,2204	-94,0255	-112,8306	-131,6357	-150,4408	-169,2459	-188,0510
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-17,1187	-34,2374	-51,3560	-68,4747	-85,5934	-102,7120	-119,8307	-136,9493	-154,0680	-171,1868
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	-17,9762	-35,9525	-53,9287	-71,9049	-89,8812	-107,8574	-125,8336	-143,8098	-161,7861	-179,7623
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	-15,6624	-31,3248	-46,9872	-62,6496	-78,3120	-93,9744	-109,6368	-125,2992	-140,9616	-156,6239

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-43,5970	-87,1941	-130,7911	-174,3881	-217,9852	-261,5822	-305,1792	-348,7762	-392,3733	-435,9703
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-63,8990	-127,7980	-191,6960	-255,5959	-319,4944	-383,3933	-447,2921	-511,1910	-575,0899	-638,9887
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-43,8680	-87,7359	-131,6039	-175,4719	-219,3399	-263,2078	-307,0758	-350,9438	-394,8117	-438,6796
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-59,5022	-119,0044	-178,5066	-238,0089	-297,5111	-357,0133	-416,5156	-476,0178	-535,5200	-595,0221
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	-77,7662	-155,5325	-233,2988	-311,0650	-388,8313	-466,5976	-544,3638	-622,1301	-699,8964	-777,6625
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	-51,1596	-102,3191	-153,4787	-204,6383	-255,7979	-306,9574	-358,1170	-409,2766	-460,4361	-511,5956
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-34,2747	-68,5494	-102,8240	-137,0987	-171,3734	-205,6480	-239,9227	-274,1973	-308,4720	-342,7468
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-52,5032	-105,0064	-157,5096	-210,0128	-262,5160	-315,0192	-367,5224	-420,0256	-472,5288	-525,0319
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-33,1847	-66,3694	-99,5541	-132,7388	-165,9235	-199,1082	-232,2929	-265,4776	-298,6623	-331,8469
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-50,0766	-100,1533	-150,2299	-200,3066	-250,3833	-300,4599	-350,5366	-400,6132	-450,6899	-500,7665
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	-40,7580	-81,5161	-122,2741	-163,0321	-203,7902	-244,5482	-285,3062	-326,0642	-366,8223	-407,5803
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	-54,7672	-109,5345	-164,3017	-219,0690	-273,8363	-328,6035	-383,3708	-438,1380	-492,9053	-547,6724

80 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-21,9745	-43,9491	-65,9236	-87,8982	-109,8728	-131,8473	-153,8219	-175,7964	-197,7710	-219,7455
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-21,1099	-42,2199	-63,3298	-84,4397	-105,5497	-126,6596	-147,7695	-168,8794	-189,9894	-211,0993
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-22,4248	-44,8496	-67,2744	-89,6992	-112,1240	-134,5488	-156,9736	-179,3984	-201,8232	-224,2481
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-21,2940	-42,5880	-63,8820	-85,1760	-106,4700	-127,7639	-149,0579	-170,3519	-191,6459	-212,9399
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	-21,3187	-42,6374	-63,9562	-85,2749	-106,5937	-127,9124	-149,2311	-170,5499	-191,8686	-213,1872
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	-20,8142	-41,6283	-62,4425	-83,2567	-104,0709	-124,8850	-145,6992	-166,5134	-187,3275	-208,1417
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-18,8205	-37,6410	-56,4615	-75,2820	-94,1025	-112,9230	-131,7435	-150,5640	-169,3845	-188,2050
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-16,6393	-33,2785	-49,9178	-66,5570	-83,1963	-99,8355	-116,4747	-133,1140	-149,7532	-166,3926
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-19,2199	-38,4398	-57,6597	-76,8796	-96,0995	-115,3194	-134,5393	-153,7592	-172,9791	-192,1990
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-17,4332	-34,8664	-52,2996	-69,7327	-87,1659	-104,5991	-122,0322	-139,4654	-156,8986	-174,3318
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	-17,9780	-35,9559	-53,9339	-71,9119	-89,8899	-107,8678	-125,8458	-143,8238	-161,8017	-179,7797
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	-15,6598	-31,3197	-46,9795	-62,6393	-78,2992	-93,9590	-109,6188	-125,2786	-140,9385	-156,5983

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-44,0372	-88,0744	-132,1116	-176,1488	-220,1860	-264,2232	-308,2604	-352,2976	-396,3348	-440,3721
MOD02	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-63,9980	-127,9960	-191,9940	-255,9921	-319,9901	-383,9881	-447,9862	-511,9842	-575,9822	-639,9801
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-44,2694	-88,5389	-132,8083	-177,0777	-221,3472	-265,6166	-309,8860	-354,1554	-398,4249	-442,6943
MOD04	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-59,5738	-119,1477	-178,7215	-238,2954	-297,8693	-357,4431	-417,0170	-476,5908	-536,1647	-595,7385
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	-77,0228	-154,0456	-231,0684	-308,0912	-385,1140	-462,1368	-539,1596	-616,1824	-693,2052	-770,2280
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	-65,1802	-130,3604	-195,5406	-260,7209	-325,9011	-391,0813	-456,2616	-521,4418	-586,6220	-651,8022
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	-33,9901	-67,9802	-101,9704	-135,9605	-169,9507	-203,9408	-237,9309	-271,9211	-305,9112	-339,9012
MOD08	Autoral	ZrO2 - 3%Y2O3	-52,5080	-105,0159	-157,5239	-210,0318	-262,5398	-315,0477	-367,5556	-420,0636	-472,5715	-525,0797
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	-32,9271	-65,8542	-98,7813	-131,7084	-164,6355	-197,5626	-230,4897	-263,4168	-296,3439	-329,2709
MOD10	Autoral	Ce-TZP/Al2O3	-50,0749	-100,1497	-150,2246	-200,2995	-250,3744	-300,4492	-350,5241	-400,5990	-450,6738	-500,7486
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	-40,3640	-80,7281	-121,0921	-161,4562	-201,8203	-242,1843	-282,5484	-322,9124	-363,2765	-403,6404
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	-54,8072	-109,6145	-164,4217	-219,2290	-274,0363	-328,8435	-383,6508	-438,4580	-493,2653	-548,0725

ANEXO III: Resultados para o Critério de von Mises em MPa

Até 50 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	23,8970	47,7939	71,6909	95,5879	119,4849	143,3818	167,2788	191,1758	215,0728	238,9697
MOD06	Autorial	Titânio de alta pureza	18,9772	37,9544	56,9316	75,9087	94,8859	113,8631	132,8403	151,8175	170,7947	189,7719
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	21,7012	43,4024	65,1035	86,8047	108,5059	130,2070	151,9082	173,6093	195,3105	217,0118
MOD12	Autorial	Titânio de alta pureza	16,8516	33,7031	50,5547	67,4063	84,2579	101,1094	117,9610	134,8126	151,6641	168,5157

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	55,2121	110,4243	165,6365	220,8487	276,0609	331,2731	386,4853	441,6975	496,9097	552,1214
MOD06	Autorial	Titânio de alta pureza	46,5728	93,1456	139,7184	186,2912	232,8640	279,4368	326,0096	372,5824	419,1552	465,7281
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	29,0819	58,1638	87,2458	116,3277	145,4097	174,4916	203,5735	232,6555	261,7374	290,8192
MOD12	Autorial	Titânio de alta pureza	41,3705	82,7411	124,1116	165,4822	206,8528	248,2233	289,5939	330,9644	372,3350	413,7054

55 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	23,8958	47,7915	71,6873	95,5830	119,4788	143,3745	167,2702	191,1660	215,0617	238,9576
MOD06	Autorial	Titânio de alta pureza	18,9773	37,9547	56,9320	75,9094	94,8868	113,8641	132,8415	151,8188	170,7962	189,7735
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	21,7133	43,4266	65,1400	86,8533	108,5667	130,2800	151,9933	173,7067	195,4200	217,1332
MOD12	Autorial	Titânio de alta pureza	16,8621	33,7241	50,5862	67,4482	84,3103	101,1723	118,0343	134,8964	151,7584	168,6206

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	54,8525	109,7050	164,5576	219,4101	274,2627	329,1152	383,9677	438,8203	493,6728	548,5252
MOD06	Autorial	Titânio de alta pureza	46,5458	93,0915	139,6373	186,1831	232,7288	279,2746	325,8203	372,3661	418,9119	465,4577
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	28,6061	57,2122	85,8182	114,4243	143,0304	171,6364	200,2425	228,8485	257,4546	286,0608
MOD12	Autorial	Titânio de alta pureza	41,4607	82,9215	124,3822	165,8429	207,3037	248,7644	290,2251	331,6858	373,1466	414,6074

60 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	23,8950	47,7901	71,6851	95,5801	119,4752	143,3702	167,2652	191,1602	215,0553	238,9503
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	18,9774	37,9549	56,9323	75,9098	94,8873	113,8647	132,8422	151,8196	170,7971	189,7744
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	21,7209	43,4419	65,1628	86,8837	108,6047	130,3256	152,0465	173,7674	195,4884	217,2093
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	16,8686	33,7371	50,6057	67,4742	84,3428	101,2113	118,0798	134,9484	151,8169	168,6856

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	54,5877	109,1754	163,7632	218,3509	272,9386	327,5264	382,1141	436,7018	491,2895	545,8772
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	46,5296	93,0591	139,5887	186,1182	232,6478	279,1773	325,7068	372,2364	418,7659	465,2956
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	28,3137	56,6274	84,9411	113,2548	141,5685	169,8822	198,1959	226,5096	254,8233	283,1370
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	41,5126	83,0252	124,5378	166,0504	207,5630	249,0756	290,5882	332,1008	373,6134	415,1259

65 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	23,8944	47,7888	71,6832	95,5776	119,4720	143,3664	167,2608	191,1552	215,0496	238,9440
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	18,9775	37,9551	56,9326	75,9101	94,8877	113,8652	132,8427	151,8202	170,7978	189,7753
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	21,7275	43,4550	65,1826	86,9101	108,6377	130,3652	152,0927	173,8203	195,5478	217,2752
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	16,8742	33,7483	50,6225	67,4967	84,3709	101,2450	118,1192	134,9934	151,8675	168,7417

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	54,0045	108,0090	162,0136	216,0181	270,0227	324,0272	378,0317	432,0363	486,0408	540,0452
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	46,5159	93,0319	139,5479	186,0638	232,5798	279,0958	325,6117	372,1277	418,6437	465,1595
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	28,0635	56,1270	84,1905	112,2539	140,3174	168,3809	196,4443	224,5078	252,5713	280,6348
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	41,5547	83,1093	124,6640	166,2187	207,7734	249,3280	290,8827	332,4374	373,9920	415,5466

70 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	23,8939	47,7877	71,6815	95,5754	119,4692	143,3630	167,2569	191,1507	215,0445	238,9385
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	18,9776	37,9552	56,9328	75,9104	94,8880	113,8656	132,8432	151,8208	170,7984	189,7761
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	21,7335	43,4671	65,2006	86,9342	108,6678	130,4013	152,1349	173,8684	195,6020	217,3355
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	17,3109	34,6218	51,9327	69,2437	86,5546	103,8655	121,1765	138,4874	155,7983	173,1091

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	53,7453	107,4907	161,2360	214,9814	268,7268	322,4721	376,2175	429,9628	483,7082	537,4535
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	46,5039	93,0078	139,5116	186,0155	232,5194	279,0232	325,5271	372,0309	418,5348	465,0388
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	27,0774	54,1549	81,2323	108,3097	135,3872	162,4646	189,5420	216,6194	243,6969	270,7744
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	41,5907	83,1814	124,7721	166,3628	207,9535	249,5442	291,1349	332,7256	374,3163	415,9071

75 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	23,8933	47,7867	71,6800	95,5734	119,4668	143,3601	167,2535	191,1468	215,0402	238,9334
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	18,9777	37,9554	56,9330	75,9107	94,8884	113,8660	132,8437	151,8213	170,7990	189,7768
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	21,7392	43,4784	65,2175	86,9567	108,6959	130,4350	152,1742	173,9133	195,6525	217,3918
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	17,9118	35,8235	53,7353	71,6470	89,5588	107,4705	125,3822	143,2940	161,2057	179,1175

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	53,4872	106,9745	160,4618	213,9490	267,4363	320,9236	374,4108	427,8981	481,3854	534,8725
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	46,4929	92,9858	139,4787	185,9716	232,4645	278,9574	325,4503	371,9432	418,4361	464,9291
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	27,2271	54,4543	81,6814	108,9086	136,1358	163,3629	190,5901	217,8172	245,0444	272,2714
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	41,6223	83,2446	124,8669	166,4892	208,1115	249,7338	291,3561	332,9784	374,6007	416,2231

80 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	23,8929	47,7857	71,6786	95,5715	119,4644	143,3572	167,2501	191,1430	215,0358	238,9287
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	18,9778	37,9555	56,9333	75,9110	94,8888	113,8665	132,8442	151,8220	170,7997	189,7776
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	21,7445	43,4890	65,2335	86,9780	108,7225	130,4670	152,2115	173,9560	195,7005	217,4451
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	18,4914	36,9828	55,4743	73,9657	92,4572	110,9486	129,4400	147,9315	166,4229	184,9142

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	36,7834	73,5668	110,3502	147,1336	183,9170	220,7004	257,4838	294,2672	331,0506	367,8340
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	46,4828	92,9656	139,4484	185,9312	232,4140	278,8968	325,3796	371,8624	418,3452	464,8281
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	27,3668	54,7335	82,1003	109,4671	136,8339	164,2006	191,5674	218,9342	246,3009	273,6677
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	41,6503	83,3006	124,9510	166,6013	208,2517	249,9020	291,5523	333,2027	374,8530	416,5032

ANEXO IV: Resultados para o Critério de von Mises (Adimensional)

Até 50 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0434	0,0869	0,1303	0,1738	0,2172	0,2607	0,3041	0,3476	0,3910	0,4345
MOD06	Autorial	Titânio de alta pureza	0,0345	0,0690	0,1035	0,1380	0,1725	0,2070	0,2415	0,2760	0,3105	0,3450
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0395	0,0789	0,1184	0,1578	0,1973	0,2367	0,2762	0,3157	0,3551	0,3946
MOD12	Autorial	Titânio de alta pureza	0,0306	0,0613	0,0919	0,1226	0,1532	0,1838	0,2145	0,2451	0,2758	0,3064

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	0,1004	0,2008	0,3012	0,4015	0,5019	0,6023	0,7027	0,8031	0,9035	1,0039
MOD06	Autorial	Titânio de alta pureza	0,0847	0,1694	0,2540	0,3387	0,4234	0,5081	0,5927	0,6774	0,7621	0,8468
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0529	0,1058	0,1586	0,2115	0,2644	0,3173	0,3701	0,4230	0,4759	0,5288
MOD12	Autorial	Titânio de alta pureza	0,0752	0,1504	0,2257	0,3009	0,3761	0,4513	0,5265	0,6018	0,6770	0,7522

55 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0434	0,0869	0,1303	0,1738	0,2172	0,2607	0,3041	0,3476	0,3910	0,4345
MOD06	Autorial	Titânio de alta pureza	0,0345	0,0690	0,1035	0,1380	0,1725	0,2070	0,2415	0,2760	0,3105	0,3450
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0395	0,0790	0,1184	0,1579	0,1974	0,2369	0,2764	0,3158	0,3553	0,3948
MOD12	Autorial	Titânio de alta pureza	0,0307	0,0613	0,0920	0,1226	0,1533	0,1839	0,2146	0,2453	0,2759	0,3066

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0997	0,1995	0,2992	0,3989	0,4987	0,5984	0,6981	0,7979	0,8976	0,9973
MOD06	Autorial	Titânio de alta pureza	0,0846	0,1693	0,2539	0,3385	0,4231	0,5078	0,5924	0,6770	0,7617	0,8463
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0520	0,1040	0,1560	0,2080	0,2601	0,3121	0,3641	0,4161	0,4681	0,5201
MOD12	Autorial	Titânio de alta pureza	0,0754	0,1508	0,2261	0,3015	0,3769	0,4523	0,5277	0,6031	0,6784	0,7538

60 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0434	0,0869	0,1303	0,1738	0,2172	0,2607	0,3041	0,3476	0,3910	0,4345
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	0,0345	0,0690	0,1035	0,1380	0,1725	0,2070	0,2415	0,2760	0,3105	0,3450
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0395	0,0790	0,1185	0,1580	0,1975	0,2370	0,2764	0,3159	0,3554	0,3949
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	0,0307	0,0613	0,0920	0,1227	0,1534	0,1840	0,2147	0,2454	0,2760	0,3067

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0993	0,1985	0,2978	0,3970	0,4963	0,5955	0,6948	0,7940	0,8933	0,9925
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	0,0846	0,1692	0,2538	0,3384	0,4230	0,5076	0,5922	0,6768	0,7614	0,8460
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0515	0,1030	0,1544	0,2059	0,2574	0,3089	0,3604	0,4118	0,4633	0,5148
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	0,0755	0,1510	0,2264	0,3019	0,3774	0,4529	0,5283	0,6038	0,6793	0,7548

65 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0434	0,0869	0,1303	0,1738	0,2172	0,2607	0,3041	0,3476	0,3910	0,4344
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	0,0345	0,0690	0,1035	0,1380	0,1725	0,2070	0,2415	0,2760	0,3105	0,3450
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0395	0,0790	0,1185	0,1580	0,1975	0,2370	0,2765	0,3160	0,3555	0,3950
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	0,0307	0,0614	0,0920	0,1227	0,1534	0,1841	0,2148	0,2454	0,2761	0,3068

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0982	0,1964	0,2946	0,3928	0,4910	0,5891	0,6873	0,7855	0,8837	0,9819
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	0,0846	0,1691	0,2537	0,3383	0,4229	0,5074	0,5920	0,6766	0,7612	0,8457
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0510	0,1020	0,1531	0,2041	0,2551	0,3061	0,3572	0,4082	0,4592	0,5102
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	0,0756	0,1511	0,2267	0,3022	0,3778	0,4533	0,5289	0,6044	0,6800	0,7555

70 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0434	0,0869	0,1303	0,1738	0,2172	0,2607	0,3041	0,3475	0,3910	0,4344
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	0,0345	0,0690	0,1035	0,1380	0,1725	0,2070	0,2415	0,2760	0,3105	0,3450
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0395	0,0790	0,1185	0,1581	0,1976	0,2371	0,2766	0,3161	0,3556	0,3952
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	0,0315	0,0629	0,0944	0,1259	0,1574	0,1888	0,2203	0,2518	0,2833	0,3147

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0977	0,1954	0,2932	0,3909	0,4886	0,5863	0,6840	0,7818	0,8795	0,9772
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	0,0846	0,1691	0,2537	0,3382	0,4228	0,5073	0,5919	0,6764	0,7610	0,8455
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0492	0,0985	0,1477	0,1969	0,2462	0,2954	0,3446	0,3939	0,4431	0,4923
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	0,0756	0,1512	0,2269	0,3025	0,3781	0,4537	0,5293	0,6050	0,6806	0,7562

75 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0434	0,0869	0,1303	0,1738	0,2172	0,2607	0,3041	0,3475	0,3910	0,4344
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	0,0345	0,0690	0,1035	0,1380	0,1725	0,2070	0,2415	0,2760	0,3105	0,3450
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0395	0,0791	0,1186	0,1581	0,1976	0,2372	0,2767	0,3162	0,3557	0,3953
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	0,0326	0,0651	0,0977	0,1303	0,1628	0,1954	0,2280	0,2605	0,2931	0,3257

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0972	0,1945	0,2917	0,3890	0,4862	0,5835	0,6807	0,7780	0,8752	0,9725
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	0,0845	0,1691	0,2536	0,3381	0,4227	0,5072	0,5917	0,6763	0,7608	0,8453
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0495	0,0990	0,1485	0,1980	0,2475	0,2970	0,3465	0,3960	0,4455	0,4950
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	0,0757	0,1514	0,2270	0,3027	0,3784	0,4541	0,5297	0,6054	0,6811	0,7568

80 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0434	0,0869	0,1303	0,1738	0,2172	0,2606	0,3041	0,3475	0,3910	0,4344
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	0,0345	0,0690	0,1035	0,1380	0,1725	0,2070	0,2415	0,2760	0,3105	0,3451
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0395	0,0791	0,1186	0,1581	0,1977	0,2372	0,2767	0,3163	0,3558	0,3954
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	0,0336	0,0672	0,1009	0,1345	0,1681	0,2017	0,2353	0,2690	0,3026	0,3362

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD05	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0669	0,1338	0,2006	0,2675	0,3344	0,4013	0,4682	0,5350	0,6019	0,6688
MOD06	Autoral	Titânio de alta pureza	0,0845	0,1690	0,2535	0,3381	0,4226	0,5071	0,5916	0,6761	0,7606	0,8451
MOD11	Comercial	Titânio de alta pureza	0,0498	0,0995	0,1493	0,1990	0,2488	0,2985	0,3483	0,3981	0,4478	0,4976
MOD12	Autoral	Titânio de alta pureza	0,0757	0,1515	0,2272	0,3029	0,3786	0,4544	0,5301	0,6058	0,6816	0,7573

ANEXO V: Resultados para o Critério de Mohr Coulomb (Adimensional)

Até 50 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0196	0,0391	0,0587	0,0782	0,0978	0,1174	0,1369	0,1565	0,1761	0,1956
MOD02	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0167	0,0335	0,0502	0,0669	0,0837	0,1004	0,1171	0,1339	0,1506	0,1673
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0195	0,0390	0,0585	0,0780	0,0975	0,1170	0,1365	0,1560	0,1755	0,1951
MOD04	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0150	0,0300	0,0450	0,0599	0,0749	0,0899	0,1048	0,1198	0,1348	0,1499
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0230	0,0459	0,0689	0,0919	0,1149	0,1378	0,1608	0,1838	0,2067	0,2297
MOD08	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0091	0,0182	0,0273	0,0365	0,0456	0,0547	0,0639	0,0730	0,0821	0,0912
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0220	0,0440	0,0661	0,0881	0,1102	0,1322	0,1542	0,1763	0,1983	0,2202
MOD10	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0094	0,0187	0,0281	0,0374	0,0468	0,0561	0,0654	0,0748	0,0841	0,0936

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0253	0,0506	0,0759	0,1012	0,1265	0,1518	0,1771	0,2024	0,2277	0,2531
MOD02	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0325	0,0650	0,0975	0,1300	0,1625	0,1950	0,2275	0,2600	0,2925	0,3249
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0247	0,0495	0,0742	0,0990	0,1238	0,1485	0,1733	0,1980	0,2228	0,2474
MOD04	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0325	0,0650	0,0975	0,1300	0,1625	0,1950	0,2275	0,2600	0,2925	0,3251
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0257	0,0515	0,0772	0,1029	0,1287	0,1544	0,1801	0,2058	0,2316	0,2573
MOD08	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0348	0,0696	0,1045	0,1393	0,1742	0,2090	0,2438	0,2787	0,3135	0,3482
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0332	0,0663	0,0995	0,1326	0,1658	0,1989	0,2320	0,2652	0,2983	0,3315
MOD10	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0347	0,0694	0,1040	0,1387	0,1734	0,2080	0,2427	0,2773	0,3120	0,3468

55 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0202	0,0403	0,0605	0,0806	0,1008	0,1209	0,1411	0,1612	0,1814	0,2016
MOD02	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0163	0,0327	0,0490	0,0654	0,0817	0,0981	0,1144	0,1308	0,1471	0,1633
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0201	0,0401	0,0602	0,0803	0,1004	0,1204	0,1405	0,1606	0,1806	0,2007
MOD04	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0152	0,0305	0,0457	0,0610	0,0763	0,0915	0,1068	0,1220	0,1373	0,1524
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0246	0,0491	0,0737	0,0983	0,1229	0,1474	0,1720	0,1966	0,2211	0,2457
MOD08	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0095	0,0190	0,0285	0,0381	0,0476	0,0571	0,0667	0,0762	0,0857	0,0951
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0235	0,0470	0,0705	0,0940	0,1175	0,1410	0,1645	0,1880	0,2115	0,2350
MOD10	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0097	0,0193	0,0290	0,0386	0,0483	0,0579	0,0675	0,0772	0,0868	0,0966

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0253	0,0507	0,0760	0,1014	0,1268	0,1521	0,1775	0,2028	0,2282	0,2535
MOD02	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0325	0,0649	0,0974	0,1298	0,1623	0,1947	0,2271	0,2596	0,2920	0,3246
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0248	0,0496	0,0743	0,0991	0,1239	0,1486	0,1734	0,1981	0,2229	0,2478
MOD04	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0325	0,0650	0,0975	0,1299	0,1624	0,1949	0,2273	0,2598	0,2923	0,3249
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0355	0,0709	0,1064	0,1419	0,1774	0,2128	0,2483	0,2838	0,3192	0,3546
MOD08	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0353	0,0706	0,1059	0,1413	0,1766	0,2119	0,2473	0,2826	0,3179	0,3531
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0336	0,0672	0,1007	0,1343	0,1679	0,2014	0,2350	0,2685	0,3021	0,3358
MOD10	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0351	0,0702	0,1054	0,1405	0,1757	0,2108	0,2459	0,2811	0,3162	0,3512

60 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0205	0,0410	0,0616	0,0821	0,1027	0,1232	0,1437	0,1643	0,1848	0,2052
MOD02	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0161	0,0321	0,0482	0,0642	0,0803	0,0963	0,1123	0,1284	0,1444	0,1606
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0204	0,0408	0,0612	0,0816	0,1020	0,1224	0,1428	0,1632	0,1836	0,2041
MOD04	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0154	0,0308	0,0462	0,0616	0,0770	0,0924	0,1078	0,1232	0,1386	0,1539
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0256	0,0512	0,0767	0,1023	0,1279	0,1534	0,1790	0,2045	0,2301	0,2558
MOD08	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0098	0,0196	0,0295	0,0393	0,0492	0,0590	0,0688	0,0787	0,0885	0,0982
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0244	0,0488	0,0733	0,0977	0,1222	0,1466	0,1710	0,1955	0,2199	0,2442
MOD10	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0098	0,0197	0,0295	0,0393	0,0492	0,0590	0,0688	0,0786	0,0885	0,0983

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0254	0,0507	0,0761	0,1015	0,1269	0,1522	0,1776	0,2030	0,2283	0,2537
MOD02	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0324	0,0649	0,0973	0,1298	0,1623	0,1947	0,2272	0,2596	0,2921	0,3244
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0248	0,0496	0,0744	0,0992	0,1240	0,1488	0,1736	0,1984	0,2232	0,2480
MOD04	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0325	0,0649	0,0974	0,1299	0,1624	0,1948	0,2273	0,2598	0,2922	0,3247
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0358	0,0715	0,1073	0,1430	0,1788	0,2145	0,2502	0,2860	0,3217	0,3576
MOD08	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0356	0,0712	0,1068	0,1424	0,1780	0,2136	0,2492	0,2848	0,3204	0,3560
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0338	0,0677	0,1015	0,1353	0,1692	0,2030	0,2368	0,2706	0,3045	0,3383
MOD10	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0354	0,0708	0,1061	0,1415	0,1769	0,2122	0,2476	0,2829	0,3183	0,3538

65 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0208	0,0416	0,0624	0,0833	0,1041	0,1249	0,1458	0,1666	0,1874	0,2081
MOD02	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0158	0,0316	0,0474	0,0514	0,0672	0,0795	0,0917	0,1040	0,1162	0,1580
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0207	0,0414	0,0621	0,0828	0,1035	0,1242	0,1449	0,1656	0,1863	0,2069
MOD04	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0155	0,0310	0,0465	0,0620	0,0775	0,0930	0,1085	0,1240	0,1395	0,1551
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0265	0,0529	0,0794	0,1058	0,1323	0,1587	0,1851	0,2116	0,2380	0,2645
MOD08	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0101	0,0202	0,0302	0,0403	0,0504	0,0604	0,0705	0,0805	0,0906	0,1008
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0252	0,0504	0,0756	0,1008	0,1260	0,1512	0,1764	0,2016	0,2268	0,2521
MOD10	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0100	0,0200	0,0299	0,0399	0,0499	0,0598	0,0698	0,0797	0,0897	0,0998

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0254	0,0508	0,0762	0,1015	0,1269	0,1523	0,1776	0,2030	0,2284	0,2539
MOD02	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0324	0,0649	0,0973	0,1297	0,1622	0,1946	0,2270	0,2594	0,2919	0,3243
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0248	0,0496	0,0744	0,0993	0,1241	0,1489	0,1738	0,1986	0,2234	0,2482
MOD04	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0325	0,0649	0,0974	0,1298	0,1623	0,1947	0,2271	0,2596	0,2920	0,3246
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0360	0,0720	0,1080	0,1440	0,1800	0,2160	0,2520	0,2880	0,3240	0,3600
MOD08	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0358	0,0717	0,1075	0,1434	0,1793	0,2151	0,2510	0,2868	0,3227	0,3584
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0340	0,0681	0,1021	0,1361	0,1702	0,2042	0,2382	0,2722	0,3063	0,3403
MOD10	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0356	0,0712	0,1068	0,1424	0,1780	0,2136	0,2492	0,2848	0,3204	0,3559

70 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0211	0,0422	0,0632	0,0843	0,1054	0,1264	0,1475	0,1685	0,1896	0,2108
MOD02	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0156	0,0311	0,0467	0,0622	0,0778	0,0933	0,1088	0,1244	0,1399	0,1555
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0209	0,0419	0,0628	0,0838	0,1048	0,1257	0,1467	0,1676	0,1886	0,2094
MOD04	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0156	0,0312	0,0468	0,0624	0,0780	0,0936	0,1092	0,1248	0,1404	0,1561
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0273	0,0545	0,0818	0,1090	0,1363	0,1635	0,1907	0,2180	0,2452	0,2726
MOD08	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0103	0,0206	0,0309	0,0413	0,0516	0,0619	0,0723	0,0826	0,0929	0,1032
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0259	0,0519	0,0778	0,1037	0,1297	0,1556	0,1815	0,2074	0,2334	0,2593
MOD10	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0101	0,0202	0,0303	0,0404	0,0505	0,0606	0,0707	0,0808	0,0909	0,1011

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0254	0,0508	0,0762	0,1016	0,1270	0,1524	0,1778	0,2032	0,2286	0,2540
MOD02	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0324	0,0648	0,0973	0,1297	0,1622	0,1946	0,2270	0,2595	0,2919	0,3242
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0248	0,0497	0,0745	0,0993	0,1242	0,1490	0,1738	0,1986	0,2235	0,2483
MOD04	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0325	0,0649	0,0974	0,1298	0,1623	0,1947	0,2271	0,2596	0,2920	0,3245
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0362	0,0724	0,1086	0,1448	0,1810	0,2172	0,2534	0,2896	0,3258	0,3621
MOD08	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0361	0,0721	0,1082	0,1442	0,1803	0,2163	0,2523	0,2884	0,3244	0,3605
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0342	0,0684	0,1026	0,1369	0,1711	0,2053	0,2396	0,2738	0,3080	0,3421
MOD10	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0358	0,0716	0,1073	0,1431	0,1789	0,2146	0,2504	0,2861	0,3219	0,3578

75 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0213	0,0426	0,0639	0,0853	0,1066	0,1279	0,1493	0,1706	0,1919	0,2131
MOD02	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0155	0,0310	0,0465	0,0619	0,0774	0,0929	0,1083	0,1238	0,1393	0,1548
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0212	0,0423	0,0635	0,0847	0,1059	0,1270	0,1482	0,1694	0,1905	0,2116
MOD04	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0157	0,0314	0,0471	0,0628	0,0785	0,0942	0,1099	0,1256	0,1413	0,1570
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0280	0,0560	0,0840	0,1120	0,1400	0,1680	0,1960	0,2240	0,2520	0,2801
MOD08	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0105	0,0211	0,0316	0,0421	0,0527	0,0632	0,0737	0,0842	0,0948	0,1053
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0266	0,0532	0,0798	0,1064	0,1330	0,1596	0,1862	0,2128	0,2394	0,2660
MOD10	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0103	0,0206	0,0309	0,0412	0,0515	0,0618	0,0721	0,0824	0,0927	0,1030

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0254	0,0508	0,0762	0,1016	0,1270	0,1524	0,1778	0,2032	0,2286	0,2541
MOD02	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0324	0,0648	0,0972	0,1296	0,1620	0,1944	0,2268	0,2592	0,2916	0,3241
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0248	0,0497	0,0745	0,0994	0,1243	0,1491	0,1740	0,1988	0,2237	0,2484
MOD04	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0324	0,0649	0,0973	0,1298	0,1623	0,1947	0,2272	0,2596	0,2921	0,3244
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0364	0,0728	0,1092	0,1456	0,1820	0,2184	0,2548	0,2912	0,3276	0,3640
MOD08	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0362	0,0725	0,1087	0,1450	0,1813	0,2175	0,2538	0,2900	0,3263	0,3624
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0344	0,0687	0,1031	0,1375	0,1719	0,2062	0,2406	0,2750	0,3093	0,3437
MOD10	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0359	0,0719	0,1078	0,1438	0,1797	0,2156	0,2515	0,2874	0,3233	0,3592

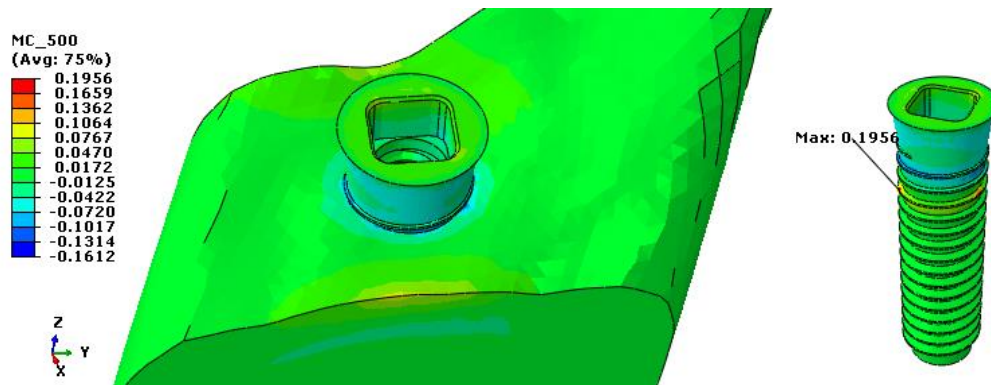
80 anos

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	350 N	400 N	450 N	500 N
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0215	0,0431	0,0646	0,0861	0,1077	0,1292	0,1507	0,1722	0,1938	0,2153
MOD02	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0156	0,0311	0,0467	0,0623	0,0779	0,0934	0,1090	0,1246	0,1401	0,1557
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0214	0,0427	0,0641	0,0855	0,1069	0,1282	0,1496	0,1710	0,1923	0,2137
MOD04	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0158	0,0316	0,0473	0,0631	0,0789	0,0946	0,1104	0,1261	0,1419	0,1578
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0287	0,0575	0,0862	0,1149	0,1437	0,1724	0,2011	0,2298	0,2586	0,2873
MOD08	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0107	0,0215	0,0322	0,0430	0,0538	0,0645	0,0753	0,0860	0,0968	0,1074
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0272	0,0544	0,0817	0,1089	0,1362	0,1634	0,1906	0,2179	0,2451	0,2722
MOD10	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0105	0,0210	0,0315	0,0419	0,0524	0,0629	0,0733	0,0838	0,0943	0,1049

	IMPLANTE	MATERIAL	50 N / 45°	100 N / 45°	150 N / 45°	200 N / 45°	250 N / 45°	300 N / 45°	350 N / 45°	400 N / 45°	450 N / 45°	500 N / 45°
MOD01	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0254	0,0508	0,0763	0,1017	0,1272	0,1526	0,1780	0,2035	0,2289	0,2542
MOD02	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0324	0,0648	0,0972	0,1296	0,1620	0,1944	0,2268	0,2592	0,2916	0,3240
MOD03	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0248	0,0497	0,0745	0,0994	0,1243	0,1491	0,1740	0,1988	0,2237	0,2485
MOD04	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0324	0,0649	0,0973	0,1297	0,1622	0,1946	0,2270	0,2594	0,2919	0,3244
MOD07	Comercial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0366	0,0731	0,1097	0,1463	0,1829	0,2194	0,2560	0,2926	0,3291	0,3657
MOD08	Autorial	ZrO2 - 3%Y2O3	0,0364	0,0728	0,1092	0,1456	0,1820	0,2184	0,2548	0,2912	0,3276	0,3641
MOD09	Comercial	Ce-TZP/Al2O3	0,0345	0,0690	0,1036	0,1381	0,1727	0,2072	0,2417	0,2763	0,3108	0,3452
MOD10	Autorial	Ce-TZP/Al2O3	0,0361	0,0722	0,1083	0,1444	0,1805	0,2166	0,2527	0,2888	0,3249	0,3610

ANEXO VI: Distribuição de tensões para terceiro molar (Até 50 anos)

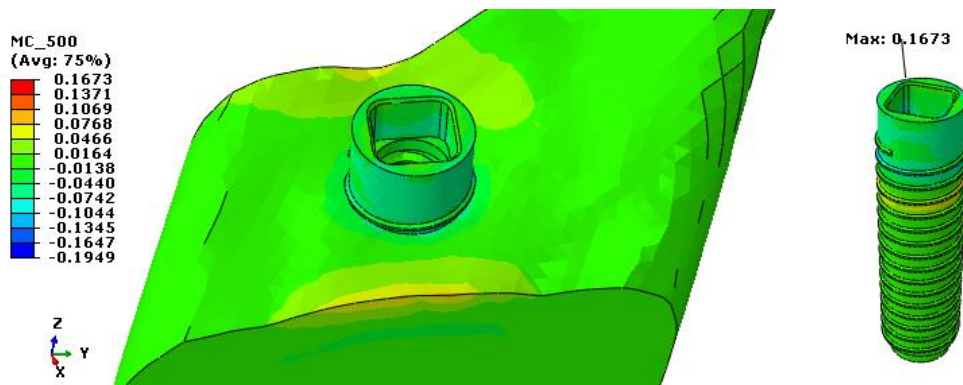
(a) MOD01: Critério de Mohr Coulomb para implante comercial de 3Y-TZP com 500N/90°



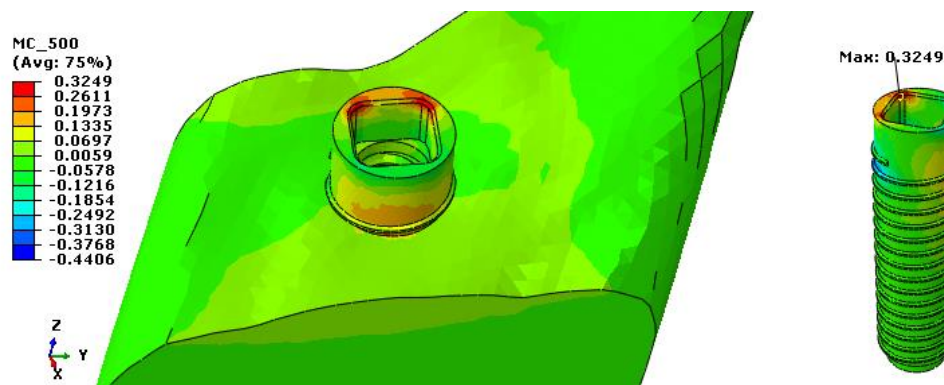
(b) MOD01: Critério de Mohr Coulomb para implante comercial de 3Y-TZP com 500N/45°



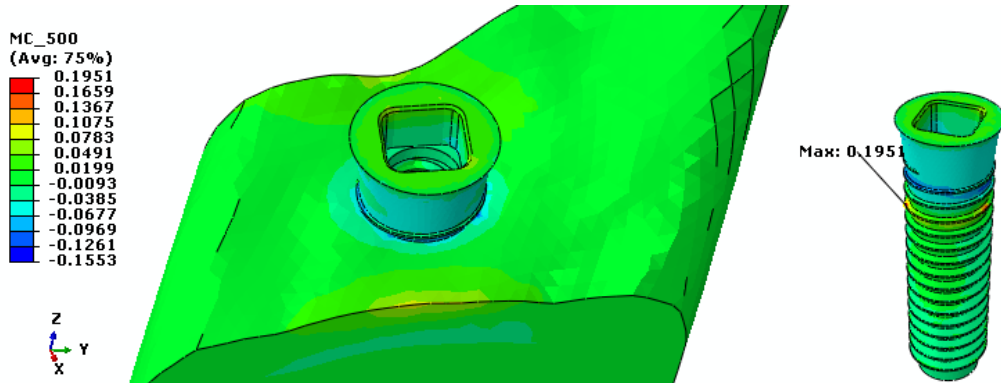
(c) MOD02: Critério de Mohr Coulomb para implante autoral de 3Y-TZP com 500N/90°



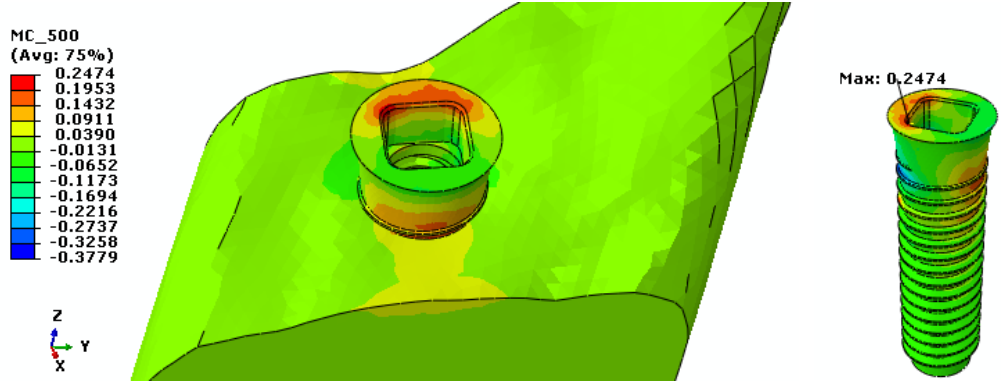
(d) MOD02: Critério de Mohr Coulomb para implante autoral de 3Y-TZP com 500N/45°



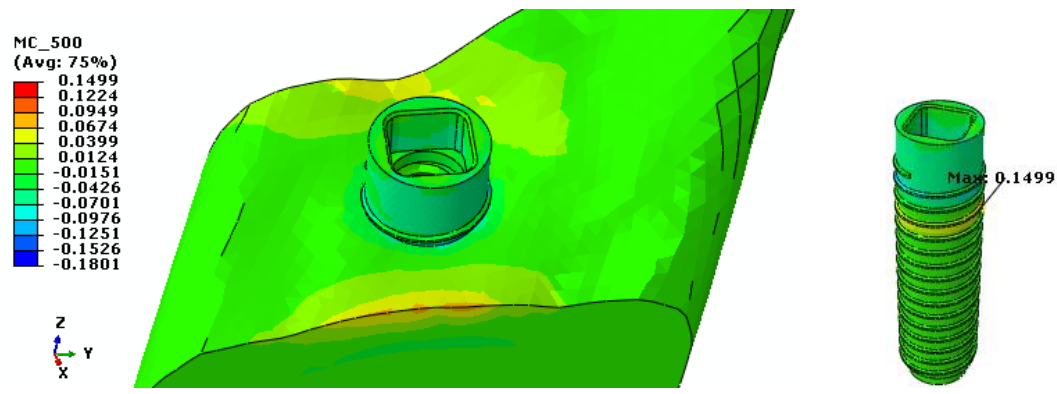
(e) MOD03: Critério de Mohr Coulomb para implante comercial de Ce-TZP/Al₂O₃ com 500N/90°



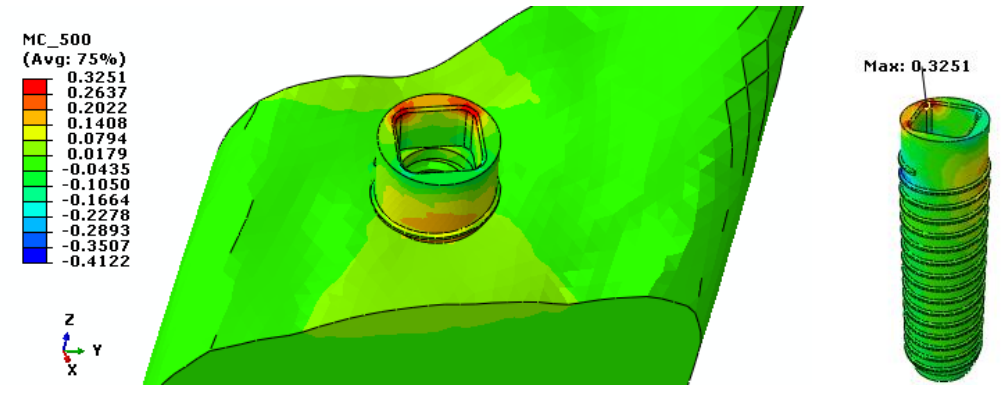
(f) MOD03: Critério de Mohr Coulomb para implante comercial de Ce-TZP/Al₂O₃ com 500N/45°



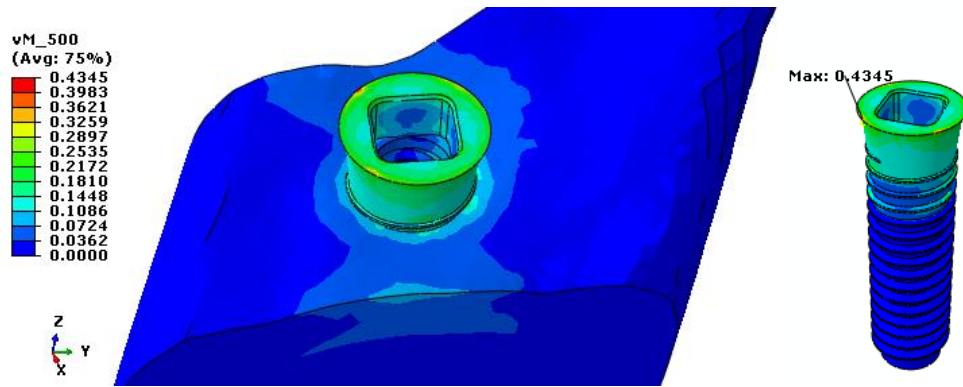
(g) MOD04: Critério de Mohr Coulomb para implante autoral de Ce-TZP/Al₂O₃ com 500N/90°



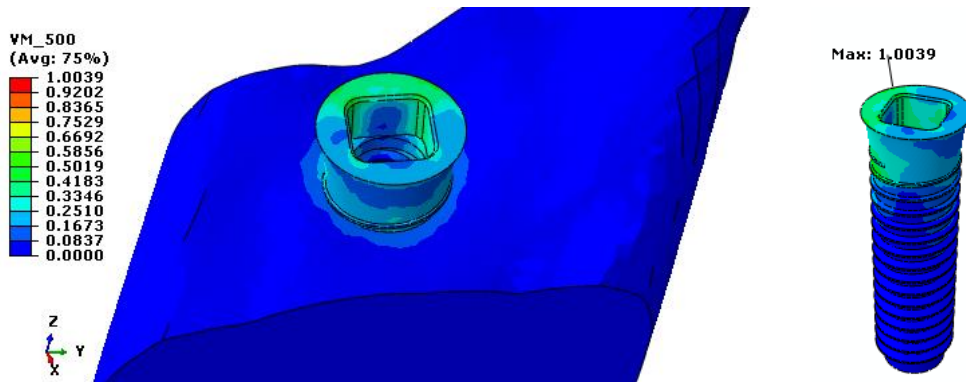
(h) MOD04: Critério de Mohr Coulomb para implante autoral de Ce-TZP/Al₂O₃ com 500N/45°



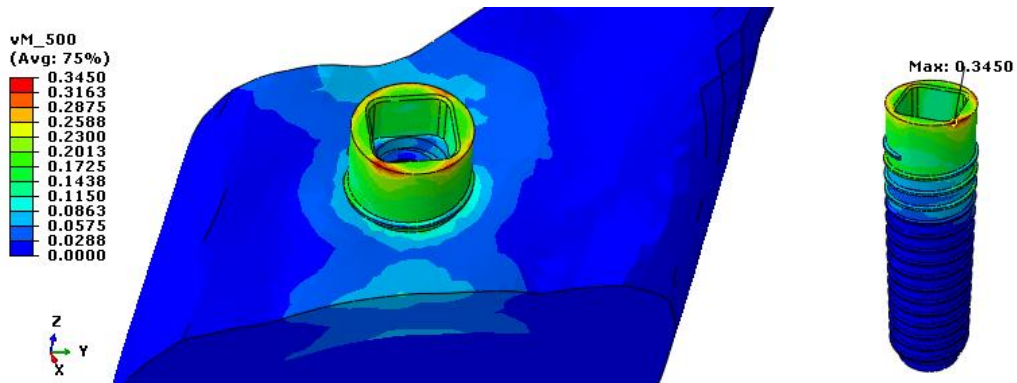
(i) MOD05: Critério de von Mises para implante comercial de titânio com 500N/90°



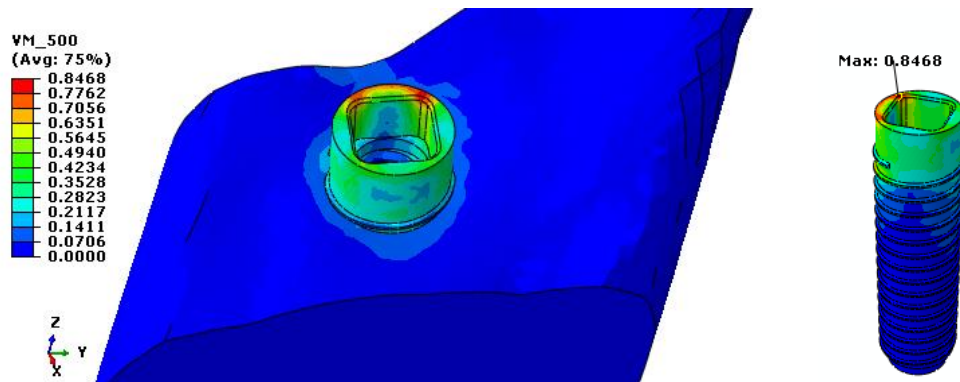
(j) MOD05: Critério de von Mises para implante comercial de titânio com 500N/45°



(k) MOD06: Critério de von Mises para implante autoral de titânio com 500N/90°

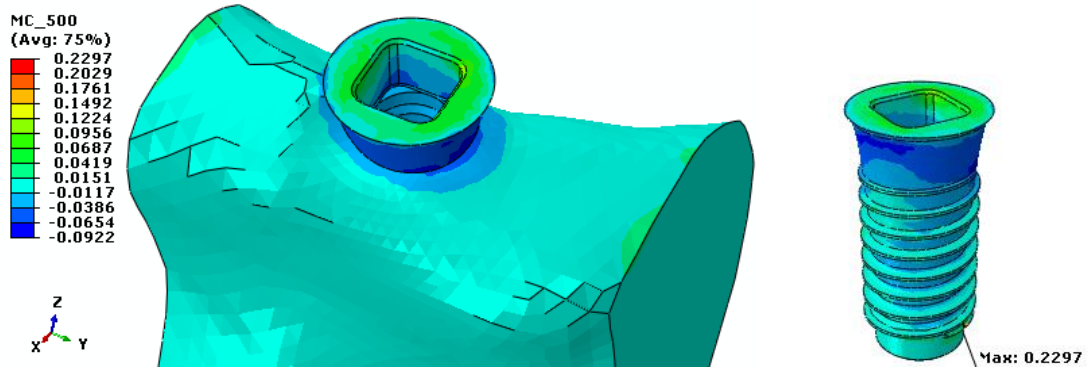


(l) MOD06: Critério de von Mises para implante autoral de titânio com 500N/45°

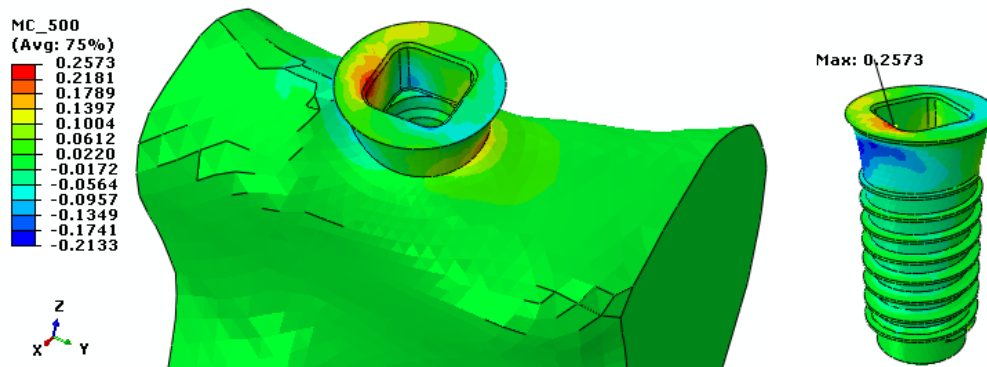


ANEXO VII: Distribuição de tensões para incisivo central (Até 50 anos)

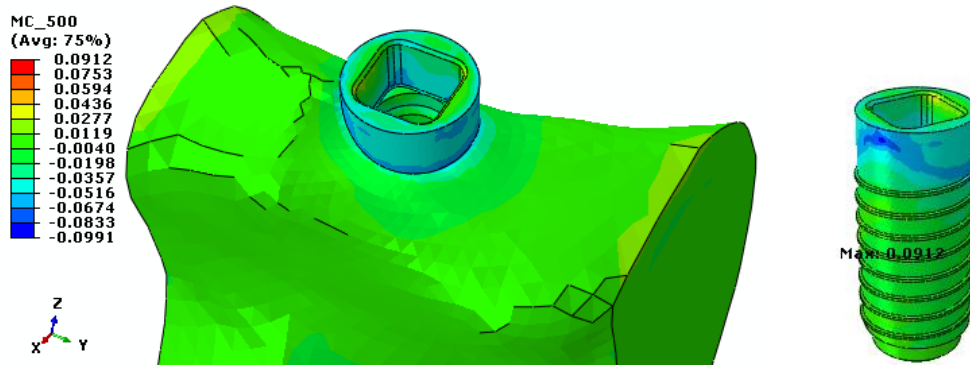
(a) MOD07: Critério de Mohr Coulomb para implante comercial de 3Y-TZP com 500N/90°



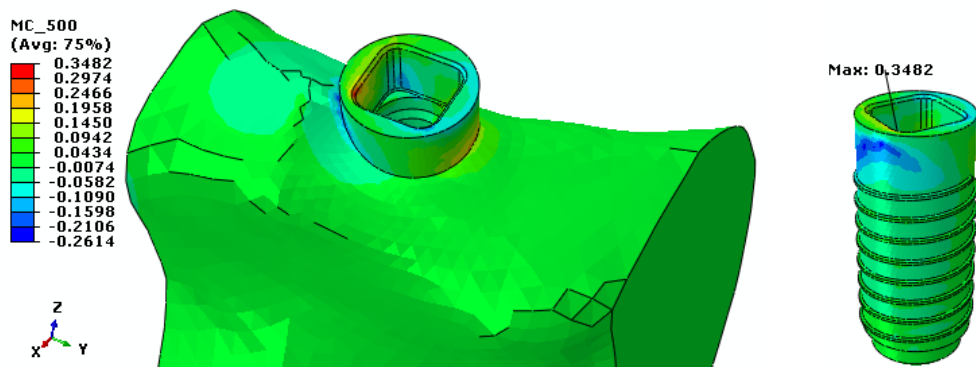
(b) MOD07: Critério de Mohr Coulomb para implante comercial de 3Y-TZP com 500N/45°



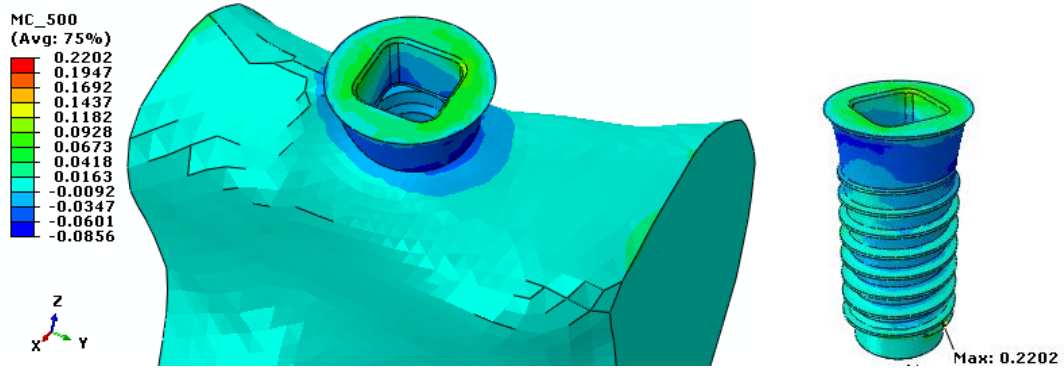
(c) MOD08: Critério de Mohr Coulomb para implante autoral de 3Y-TZP com 500N/90°



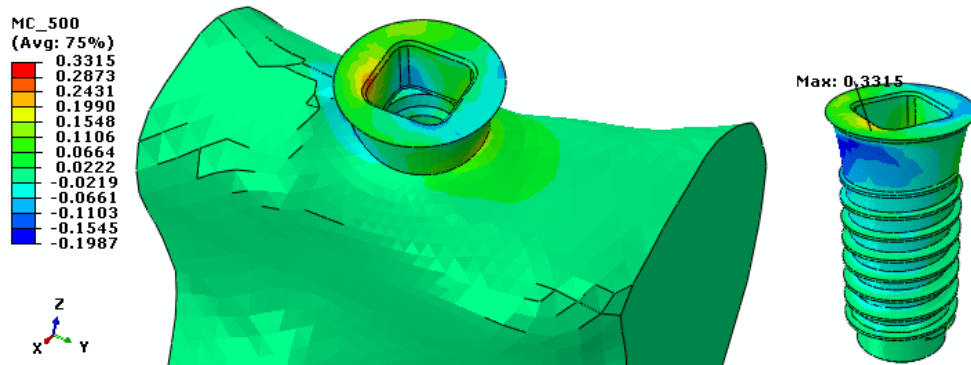
(d) MOD08: Critério de Mohr Coulomb para implante autoral de 3Y-TZP com 500N/45°



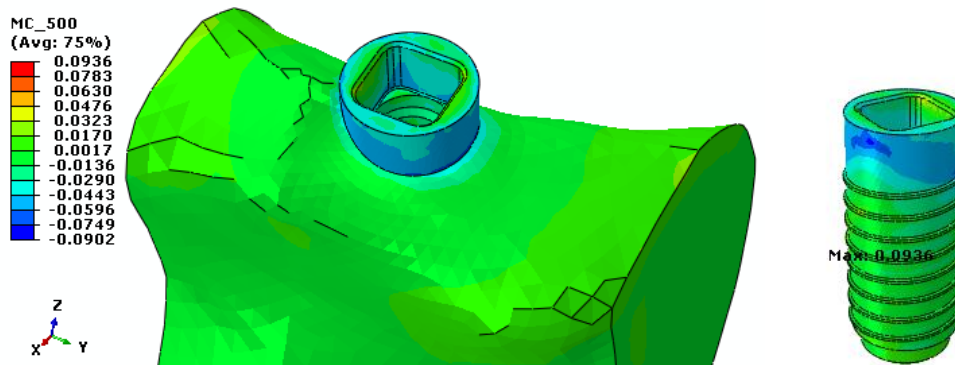
(e) MOD09: Critério de Mohr Coulomb para implante comercial de Ce-TZP/ Al_2O_3 com 500N/90°



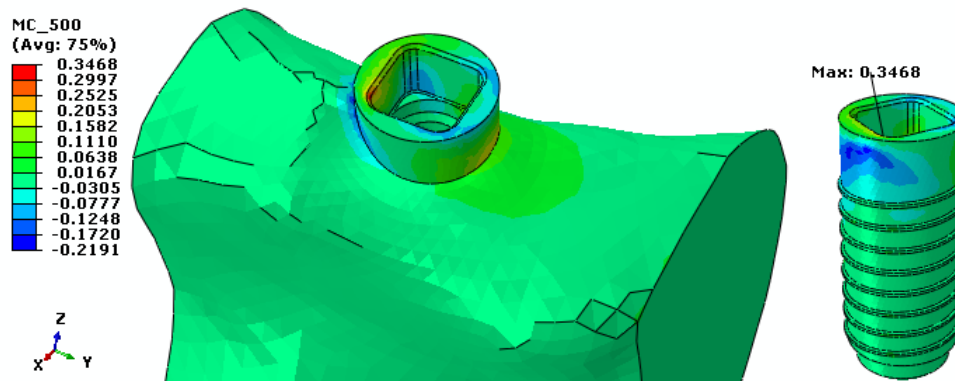
(f) MOD09: Critério de Mohr Coulomb para implante comercial de Ce-TZP/ Al_2O_3 com 500N/45°



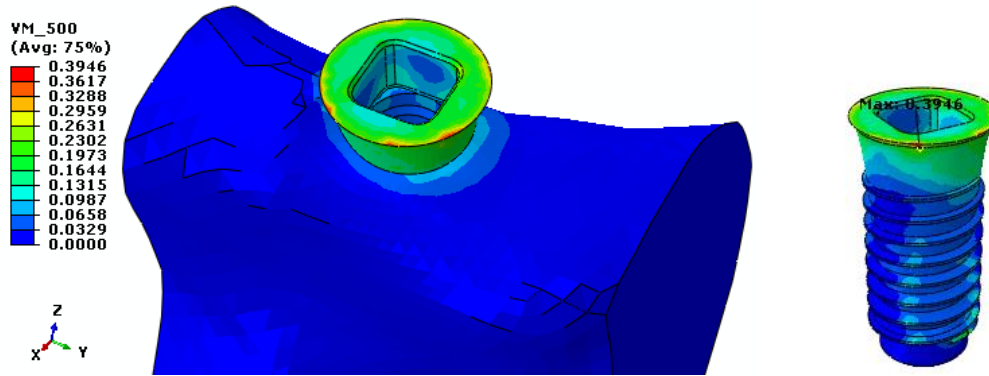
(g) MOD10: Critério de Mohr Coulomb para implante autoral de Ce-TZP/ Al_2O_3 com 500N/90°



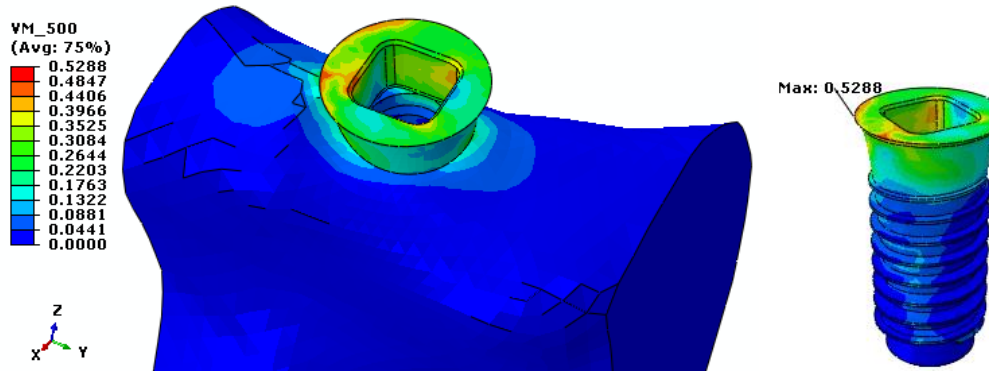
(h) MOD10: Critério de Mohr Coulomb para implante autoral de Ce-TZP/ Al_2O_3 com 500N/45°



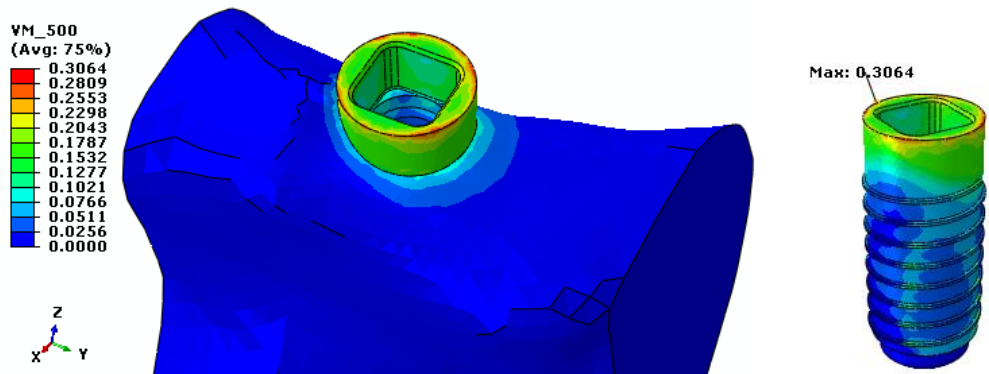
(i) MOD11: Critério de von Mises para implante comercial de titânio com 500N/90°



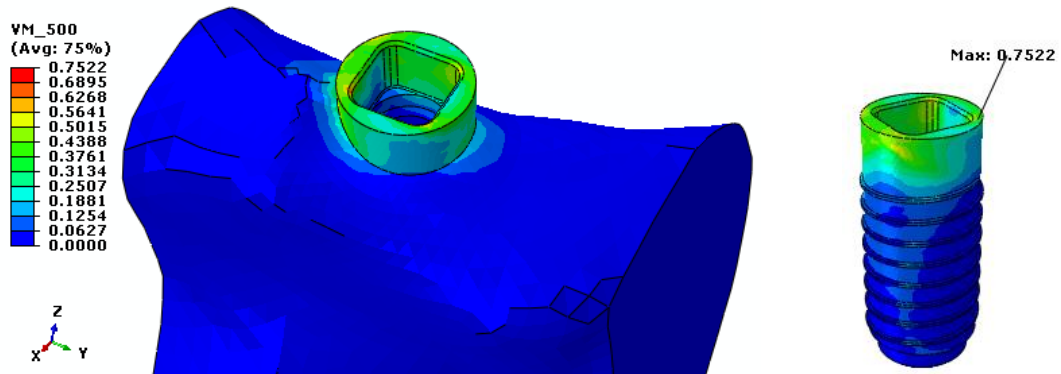
(j) MOD11: Critério de von Mises para implante comercial de titânio com 500N/45°



(k) MOD12: Critério de von Mises para implante autoral de titânio com 500N/90°

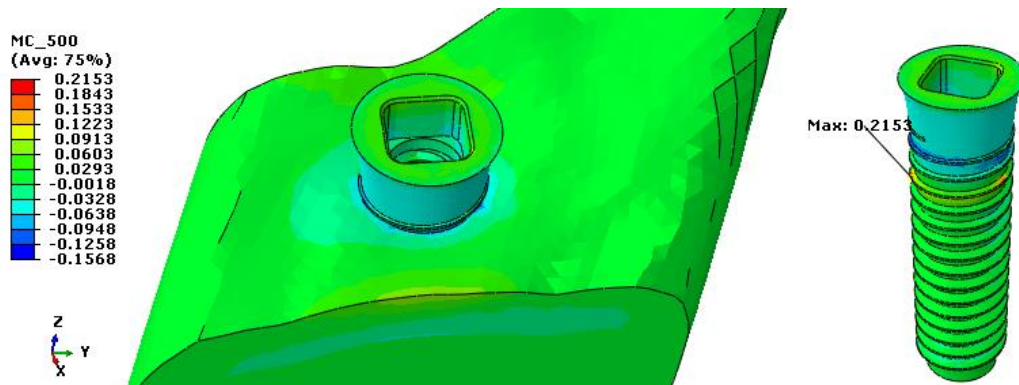


(l) MOD12: Critério de von Mises para implante autoral de titânio com 500N/45°

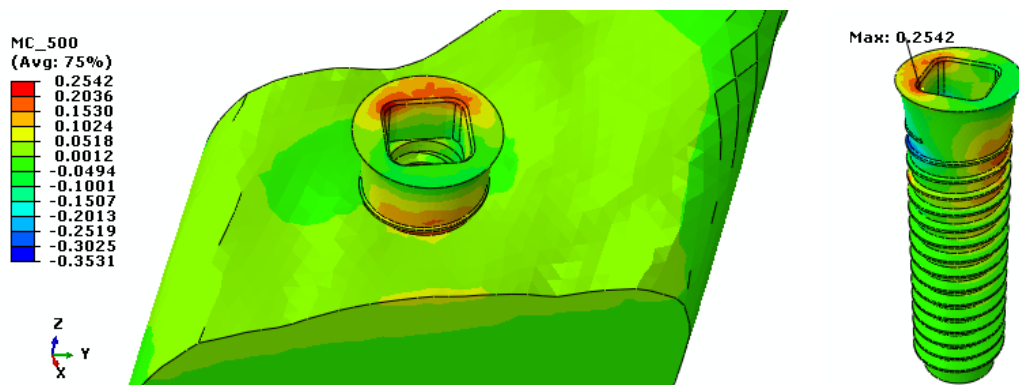


ANEXO VIII: Distribuição de tensões para terceiro molar (80 anos)

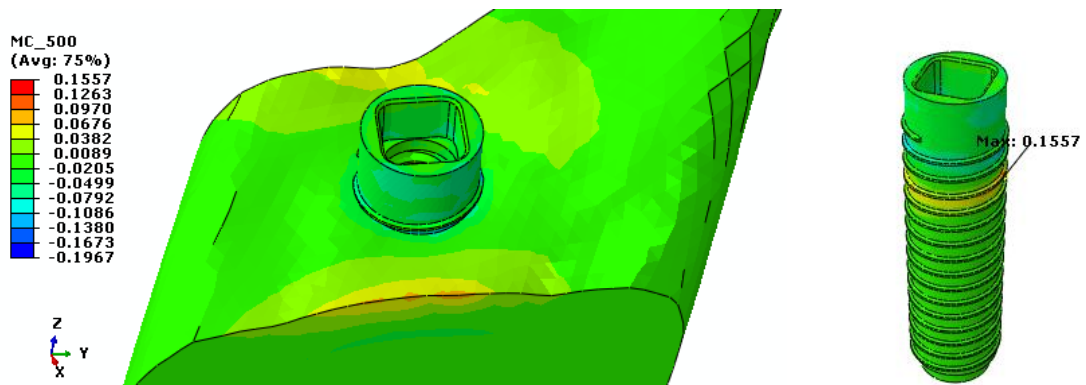
(a) MOD01: Critério de Mohr Coulomb para implante comercial de 3Y-TZP com 500N/90°



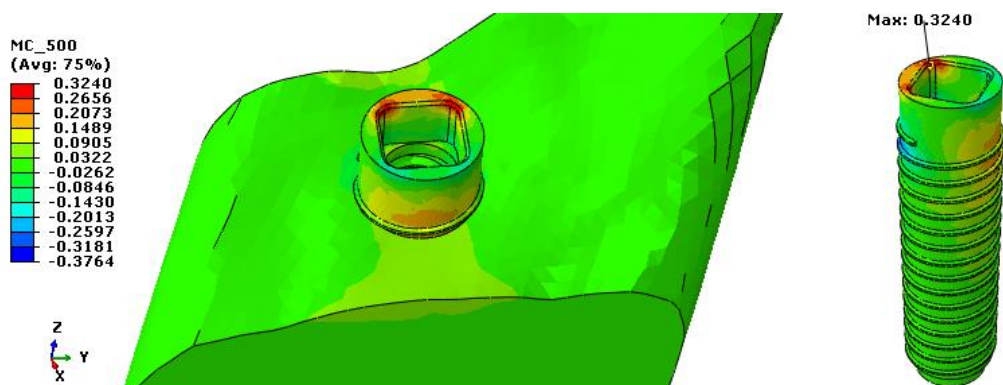
(b) MOD01: Critério de Mohr Coulomb para implante comercial de 3Y-TZP com 500N/45°



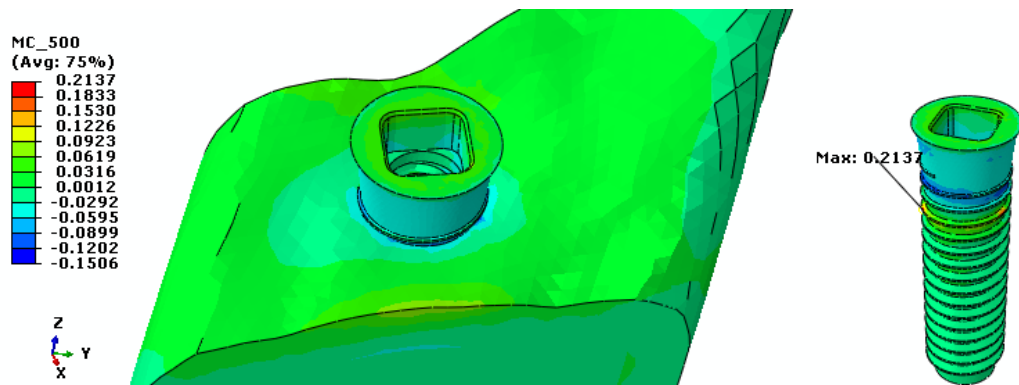
(c) MOD02: Critério de Mohr Coulomb para implante autoral de 3Y-TZP com 500N/90°



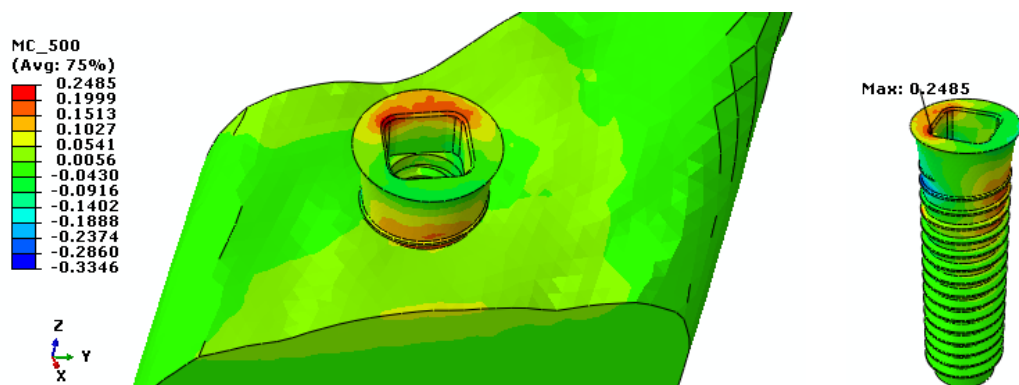
(d) MOD02: Critério de Mohr Coulomb para implante autoral de 3Y-TZP com 500N/45°



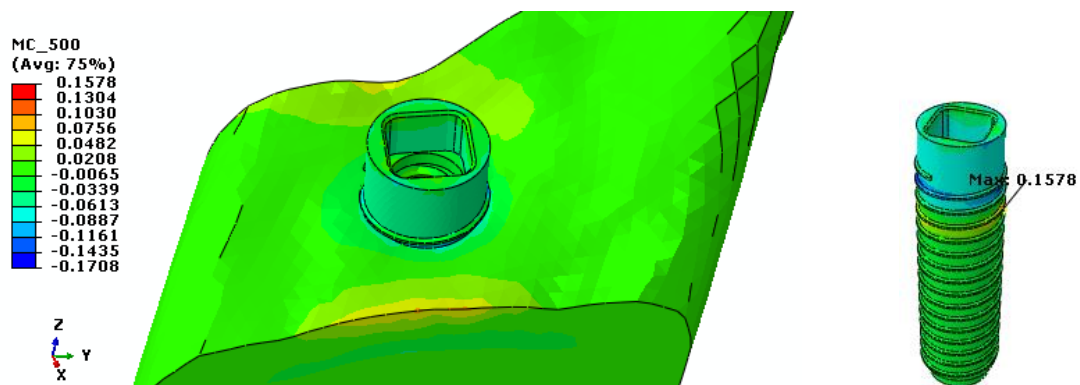
(e) MOD03: Critério de Mohr Coulomb para implante comercial de Ce-TZP/ Al_2O_3 com 500N/90°



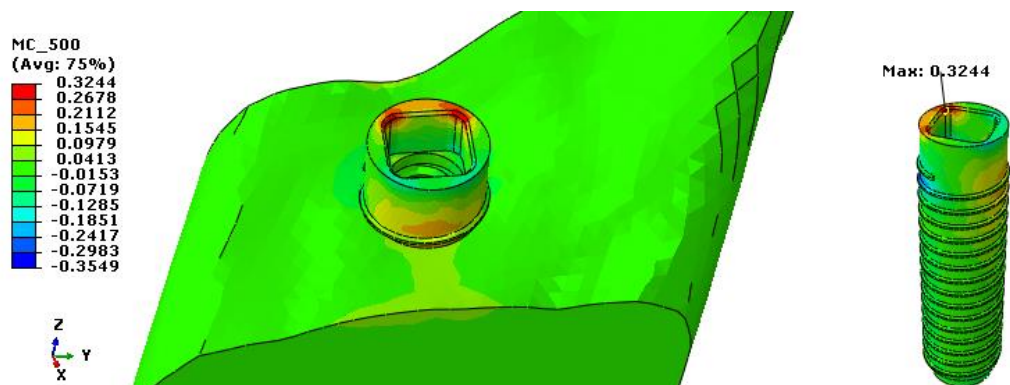
(f) MOD03: Critério de Mohr Coulomb para implante comercial de Ce-TZP/ Al_2O_3 com 500N/45°



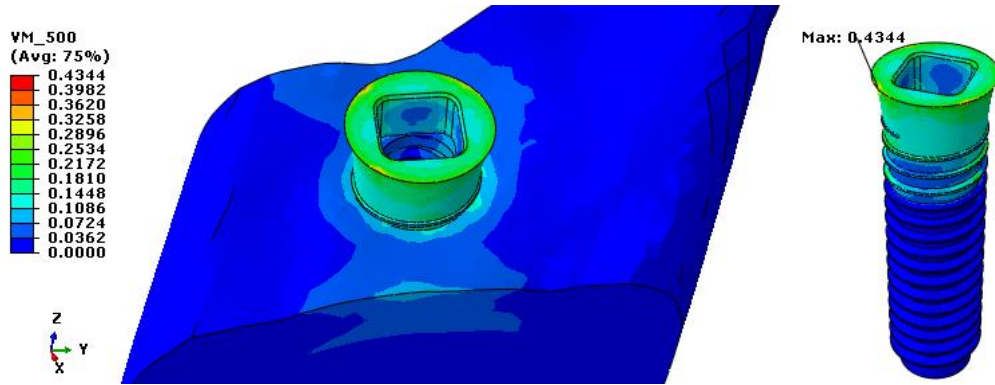
(g) MOD04: Critério de Mohr Coulomb para implante autoral de Ce-TZP/ Al_2O_3 com 500N/90°



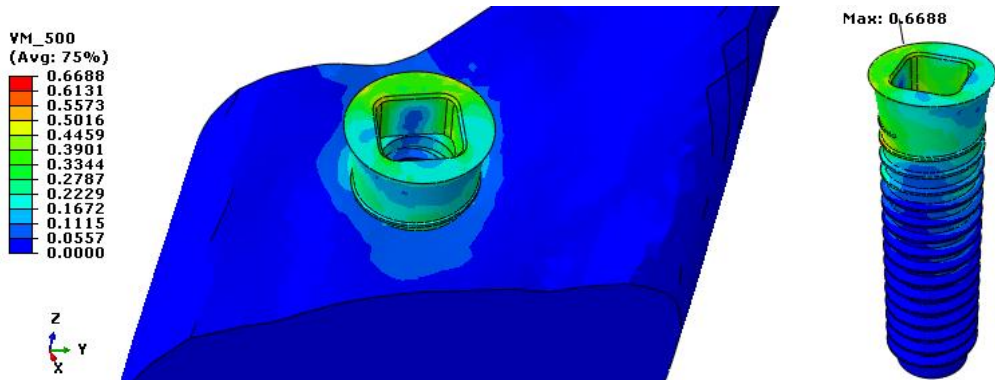
(h) MOD04: Critério de Mohr Coulomb para implante autoral de Ce-TZP/ Al_2O_3 com 500N/45°



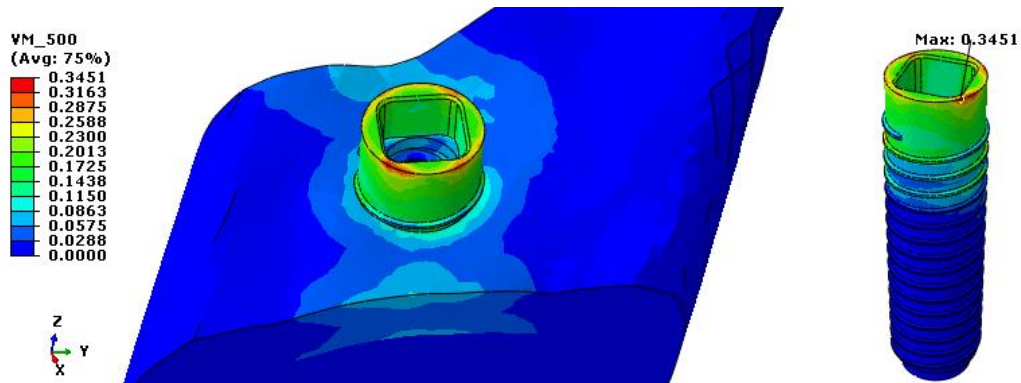
(i) MOD05: Critério de von Mises para implante comercial de titânio com 500N/90°



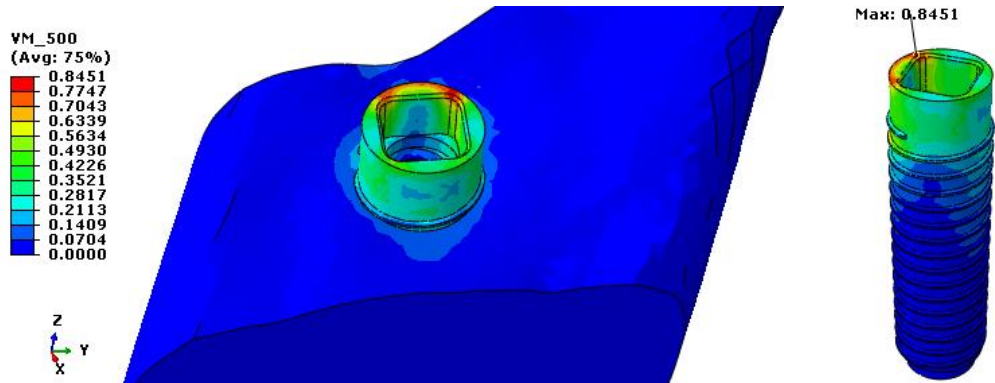
(j) MOD05: Critério de von Mises para implante comercial de titânio com 500N/45°



(k) MOD06: Critério de von Mises para implante autoral de titânio com 500N/90°

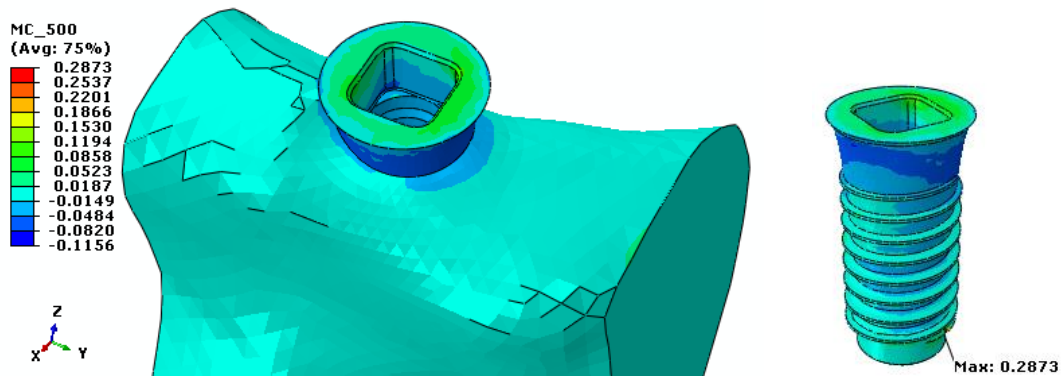


(l) MOD06: Critério de von Mises para implante autoral de titânio com 500N/45°

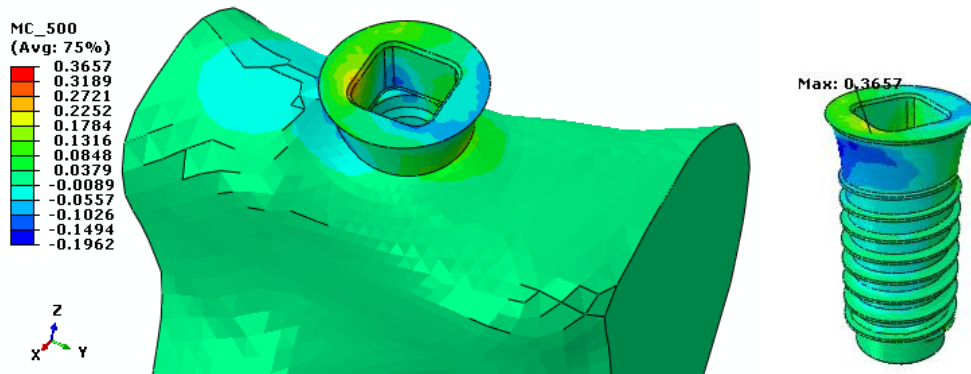


ANEXO IX: Distribuição de tensões para incisivo central (80 anos)

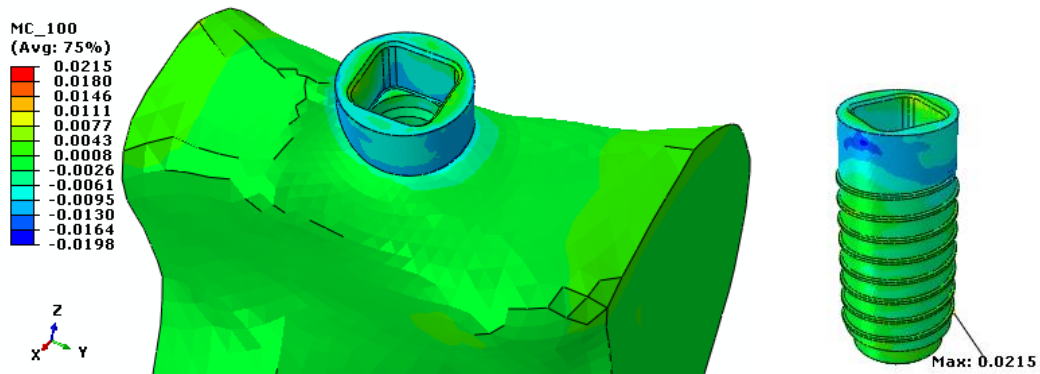
(a) MOD07: Critério de Mohr Coulomb para implante comercial de 3Y-TZP com 500N/90°



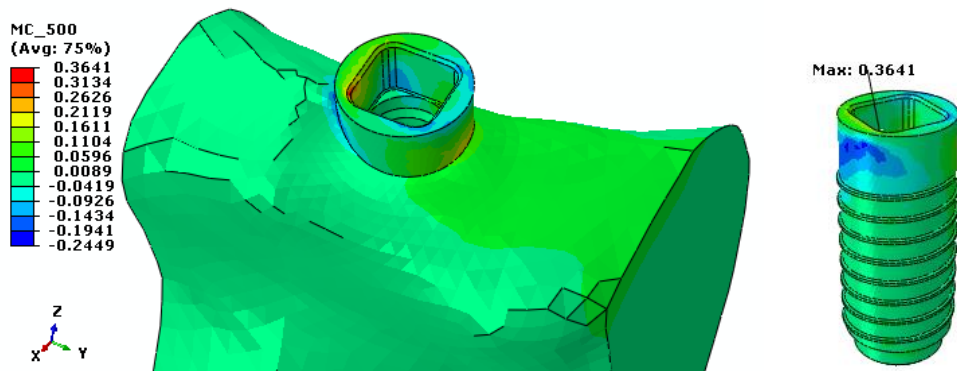
(b) MOD07: Critério de Mohr Coulomb para implante comercial de 3Y-TZP com 500N/45°



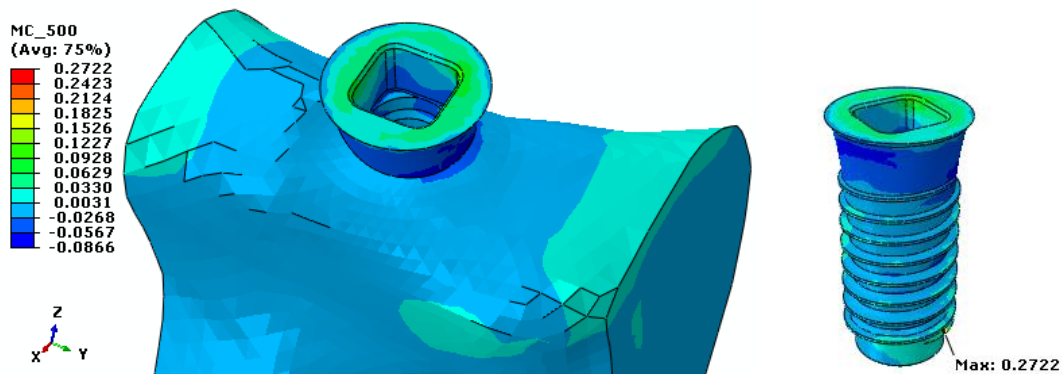
(c) MOD08: Critério de Mohr Coulomb para implante autoral de 3Y-TZP com 500N/90°



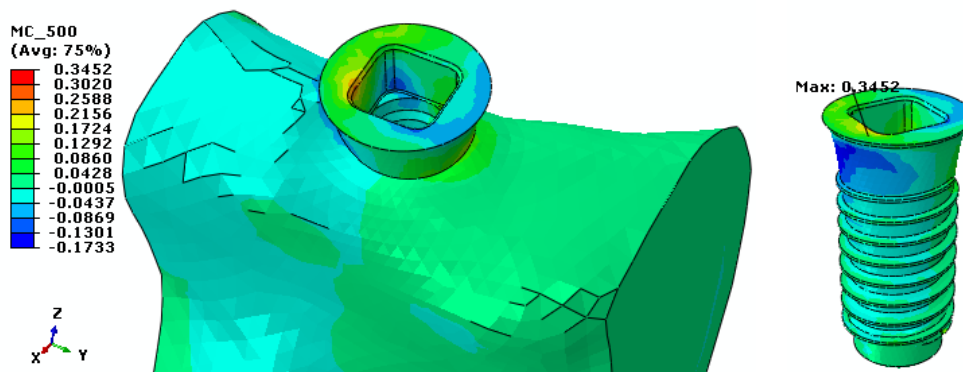
(d) MOD08: Critério de Mohr Coulomb para implante autoral de 3Y-TZP com 500N/45°



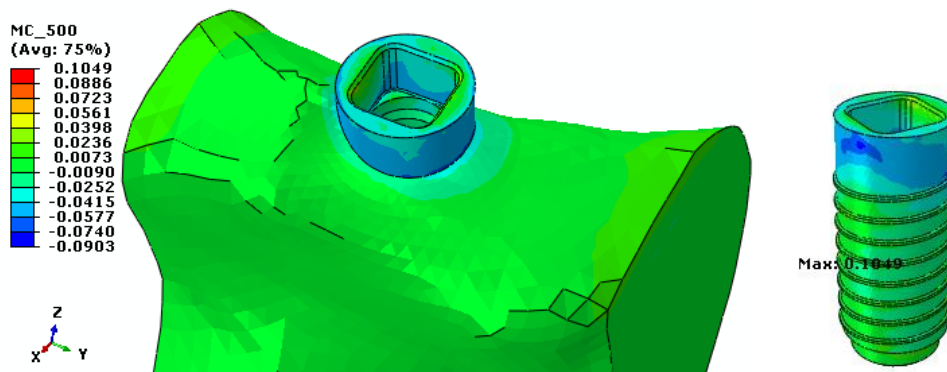
(e) MOD09: Critério de Mohr Coulomb para implante comercial de Ce-TZP/Al₂O₃ com 500N/90°



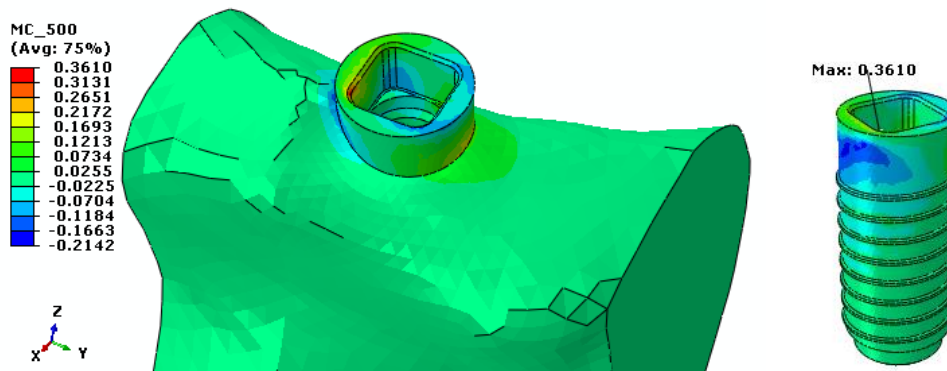
(f) MOD09: Critério de Mohr Coulomb para implante comercial de Ce-TZP/Al₂O₃ com 500N/45°



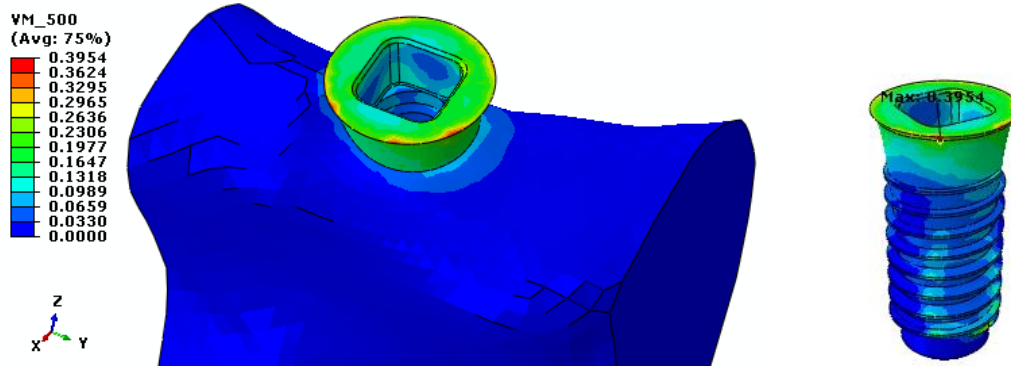
(g) MOD10: Critério de Mohr Coulomb para implante autoral de Ce-TZP/Al₂O₃ com 500N/90°



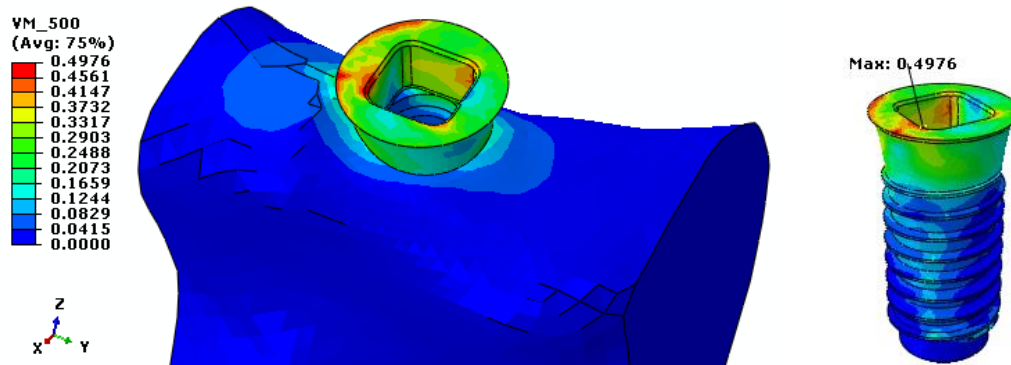
(h) MOD10: Critério de Mohr Coulomb para implante autoral de Ce-TZP/Al₂O₃ com 500N/45°



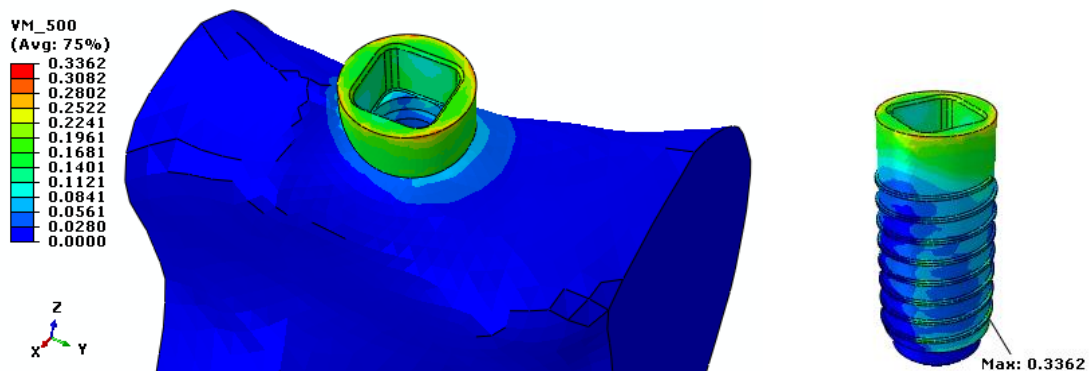
(i) MOD11: Critério de von Mises para implante comercial de titânio com 500N/90°



(j) MOD11: Critério de von Mises para implante comercial de titânio com 500N/45°



(k) MOD12: Critério de von Mises para implante autoral de titânio com 500N/90°



(l) MOD12: Critério de von Mises para implante autoral de titânio com 500N/45°

