



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**EVALUACIÓN BIOMECÁNICA MEDIANTE ANÁLISIS POR ELEMENTOS
FINITOS DE DIENTES PREMOLARES CON DIFERENTES ACCESOS
ENDODÓNTICOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

ALONSO IGNACIO AGUADO GÓMEZ

PROFESOR GUÍA:
ALEJANDRO ORTIZ BERNARDIN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
PAVEL CAPETILLO REYES
ROGER BUSTAMANTE PLAZA

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: **ALONSO IGNACIO AGUADO GÓMEZ**
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: ALEJANDRO ORTIZ BERNARDIN

EVALUACIÓN BIOMECÁNICA MEDIANTE ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DE DIENTES PREMOLARES CON DIFERENTES ACCESOS ENDODÓNTICOS

Existen bastantes estudios acerca de análisis biomecánicos dentales. Sin embargo, son pocos los estudios que utilizan dientes premolares y con accesos endodónticos y modelos anisotrópicos. Es importante realizar este estudio debido a que la remoción de estructura dentaria esta relacionada a una causa de fractura dental. En el presente trabajo de título se realizará una evaluación biomecánica mediante análisis por elementos finitos de dientes premolares con diferentes accesos endodónticos.

El objetivo principal de este estudio es comparar el comportamiento biomecánico de dientes premolares para diferentes accesos endodónticos con el fin de orientar a los odontólogos a realizar los mejores tratamientos de conductos posibles. Para lograr este objetivo se plantean también objetivos específicos tales como, modelar los dientes mediante el software *FeBio* utilizando geometrías obtenidas a través de micro-ct por estudiantes de doctorado de la Universidad de Chile, simular el comportamiento biomecánico para los diferentes accesos endodónticos, dos condiciones de carga, modelos isotrópicos y anisotrópicos, y analizar y comparar los resultados obtenidos.

Para cumplir los objetivos se utilizan las geometrías obtenidas a través de las micro-ct, estas son cargadas al software *Meshmixer*, donde son arregladas y mejoradas, y se les genera el ligamento periodontal y el hueso trabecular y cortical. A su vez, con estas geometrías se generan los diferentes accesos endodónticos en el software *Fusion 360*, para finalmente utilizar el software *FeBio* para modelar los dientes bajo carga oclusal normal y bruxismo.

Los resultados obtenidos muestran que el acceso endodóntico preferencial debiese ser el orientado a reducir la remoción de tejido dental, pero se debe tener en consideración las complicaciones y dificultades que existen al realizar este tipo de accesos por lo que no siempre podrá ser una alternativa viable.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Alcances	2
2. Antecedentes y discusión bibliográfica	3
2.1. Estructura dental y propiedades mecánicas.	3
2.1.1. Esmalte	4
2.1.2. Dentina	6
2.1.3. Hueso trabecular, ligamento periodontal, pulpa dental.	7
2.1.4. Diente premolar	8
2.2. Endodoncia	9
2.2.1. Accesos endodónticos	10
2.3. Fractura dental	13
2.3.1. Biomecánica de dientes fracturados	13
2.3.2. Biomecánica de fracturas de raíz vertical	14
2.3.3. Fractura en esmalte	14
2.3.4. Caracterización de fracturas	17
2.4. Estudios previos	18
2.4.1. Biomechanical Properties of First Maxillary Molars with Different Endodontic Cavities: A Finite Element Analysis [11]	19
2.4.2. Stress distribution in a premolar 3D model with anisotropic and isotropic enamel [12]	22
2.4.3. Tooth fracture risk analysis based on a new finite element dental structure models using micro-CT data [14]	26
2.5. Estudio de validación	29
3. Metodología	32
3.1. Carga de geometrías a través de las microtomografías computarizadas	33
3.2. Arreglo de las geometrías	36
3.3. Mallado en FeBio	40
3.4. Modelamiento del hueso trabecular, hueso cortical y ligamento periodontal	43
3.5. Condiciones de borde	46
3.6. Contactos	46
3.7. Aplicar propiedades mecánicas y validar el modelo	46

3.8.	Modelar accesos endodónticos	47
3.9.	Modelar materiales de relleno y restauración.	54
3.10.	Carga y modelo de nuevas geometrías a FeBio	55
3.11.	Agregar propiedades mecánicas	56
3.12.	Simular para todos los modelos, un caso de oclusión normal y uno de bruxismo.	56
3.13.	Resumen de nodos y elementos en el mallado y propiedades mecánicas utilizadas	59
3.13.1.	Simular para distintos materiales de restauración	59
3.13.2.	Simular para distintas posiciones de acceso endodóntico tradicional	60
4.	Análisis y resultados	62
4.0.1.	Validación	62
4.0.2.	Planos de corte utilizados	65
4.1.	Oclusión normal 150 N, modelo isotrópico	66
4.1.1.	Diente natural	66
4.1.2.	Diente con acceso endodóntico ultra conservativo	68
4.1.3.	Diente con acceso endodóntico conservativo	70
4.1.4.	Diente con acceso endodóntico tradicional	72
4.1.5.	Diente con acceso endodóntico extendido	74
4.2.	Oclusión normal 150 N, modelo ortotrópico	76
4.2.1.	Diente natural	76
4.2.2.	Diente con acceso endodóntico ultra conservativo	78
4.2.3.	Diente con acceso endodóntico conservativo	80
4.2.4.	Diente con acceso endodóntico tradicional	82
4.2.5.	Diente con acceso endodóntico extendido	84
4.3.	Brúxismo 500 N, modelo isotrópico	86
4.3.1.	Diente natural	86
4.3.2.	Diente con acceso endodóntico ultra conservativo	88
4.3.3.	Diente con acceso endodóntico conservativo	90
4.3.4.	Diente con acceso endodóntico tradicional	92
4.3.5.	Diente con acceso endodóntico extendido	94
4.4.	Brúxismo 500 N, modelo ortotrópico	96
4.4.1.	Diente natural	96
4.4.2.	Diente con acceso endodóntico ultra conservativo	98
4.4.3.	Diente con acceso endodóntico conservativo	100
4.4.4.	Diente con acceso endodóntico tradicional	102
4.4.5.	Diente con acceso endodóntico extendido	104
4.5.	Oclusión normal 150 N en diente con acceso endodóntico tradicional con diferentes materiales de restauración, modelo ortotrópico	106
4.5.1.	Restauración con resina fluida y resina compuesta.	106
4.5.2.	Restauración solo con vidrio ionomero y resina compuesta.	107
4.5.3.	Restauración solo con vidrio ionomero.	108
4.6.	Oclusión normal 150 N en diente con acceso endodóntico tradicional ubicado en diferentes posiciones, modelo ortotrópico	109
4.7.	Análisis	113
5.	Conclusiones	123
	Bibliografía	125

Índice de Tablas

2.1.	Resistencia media a la fractura, y patrones de fractura para cada uno de los grupos.	18
2.2.	Propiedades mecánicas isotrópicas elásticas de los materiales utilizados.	20
2.3.	Máximo esfuerzo Von Mises [MPa]	22
2.4.	Propiedades mecánicas isotrópicas elásticas de los materiales utilizados.	23
2.5.	Máximo estrés principal obtenido en los modelos isotrópicos e anisotrópicos.	24
2.6.	Propiedades isotrópicas elásticas de los materiales	30
3.1.	Propiedades elásticas de materiales isotrópicos.E: Módulo de elasticidad. ν : Coeficiente de poisson	47
3.2.	Propiedades elásticas de materiales isotrópicos.	56
3.3.	Número de nodos y elementos para el esmalte y la dentina en los diferentes modelos.	59
3.4.	Propiedades elásticas de materiales isotrópicos.	59
4.1.	Esfuerzo máximo principal para los diferentes modelos.	113
4.2.	Esfuerzo principal máximo modelo isotrópico	113
4.3.	Esfuerzo principal máximo modelo ortotrópico	114
4.4.	Esfuerzo principal máximo modelo isotrópico vs ortotrópico	114
4.5.	Tabla esfuerzo máximo principal en comparación con el volumen del tejido dental removido. Modelo isotrópico.	117
4.6.	Tabla esfuerzo máximo principal en comparación con el volumen del tejido dental removido. Modelo ortotrópico.	117

Índice de Ilustraciones

2.1.	Estructura dental	3
2.2.	Microestructura esmalte	5
2.3.	Mapa módulo de elasticidad [<i>GPa</i>]. Figura tomada de [3]	6
2.4.	Figura esquemática de un diente premolar y la estructura de su dentina. (a) Sección longitudinal del diente premolar. (b) Sección transversal de la dentina. (c) Elemento volumétrico representativo de la dentina. A- dentina intertubular. B- dentina pertubular. Figura tomada de [4]	7
2.5.	Pulpa Dental	8
2.6.	Posición dientes premolares	9
2.7.	Morfología diente premolar. Extraída de [5]	9
2.8.	Procedimiento endodóntico	10
2.9.	Accesos endodónticos. (a) Tradicional (TEC). (b) Conservativo (CEC). (c) Ultra conservativo. Figura extraída y adaptada de [9]	12
2.10.	Comparación accesos endodónticos. En negro acceso endodóntico tradicional, en verde conservativo y en rojo ultra conservativo. Figura extraída y adaptada de [10]	12
2.11.	La sección transversal de los prismas de esmalte muestra una estructura de ojo de la cerradura (azul). Figura extraída de [17]	15
2.12.	Los prismas en forma de ojo de cerradura se entrelazan cada vez más a medida que los prismas se acercan a la unión amelo dentinaria. Figura extraída de [17]	16
2.13.	Patrones de fractura. Tipo I, fracturas que involucran pequeñas porciones coronales de los dientes. Tipo II, fracturas que involucran porciones coronales de los dientes además de fallas de cohesión con la resina compuesta. Tipo III, fracturas que involucran porciones coronales de los dientes con afectación periodontal además de fallas de cohesión con la resina compuesta. Tipo IV, fractura vertical coronal/radicular. Figura extraída de [18]	17
2.14.	Distribución de esfuerzo de Von Mises para los cinco modelos. Figura extraída de [18]	18
2.15.	Accesos y cargas aplicadas. (A1 y A2) Acceso endodóntico conservativo. (A3) Acceso endodóntico tradicional. (A4) Acceso endodóntico extendido. (B1) Una fuerza vertical de 250 N aplicada en fosa central. (B2) Una fuerza total de 800N aplicada en 5 puntos. (B3) Una fuerza de 225 N aplicada en plano lingual aplicada en la cúspide lingual con un ángulo de 45°	19
2.16.	Distribución de esfuerzos de Von Mises [<i>MPa</i>] en la cara oclusal. (1-4) Diente intacto, acceso endodóntico conservativo, tradicional y extendido respectivamente. (A) Una fuerza vertical de 250 N aplicada en fosa central. (B) Una fuerza total de 800N aplicada en 5 puntos. (C) Una fuerza de 225 N aplicada en plano lingual aplicada en la cúspide lingual con un ángulo de 45°	20

2.17.	Distribución de esfuerzos de Von Mises [MPa] en la zona apical y pericervical aplicando una fuerza total de 800N aplicada en 5 puntos. (1-4) Diente intacto, acceso endodóntico conservativo, tradicional y extendido respectivamente. (A) Zona apical. (B) Zona pericervical. (C) Plano de corte al nivel de la unión cemento-esmalte.	21
2.18.	Orientación de las coordenadas locales para el modelo anisotrópico del esmalte.	23
2.19.	(a) Carga 1: Carga de 90 N dividida en 3 zonas. (b) Carga 2: Carga de 90 N en solo una cúspide. (c) Carga 3: Carga oblicua de 45 N en un ángulo de 45° aplicada en la cúspide vestibular. (d) Carga 4: Carga oblicua de 45 N en un ángulo de 45° aplicada en la cúspide palatal. (e) Puntos de contacto, A y B. B: Vestibular P:Palatal.	24
2.20.	Máximo estrés principal obtenido en los modelos isotrópicos e anisotrópicos. Modelo isotrópico a la izquierda, modelo anisotrópico a la derecha. (a) Carga 1, vista mesial. (b) Carga 1, vista distal. (c) Carga 2, vista mesial. (d) Carga 2 vista distal.	25
2.21.	Distribución de propiedades del material en un plano. (a) Densidad [gr/cm^3]. (b) Módulo de Young [MPa]. (c) Esfuerzo de fluencia [MPa].	26
2.22.	Distribución de esfuerzos de Von Mises a través de tres raíces con 0.04 táper bajo condiciones de carga normal. (a) Posiciones de los tres planos. (b) Distribución en el primer plano. (c) Distribución en el segundo plano. (c) Distribución en el tercer plano.	27
2.23.	Distribución de esfuerzos de Von Mises a través de tres raíces para tres condiciones de cargas distintas. (a) Carga normal. (b) Carga oblicua 45°. (c) Torsional.	28
2.24.	Distribución de esfuerzos de Von Mises con carga oblicua a través de tres raíces con tres tápers distintos. (a) Sin ensanchamiento. (b) Táper 0.04. (c) Táper 0.10.	29
2.25.	Esfuerzo máximo principal [MPa].	31
3.1.	Metodología	32
3.2.	Geometrías del esmalte obtenidas de las micro-ct. (a) Vista isométrica mesial-oclusal. (b) Vista isométrica mesial-oclusal transparente. (c) Vista inferior. . .	33
3.3.	Geometrías de la dentina obtenidas de las micro-ct.(a) Vista isométrica mesial-oclusal. (b) Vista isométrica mesial-oclusal transparente.	34
3.4.	Geometrías de la pulpa obtenidas de las micro-ct. (a) Vista isométrica. (b) Vista isométrica transparente.	35
3.5.	Pulpa modificada de un solo conducto	36
3.6.	Esmalte modificado. (a) Vista isométrica mesial-oclusal. (b) Vista isométrica mesial-oclusal transparente. (c) Vista isométrica distal-oclusal. (d) Vista inferior	37
3.7.	Dentina modificada. (a) Vista isométrica mesial-oclusal. (b) Vista isométrica mesial-oclusal transparente. (c) Vista isométrica distal-oclusal.	38
3.8.	Diente modificado. (a) Vista isométrica mesial-oclusal. (b) Vista isométrica distal-oclusal.	39
3.9.	Mallado del esmalte. (a) Vista isométrica mesial-oclusal. (b) Vista isométrica distal-oclusal. (c) Vista inferior. (d) Detalle cúspide interior.	40
3.10.	Mallado de la dentina. (a) Vista isométrica mesial-oclusal. (b) Vista isométrica distal-oclusal. (c) Vista inferior. (d) Detalle cúspide interior.	41
3.11.	Mallado de la pulpa	42
3.12.	(a) Hueso cortical. (b) Hueso trabecular.	43
3.13.	Vista isométrica diente y huesos.	44

3.14.	Ligamento periodontal	44
3.15.	Malla hueso cortical	45
3.16.	Malla hueso trabecular	45
3.17.	Malla ligamento periodontal	46
3.18.	Posición carga de 100N. Entre la fosa mesio-distal entre las dos cúspides.	47
3.19.	Acceso endodóntico tradicional (TEC). (a) Vista desde cámara pulpar. (b) Vista desde el esmalte.	48
3.20.	Acceso endodóntico conservativo (CEC). (a) Vista desde cámara pulpar. (b) Vista desde el esmalte.	49
3.21.	Acceso endodóntico ultra conservativo/ Ninja (UCEC). (a) Vista desde cámara pulpar. (b) Vista desde el esmalte.	50
3.22.	Acceso endodóntico extendido (EEC). (a) Vista desde cámara pulpar. (b) Vista desde el esmalte.	51
3.23.	Esmalte y dentina con acceso endodóntico tradicional. (a) Esmalte. (b) Dentina	52
3.24.	Esmalte y dentina con acceso endodóntico conservativo. (a) Esmalte. (b) Dentina	52
3.25.	Esmalte y dentina con acceso endodóntico ultra conservativo. (a) Esmalte. (b) Dentina	53
3.26.	Esmalte y dentina con acceso endodóntico extendido. (a) Esmalte. (b) Dentina	53
3.27.	Materiales de sellado y restauración en (a) TEC, (b) CEC, (c) UCEC, (d) EEC. En azul la gutapercha, en morado el material compuesto fluido y en verde el material compuesto.	54
3.28.	Mallado para los diferentes accesos. (a) TEC. (b) CEC. (c) UCEC. (d) EEC .	55
3.29.	Zona de contacto. Figura extraída de [6]	57
3.30.	Zona de aplicación de cargas.(a) NT. (b) TEC. (c) CEC. (d) UCEC. (e) EEC .	58
3.31.	Nuevos accesos endodónticos tradicionales.	60
3.32.	Nuevas zonas de carga.	61
4.1.	Resultados estudio de validación. (a) Vista oclusal. (b) Vista mesial. (c) Vista distal	63
4.2.	Esfuerzo máximo principal [MPa] modelo de validación.	64
4.3.	Vista oclusal de plano de corte esfuerzos internos entre cúspides.	65
4.4.	Vista oclusal de plano de corte esfuerzos internos entre cúspides.	65
4.5.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente natural bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.	66
4.6.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente natural bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.	67
4.7.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico ultra conservativo bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.	68
4.8.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico ultra conservativo bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.	69
4.9.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico conservativo bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.	70

4.10.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico conservativo bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.	71
4.11.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico tradicional bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.	72
4.12.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico tradicional bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.	73
4.13.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico extendido bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.	74
4.14.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico extendido bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.	75
4.15.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente natural bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.	76
4.16.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente natural bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.	77
4.17.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico ultra conservativo bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.	78
4.18.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico ultra conservativo bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.	79
4.19.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico conservativo bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.	80
4.20.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico conservativo bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.	81
4.21.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico tradicional bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.	82
4.22.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico tradicional bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.	83
4.23.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico extendido bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.	84
4.24.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico extendido bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.	85

4.25.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente natural bajo cargas de bruxismo. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.	86
4.26.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente natural bajo cargas de bruxismo. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.	87
4.27.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico ultra conservativo bajo cargas de bruxismo. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.	88
4.28.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico ultra conservativo bajo cargas de bruxismo. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.	89
4.29.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico conservativo bajo cargas de bruxismo. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.	90
4.30.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico conservativo bajo cargas de bruxismo. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.	91
4.31.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico tradicional bajo cargas de bruxismo. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.	92
4.32.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico tradicional bajo cargas de bruxismo. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.	93
4.33.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico extendido bajo cargas de bruxismo. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.	94
4.34.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico extendido bajo cargas de bruxismo. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.	95
4.35.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente natural bajo cargas de bruxismo. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.	96
4.36.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente natural bajo cargas de bruxismo. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.	97
4.37.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico ultra conservativo bajo cargas de bruxismo. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.	98
4.38.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico ultra conservativo bajo cargas de bruxismo. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.	99
4.39.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico conservativo bajo cargas de bruxismo. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.	100

4.40.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico conservativo bajo cargas de bruxismo. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.	101
4.41.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico tradicional bajo cargas de bruxismo. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.	102
4.42.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico tradicional bajo cargas de bruxismo. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.	103
4.43.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico extendido bajo cargas de bruxismo. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.	104
4.44.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico extendido bajo cargas de bruxismo. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.	105
4.45.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico tradicional bajo cargas de oclusión normal restaurado con vidrio ionomero y resina compuesta. (a) Vista oclusal (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular. (c) Vista en corte entre rodetes marginales.	106
4.46.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico tradicional bajo cargas de oclusión normal restaurado con vidrio ionomero y resina compuesta. (a) Vista oclusal (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular. (c) Vista en corte entre rodetes marginales.	107
4.47.	Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico tradicional bajo cargas de oclusión normal restaurado con vidrio ionomero. (a) Vista oclusal (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular. (c) Vista en corte entre rodetes marginales.	108
4.48.	Comparación esfuerzo máximo principal [MPa], vista oclusal, diente con acceso endodóntico tradicional en distintas posiciones bajo cargas de oclusión normal. (a) Diente Natural (b) Posición tradicional. (c) Posición hacia la zona mesial. (d) Posición hacia la zona distal. (e) Posición hacia la zona de la cúspide.	109
4.49.	Comparación esfuerzo máximo principal [MPa], escala normalizada, vista oclusal, diente con acceso endodóntico tradicional en distintas posiciones bajo cargas de oclusión normal. (a) Diente Natural (b) Posición tradicional. (c) Posición hacia la zona mesial. (d) Posición hacia la zona distal. (e) Posición hacia la zona de la cúspide.	110
4.50.	Comparación esfuerzo máximo principal [MPa], escala normalizada, vista en corte del plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular en un diente con acceso endodóntico tradicional en distintas posiciones bajo cargas de oclusión normal. (a) Diente Natural (b) Posición tradicional. (c) Posición hacia la zona mesial. (d) Posición hacia la zona distal. (e) Posición hacia la zona de la cúspide.	111
4.51.	Comparación esfuerzo máximo principal [MPa], escala normalizada, vista en corte entre rodetes en un diente con acceso endodóntico tradicional en distintas posiciones bajo cargas de oclusión normal. (a) Diente Natural (b) Posición tradicional. (c) Posición hacia la zona mesial. (d) Posición hacia la zona distal. (e) Posición hacia la zona de la cúspide.	112

- 4.52. Comparación de esfuerzos principales [MPa] para carga de oclusión normal, vista oclusal, modelo ortotrópico. (a) Diente natural. (b) Diente con acceso endodóntico ultra conservativo. (c) Diente con acceso endodóntico conservativo. (d) Diente con acceso endodóntico tradicional. (e) Diente con acceso endodóntico extendido. 115
- 4.53. Comparación de esfuerzos principales [MPa] para carga de bruxismo, vista oclusal, modelo ortotrópico. (a) Diente natural. (b) Diente con acceso endodóntico ultra conservativo. (c) Diente con acceso endodóntico conservativo. (d) Diente con acceso endodóntico tradicional. (e) Diente con acceso endodóntico extendido. 116
- 4.54. Comparación vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular y al centro del acceso endodóntico, oclusión normal. (a) Diente natural. (b) Diente con acceso endodóntico ultra conservativo. (c) Diente con acceso endodóntico conservativo. (d) Diente con acceso endodóntico tradicional. . . . 118
- 4.55. Comparación vista en corte entre rodetes marginales, oclusión normal. (a) Diente natural. (b) Diente con acceso endodóntico ultra conservativo. (c) Diente con acceso endodóntico conservativo. (d) Diente con acceso endodóntico tradicional. 119
- 4.56. Comparación vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular y al centro del acceso endodóntico, bruxismo. (a) Diente natural. (b) Diente con acceso endodóntico ultra conservativo. (c) Diente con acceso endodóntico conservativo. (d) Diente con acceso endodóntico tradicional. . . . 120
- 4.57. Comparación vista en corte entre rodetes marginales, bruxismo. (a) Diente natural. (b) Diente con acceso endodóntico ultra conservativo. (c) Diente con acceso endodóntico conservativo. (d) Diente con acceso endodóntico tradicional. . . . 121

Capítulo 1

Introducción

Los dientes son una estructura del cuerpo usada a diario y múltiples veces al día, cumplen una función al comunicarnos y además son los que permiten alimentarse siendo el primer paso para obtener la energía necesaria para el diario vivir. Debido a esto y otros factores están en constante riesgo de ser infectados o dañarse.

Uno de los tratamientos odontológicos que busca tratar alguna de estas dolencias dentales corresponde a la endodoncia. La endodoncia, también conocida como tratamiento de conductos, es un procedimiento dental que busca remover las bacterias y el tejido pulpar que se encuentran muerto o en estado de descomposición del interior de una pieza dental.

1.1. Motivación

En Odontología, el éxito del tratamiento endodóntico depende de la obturación adecuada de todo el sistema de conductos radiculares. Para ello, los dentistas suelen preparar una cavidad mayor para detectar y limpiar el conducto radicular. Sin embargo, la remoción de la estructura dentaria es una de las causas de fracturas en dientes tratados endodónticamente, debido a la extracción de una gran cantidad de tejido dental que puede amenazar la integridad de la estructura así como también generar micro grietas, facilitando la fractura del diente bajo cargas funcionales. Es aquí donde surge la motivación de este estudio, para estudiar la importancia de proteger los dientes premolares evitando destruir tejido dental innecesario durante el tratamiento de endodoncia.

Para estudiar la manera de reducir el riesgo de fractura en dientes premolares sometidos a procesos endodónticos, se realiza un análisis mediante el software de elementos finitos FeBio. En él, se analizan las propiedades biomecánicas para dientes premolares con diferentes accesos endodónticos sometidas a cargas de oclusión normal y bruxismo, para modelo isotrópico y anisotrópico.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El objetivo general es comparar el comportamiento biomecánico de dientes premolares con diferentes accesos endodónticos.

1.2.2. Objetivos específicos

Para alcanzar este objetivo, se deben completar los siguientes objetivos específicos:

- Modelar los dientes mediante el software FeBio utilizando las geometrías obtenidas a partir de microtomografías computarizadas.
- Utilizar materiales anisotrópicos.
- Simular el comportamiento biomecánico para los diferentes accesos endodónticos, en condiciones de carga de 150N y 500N.
- Analizar y comparar resultados obtenidos.

1.3. Alcances

- Las geometrías dentales fueron obtenidas a través de microtomografías computarizadas (micro-ct) por estudiantes de doctorado de la facultad de odontología de la Universidad de Chile.
- Se modelan cinco geometrías, el diente en su estado natural (NT), y el diente con cuatro tipos de accesos endodóntico, el tradicional (TEC), el conservativo (CEC), el ultra conservativo o 'ninja' (UCEC) y un acceso extendido (EEC).
- A excepción del esmalte que se simula tanto como un material homogéneo isotrópico elástico y homogéneo ortotrópico elástico, se utilizan materiales homogéneos isotrópicos elásticos.
- Se utiliza como criterio de comparación el esfuerzo principal máximo y la tensión de rotura (UTS).
- Se analiza la fractura principalmente en el esmalte dental.
- Se ignora el modelamiento del cemento dental debido a que su efecto es despreciable al ser una estructura muy delgada y con propiedades mecánicas similares a la dentina.

Capítulo 2

Antecedentes y discusión bibliográfica

2.1. Estructura dental y propiedades mecánicas.

Existen distintos tipos de dientes, pero todos poseen una estructura dental similar la cual se puede ver en la figura 2.1

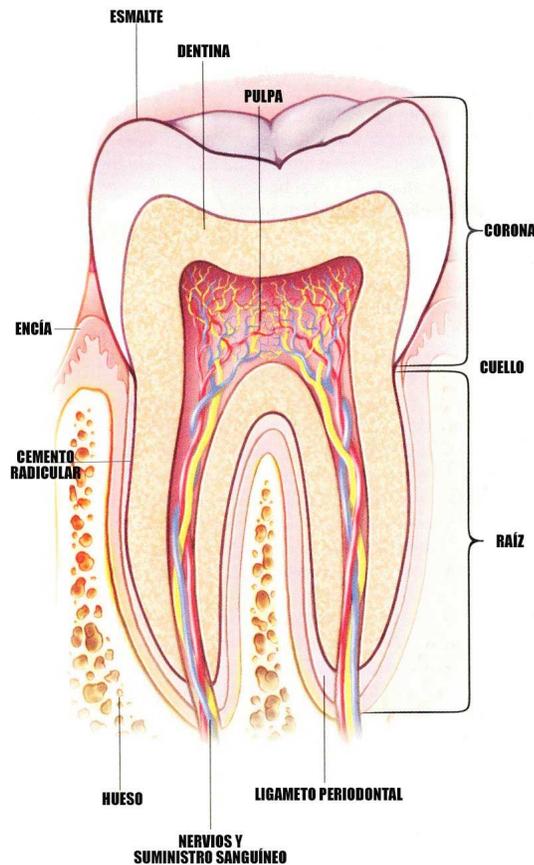


Figura 2.1: Estructura dental

Esta se puede dividir en la corona y la raíz. La corona es la región del diente que se encuentra en la boca y está cubierta de esmalte. La raíz es la porción del diente que esta inserta en el hueso trabecular, está cubierta con una delgada capa de cemento que lo comunica con

el hueso a través del ligamento periodontal.

2.1.1. Esmalte

El esmalte es el tejido con más mineralización del cuerpo lo que lo hace el más duro del cuerpo humano, es quien cubre a la corona dental. El esmalte posee una estructura básica correspondiente al cristal y una secundaria que son los prismas. Los cristales se unen entre si para formar los prismas, lo que da origen a un esmalte prismático, que es mayoritario, y existe un esmalte en donde los cristales no se organizan en prismas y forman el esmalte aprismático, que se ubica preferentemente en la periferia.

Los prismas son estructuras longitudinales de 4 μm de espesor, que se dirigen en longitud desde el límite amelodentinario a la superficie. Su diámetro varía entre 4-10 μm y se van haciendo más gruesos al acercarse a la superficie. Su número varía en relación al tamaño de la corona y va desde 5 a 12 millones. Su disposición varía según el corte realizado. En un corte longitudinal se observan bandas delgadas irregulares, en un corte transversal se presentan como secciones hexagonales irregulares, ovoides o como en una forma que semeja escamas de pescado. Un modelo más actual de la estructura del esmalte, guiado por estudios de microscopía electrónica, identifica los prismas como bastones irregularmente paralelos en un corte longitudinal y en cortes transversales como una morfología en ojo de cerradura, lo que permite identificar un cuerpo, zona más ancha, de 5 μm de diámetro y una cola cuya longitud es de 9 μm .

La orientación de los prismas es compleja, estos se dirigen desde la unión amelodentinaria a la superficie externa del diente, se organizan y disponen en hileras en planos circunferenciales alrededor del eje mayor del diente.

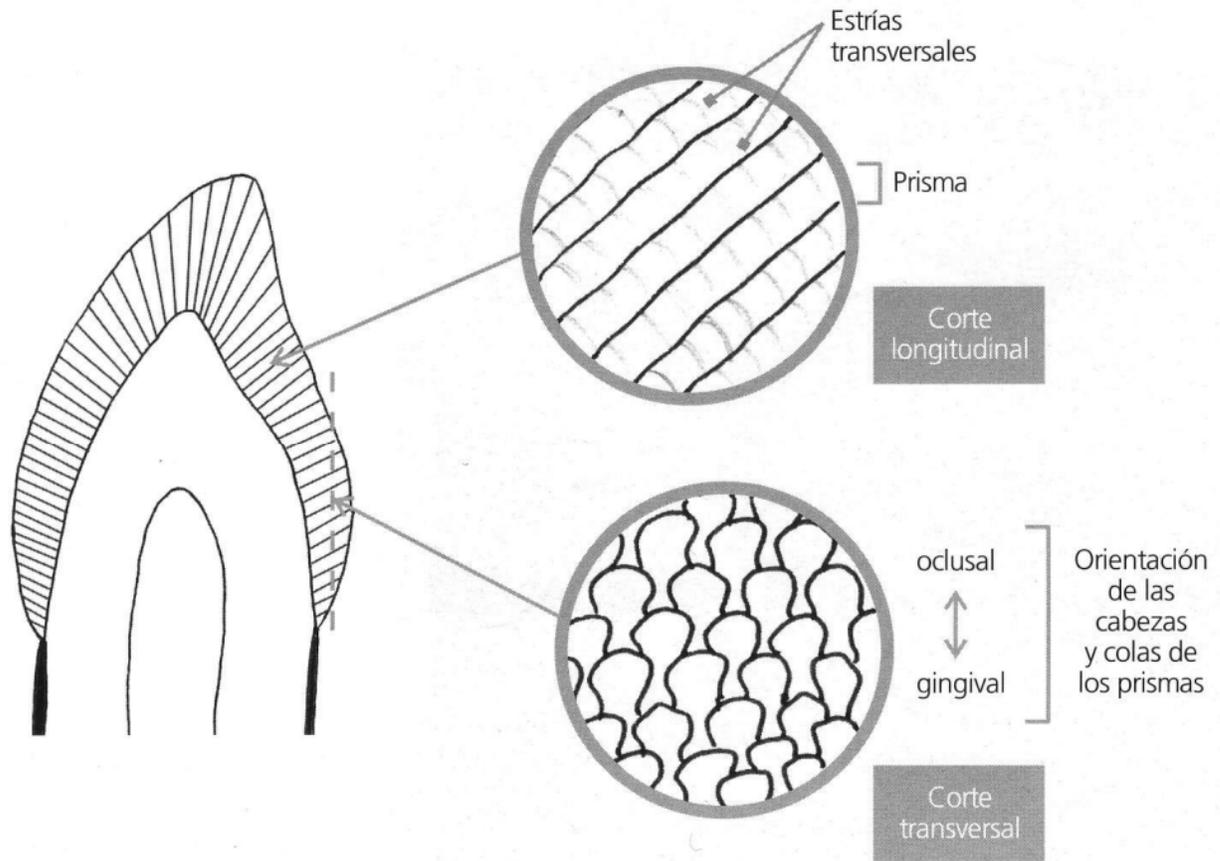


Figura 2.2: Microestructura esmalte

Debido a su estructura el esmalte posee características anisotrópicas, los estudios que modelan anisotrópicamente al esmalte utilizan módulos de elasticidad de 80 GPa a lo largo de los prismas y 40 GPa transversales a los prismas. Debido al aumento de grosor de los prismas al acercarse a la superficie del esmalte las propiedades mecánicas de este a la vez varían según la posición en la que se encuentran. Una recolección de estudios modela el módulo de elasticidad como se ve en la figura 2.3 [2]

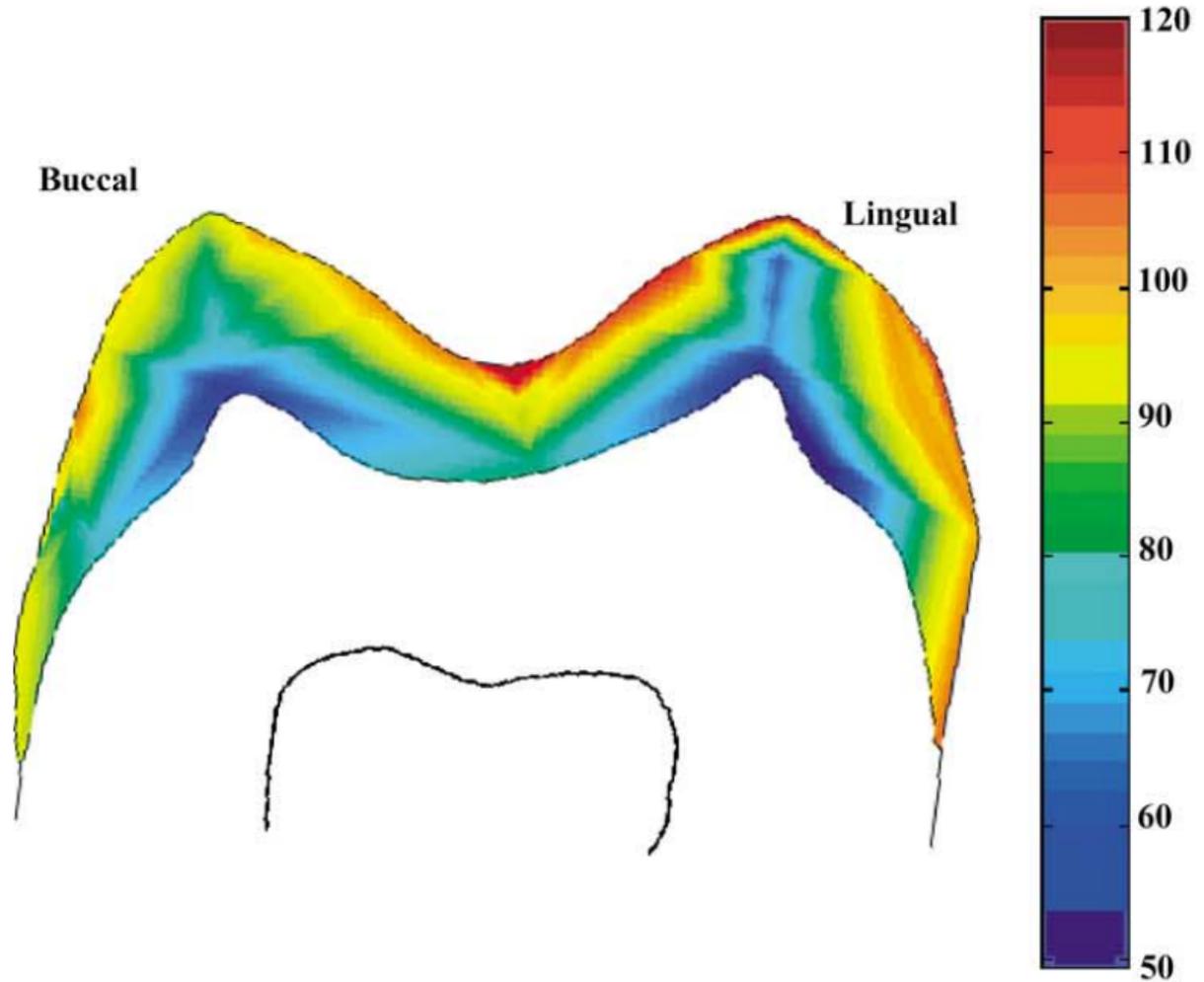


Figura 2.3: Mapa módulo de elasticidad [GPa]. Figura tomada de [3]

Diferentes estudios modelan el esmalte como un material isotrópico elástico con un módulo de elasticidad de $80GPa$ y un coeficiente de Poisson de $\nu = 0.33$

2.1.2. Dentina

La dentina constituye la mayor parte del diente humano. Está compuesta por una gran cantidad de túbulos con un patrón radialmente paralelo. Además, la dentina peritubular rodea el lumen de cada túbulo y tiene un módulo elástico más alto que la matriz de dentina, es decir la dentina intertubular. En la dentina, los túbulos se extienden a través de toda la dentina desde la pared pulpar hasta la unión dentina-esmalte o el cemento en la sección longitudinal de la dentina. Los túbulos en la raíz del diente son aproximadamente paralelas, pero los túbulos de la corona del diente son radiales. En la sección transversal los túbulos también son radialmente orientado. La dentina peritubular rodea los túbulos y se caracteriza por su alto contenido mineral. La dentina intertubular ocupa el volumen fuera de la dentina peritubular y contiene más colágeno y menos mineral que la dentina peritubular. A medida que se examina la dentina más cerca de la cavidad pulpar, los diámetros de los túbulos aumentan gradualmente y además, la densidad numérica de los túbulos también tiene una

tendencia al aumento, aunque el número total de túbulos permanece constante. Lo anterior da las características estructurales de la dentina que implica tener una tensión-deformación no homogénea y anisotrópica.

[4]

No obstante por simplicidad la dentina generalmente se modela como una estructura homogénea isotrópica elástica.

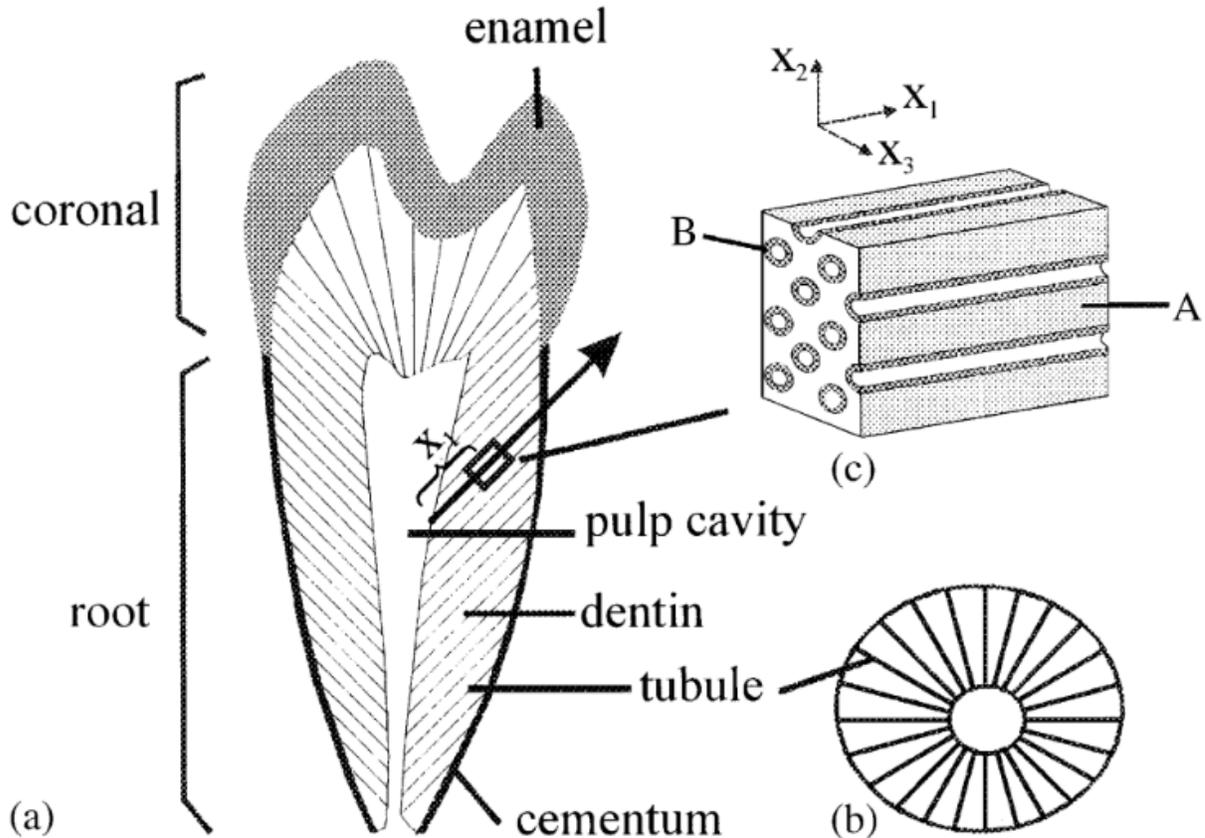


Figura 2.4: Figura esquemática de un diente premolar y la estructura de su dentina. (a) Sección longitudinal del diente premolar. (b) Sección transversal de la dentina. (c) Elemento volumétrico representativo de la dentina. A- dentina intertubular. B- dentina pertitubular. Figura tomada de [4]

2.1.3. Hueso trabecular, ligamento periodontal, pulpa dental.

El hueso trabecular corresponde al hueso que contiene las cavidades de los dientes. Este se encuentra en la mandíbula, es muy flexible y se remodela constantemente para adaptarse a los cambios de forma y tamaño de las estructuras dentales que contiene.

El ligamento periodontal es una articulación fibrosa que suspende la raíz de cada diente la cavidad ósea del hueso trabecular. Las fibras del ligamento periodontal están ancladas en la capa del cemento dental y en el hueso trabecular. El ligamento periodontal mantiene los dientes en suspensión con el resultado de que cada diente es capaz de realizar pequeños movimientos en la cavidad ósea trabecular.

La pulpa dental es el tejido blando localizado en el interior del diente, en la cavidad pulpar, y que contiene el nervio, los vasos sanguíneos y el tejido conectivo. Las distintas partes de este se pueden observar en la figura 2.5

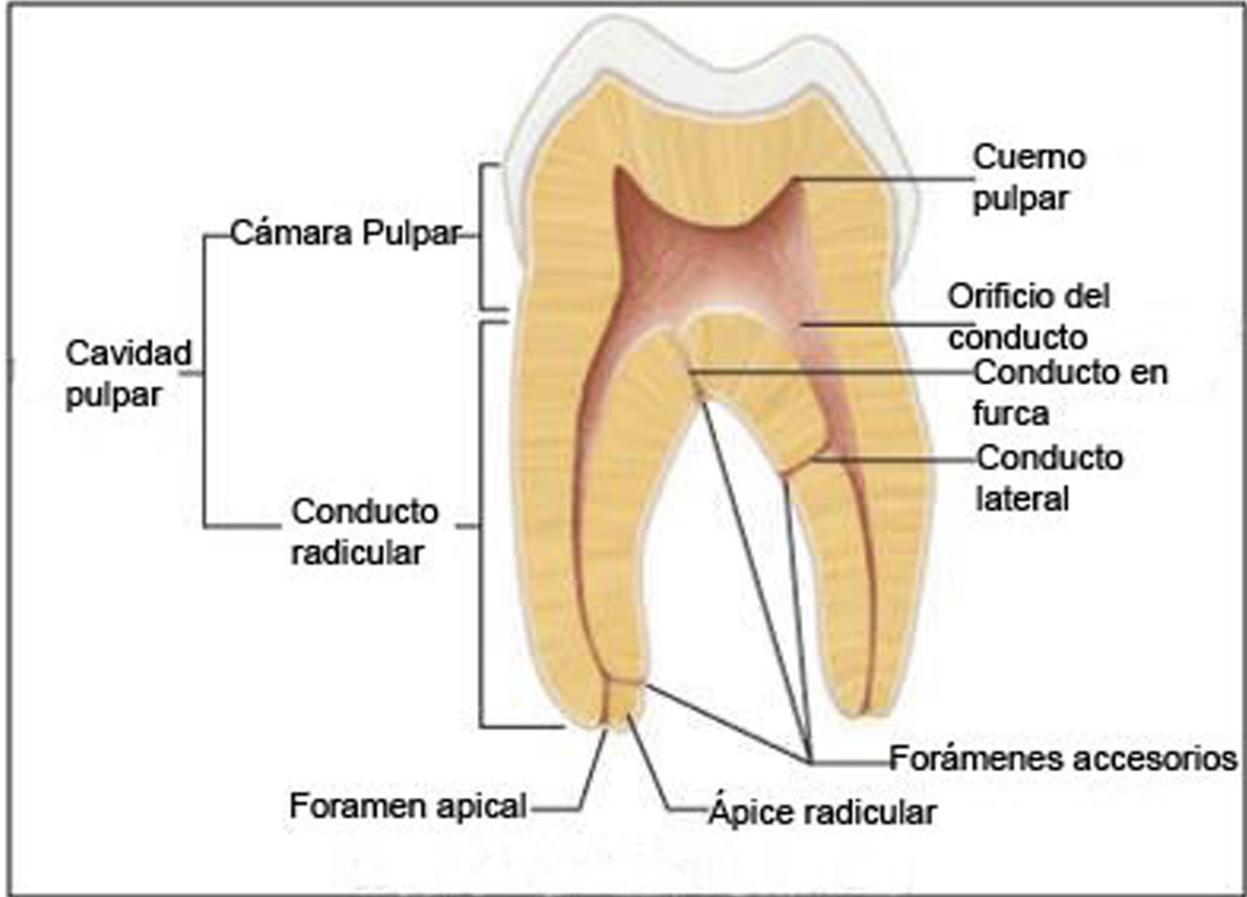


Figura 2.5: Pulpa Dental

2.1.4. Diente premolar

Este estudio toma como modelo un diente premolar mandibular. Estos están inmediatamente antes de los molares. La forma de estos puede variar pero la morfología se puede observar en la figura 2.7. Se le llama vestibular a la zona más próxima a la mejilla y labio, lingual a la zona más próxima a la lengua, distal a la zona más alejada del centro y mesial a la zona más cercana.

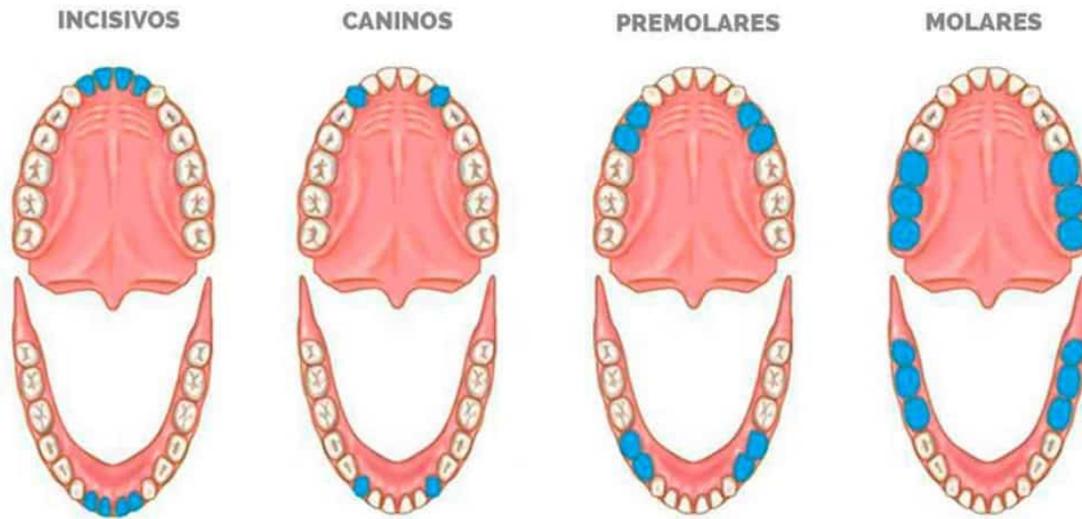


Figura 2.6: Posición dientes premolares

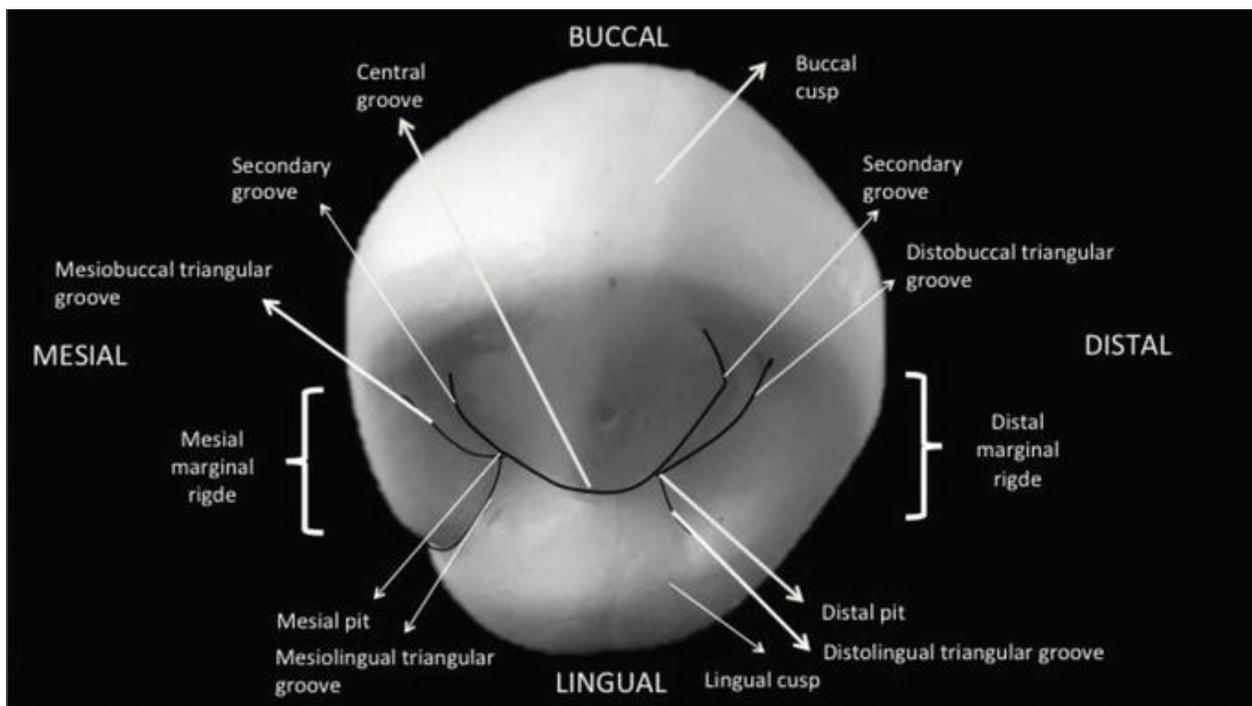


Figura 2.7: Morfología diente premolar. Extraída de [5]

2.2. Endodoncia

La terapia endodóntica es un procedimiento en el cual se extirpa la pulpa dental, se limpian los conductos radiculares y luego se rellena y sella la cavidad pulpar. Es una forma de eliminar tejido infectado, en el que están los nervios y los vasos sanguíneos, de la parte interior del diente y sustituirlo por un material inerte, de tal forma que se elimina la infección y se insensibiliza el diente.

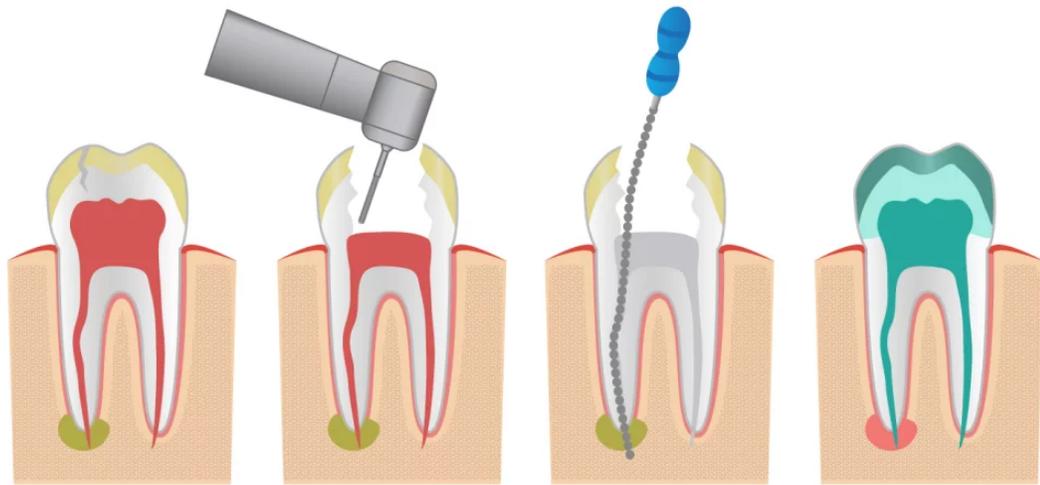


Figura 2.8: Procedimiento endodóntico

Para realizar un acceso endodóntico se siguen los siguientes pasos.

1. Apertura de la cámara pulpar
2. Remoción del techo de la cámara
3. Eliminación de la pulpa cameral
4. Rectificación de las paredes de la cámara.

Los objetivos de la preparación del conducto radicular son:

- Eliminar microorganismos
- Remover el tejido pulpar restante
- Eliminar desechos
- Configurar el sistema del conducto radicular de tal manera que pueda obturarse.

Una vez limpiado el conducto este es rellenado con gutapercha hasta el conducto y el inicio de la corona. El resto de la corona se cubre con un cemento de base cavitaria y es recubierto con un material de restauración.

2.2.1. Accesos endodónticos

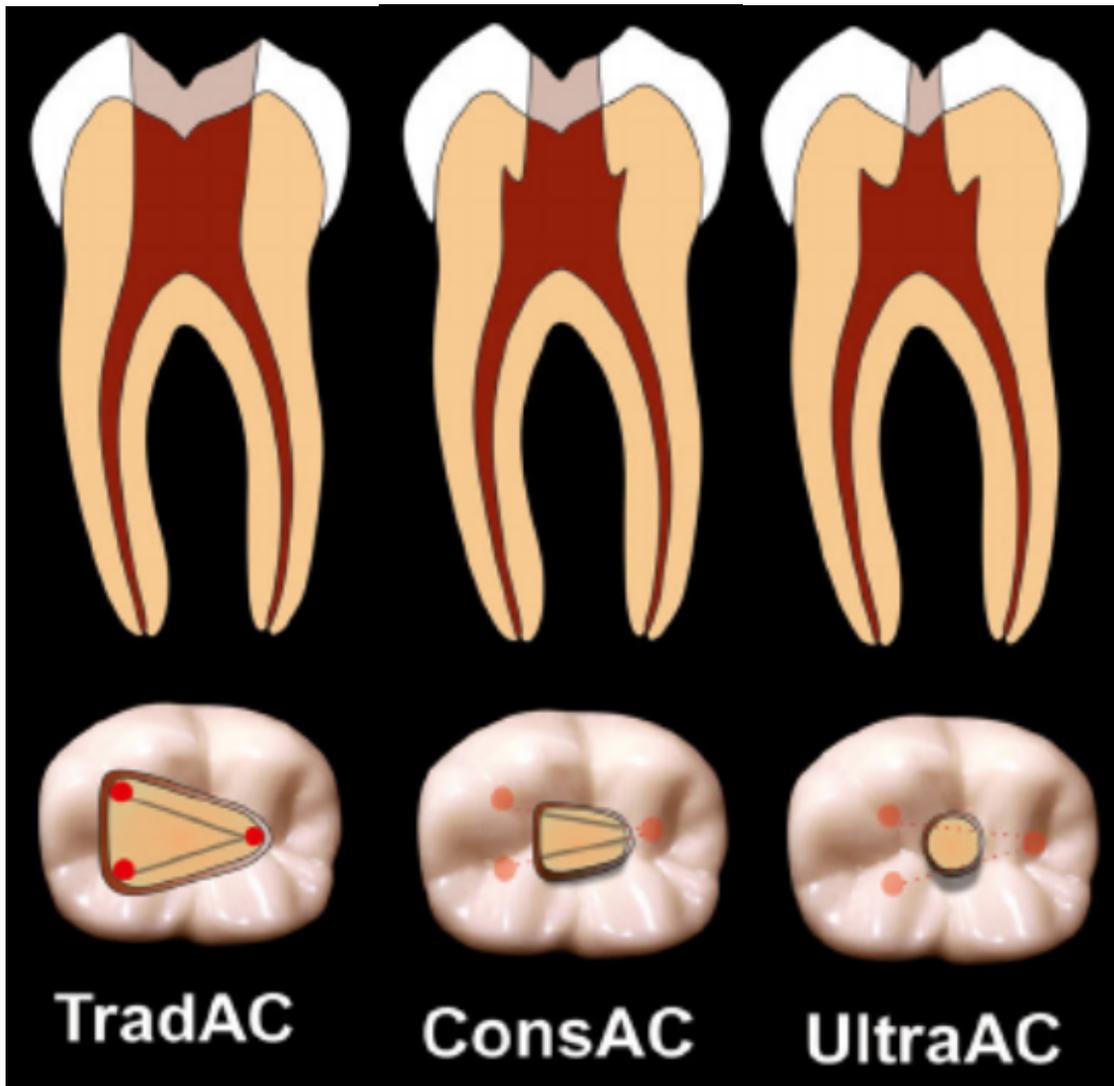
En la última década, se han descrito una serie de accesos endodónticos con el fin de reducir el tejido dental removido hacia la cámara pulpar en los tratamiento de conducto radicular.

La premisa detrás de este concepto asume que la máxima preservación del techo de la cámara pulpar durante la preparación del acceso endodóntico mantendría la resistencia a la fractura posterior al tratamiento radicular. Sin embargo, cuanto menor sea el acceso de la cavidad, más difícil puede ser visualizar y realizar una correcta debridación de la cámara pulpar, así como ubicar, dar forma, limpiar y llenar los canales. Al mismo tiempo, una pequeña

cavidad de acceso puede aumentar el riesgo de complicaciones iatrogénicas como resultado de la mala visibilidad, que puede tener un impacto en el resultado del tratamiento.[9]

Al ser el estudio de los accesos endodónticos relativamente nuevos aún no existe una terminología y nomenclatura consistente. No obstante se usan los términos más comunes para definirlos entre ellos se encuentran.

- Acceso endodóntico tradicional: Se caracteriza por la remoción completa del techo de la cámara pulpar siguiendo una proyección en línea recta. Esto permite que todos los orificios puedan verse de manera clara. Este acceso se puede ver en las figuras 2.9 (a) y 2.10.
- Acceso endodóntico conservativo: La preparación del conducto inicia en la fosa central de la superficie oclusal y es extendida de manera suave y con paredes convergentes axiales a la superficie oclusal, extendiéndola lo necesariamente justo para detectar los canales de los orificios preservando parte del techo de la cámara pulpar. Este acceso se puede ver en las figuras 2.9 (b) y 2.10.
- Acceso endodóntico ultra conservativo: Conocido como acceso ‘ninja’, esta cavidad comienza de igual manera que la conservativa con la diferencia de no extender el conducto y mantener la mayor cantidad del techo de la cámara pulpar intacto. Este acceso se puede ver en las figuras 2.9 (c) y 2.10. [9]



(a) (b) (c)

Figura 2.9: Accesos endodónticos. (a) Tradicional (TEC). (b) Conservativo (CEC). (c) Ultra conservativo. Figura extraída y adaptada de [9]

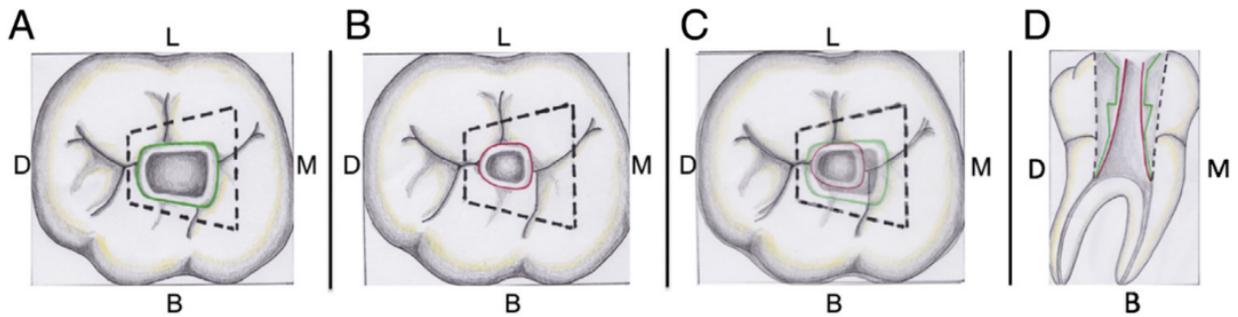


Figura 2.10: Comparación accesos endodónticos. En negro acceso endodóntico tradicional, en verde conservativo y en rojo ultra conservativo. Figura extraída y adaptada de [10]

2.3. Fractura dental

2.3.1. Biomecánica de dientes fracturados

La fractura es un proceso muy complejo que implica la nucleación y crecimiento de microgrietas. El conocimiento de cómo se forman las grietas y cómo estas se propagan dentro de una estructura es importante para comprender las causas de las fallas en dientes durante las funciones mecánicas.

En una falla por fatiga, las grietas microscópicas tienden a crecer con el tiempo, eventualmente resultando en una fractura. Por tanto, las estructuras con grietas (incluso si no son visibles superficialmente) pueden fallar catastróficamente.

Esfuerzos de tracción con magnitudes lo suficientemente altas como para proporcionar La deformación plástica en la punta de la grieta puede servir como fuerza impulsora para la propagación de grietas.

La propagación de grietas dentro de la dentina puede producirse también debido a esfuerzos residuales, la pérdida/remoción de estructura dentaria o por la discordancia de los módulos elásticos creados por las restauraciones. El aumento de la magnitud de los esfuerzos de tracción y de concentraciones de esfuerzo aumenta la probabilidad de fractura de la estructura dental restante. El actual conocimiento sobre fracturas en dientes tratados endodónticamente es que las causas son multifactoriales.

Un diente fracturado se describe principalmente como uno con grietas que se originan en el plano mesio-distal de la corona y progresa hacia la raíz. Los principios biomecánicos subyacentes al diente agrietado son generalmente en la corona y, por lo tanto, es importante estudiar el patrón de distribución de esfuerzo de tensión en la corona del diente para comprender el mecanismo del diente fracturado.

Investigaciones anteriores han sugerido que la resistencia de un diente está directamente relacionada con la cantidad de estructura coronal preservada del diente. Por eso La preservación de la estructura coronal del diente ha sido reconocido como crucial para el éxito del manejo de dientes tratados endodónticamente. Sin embargo, se ha demostrado que los procedimientos de endodoncia reducen la rigidez relativa de los dientes sólo 5%. En cambio en una preparación mesio-oclusal distal se reduce la rigidez relativa en un 20%. Las mayores pérdidas de rigidez se relacionaron con la pérdida de la integridad del rodete marginal y preparación de la cavidad mesio-oclusal distal (MOD), que resulta en un 63% de pérdida de rigidez relativa.

Sin embargo, la preparación del acceso a la cavidad por sí misma compromete la integridad estructural a la flexión proporcionada por el techo de la cámara pulpar, lo que da como resultado una mayor flexión cuspídea durante su función.

La repetida flexión de las cúspides (fatiga) asociada con la carga y descarga del diente (ciclos de oclusión) resulta en la propagación de una fractura mesio distal, desde la corona hacia la raíz. [16]

2.3.2. Biomecánica de fracturas de raíz vertical

Una fractura de raíz vertical se describe como una fractura que se origina en la región apical de la raíz y se propaga hacia la cara coronal de la raíz. Se reconoce que, en una fractura de raíz vertical, muchos factores interactúan influenciando la susceptibilidad y el patrón de fractura.

Análisis numéricos han investigado hasta qué punto el espesor de la dentina, el radio de curvatura del conducto radicular y la morfología de la raíz externa influyen en la fractura del diente. Este estudio concluyó que la fractura de raíz vertical es impredecible y la extracción de dentina no siempre aumentan la susceptibilidad a las fracturas.

Estudios biomecánicos han demostrado que las tensiones funcionales relacionadas con la masticación en el diente, se distribuyeron principalmente en la dentina cervical (corona y raíz).

Procesos que conducen a una pérdida de dentina radicular o ensanchamiento de los conductos radiculares alteran el patrón de distribución de la tensión radicular, lo que resulta en una mayor distribución de la tensión en la dirección apical y en el plano buco-lingual de la raíz. Estos patrones de distribuciones alterados se pueden deber a la reducción de la resistencia a la flexión de la raíz. Los mayores esfuerzos de flexión de la raíz pueden contribuir a una fractura que se propaga desde las porciones apicales de la raíz a las porciones coronales en la dirección buco-lingual. Las grietas que conducen a la fractura vertical de la raíz se originan principalmente en las proximidades de la pared del conducto radicular.

Es importante destacar que el grado de pérdida de dentina no debe ser considerado como un factor individual que influya en la resistencia a la fractura, pero debe complementarse con otros factores como la geometría del conducto radicular, el volumen del conducto y dentina residual. Es esencial también tener en cuenta que las tensiones en la raíz son distribuidas predominantemente en el dirección buco-lingual.

Por lo tanto, cualquier eliminación no uniforme de dentina alrededor del centroide del conducto radicular reduciría la resistencia a la flexión de la raíz y cuando esta se expone a ciclos de masticación, la raíz experimenta de forma repetida y aumentada esfuerzos flexión que da como resultado grietas buco-linguales en el raíz que avanzan hacia la corona.

[16]

2.3.3. Fractura en esmalte

El diente se puede describir como una estructura compuesta bastante compleja desarrollada para servir al usuario. La naturaleza adaptó el principio de que los dientes deben ser duros y rígidos para generar niveles de estrés locales lo suficientemente altos para que estas tensiones sean capaces de penetrar los tejidos durante la caza y la lucha, pero para que también pueden triturar alimentos duros. Al mismo tiempo el esmalte se ha diseñado para limitar la naturaleza frágil inherente de la hidroxiapatita al dispersar las grietas que se propagan y por lo tanto, resistir algunas fallas quebradizas.

Al orientar los prismas en las puntas de las cúspides a lo largo del eje del diente, se forma una estructura de prismas en paralelo. Al mismo tiempo, al orientar los prismas más o menos perpendicular al eje largo del diente en las partes restantes de la corona, se forma una estructura de prismas en serie. Estos modelos son válidos bajo el supuesto de que la carga está en una dirección axial. Dado que el modelo paralelo da como resultado una combinación más rígida que un material de modelo en serie, el diente se ha diseñado para optimizar la rigidez en la dirección de masticación y flexionarse en una dirección perpendicular a esa dirección.

El esmalte posee un aumento de la resistencia al crecimiento de grietas, desde la zona exterior a la zona interior del esmalte, y el aumento de resistencia de fractura es una función respecto a la distancia con la unión amelodentinaria. El esmalte exterior posee la menor resistencia al crecimiento de grietas con valores entre $0.67 \pm 0.12 MPa m^{0.5}$ y en el esmalte interior crecen sus valores desde $1.13 MPa m^{0.5}$ a $3.93 MPa m^{0.5}$. La máxima resistencia al crecimiento de grietas en fractura (K_c) varía entre 1.79 a $2.37 MPa m^{0.5}$.

El crecimiento de grietas en el interior del esmalte se produce por una serie de mecanismos en la micro y nano escala. La decusación en el interior del esmalte promueve que las grietas sean desviadas y giradas, resultando en la reducción de la intensidad de los esfuerzos locales en la punta de la grieta. (Figuras 2.11 y 2.12). Adicionalmente mecanismos extrínsecos como la formación de puentes por ligamentos intactos del tejido y la matriz orgánica promueven el cierre de grietas. Las microgrietas debido a el aflojamiento de prismas también se identificó como una fuente activa de disipación de energía. La microestructura única del esmalte en la región decusada promueve la resistencia al crecimiento de grietas que es aproximadamente tres veces mayor que la dentina y sobre diez veces la del hueso.

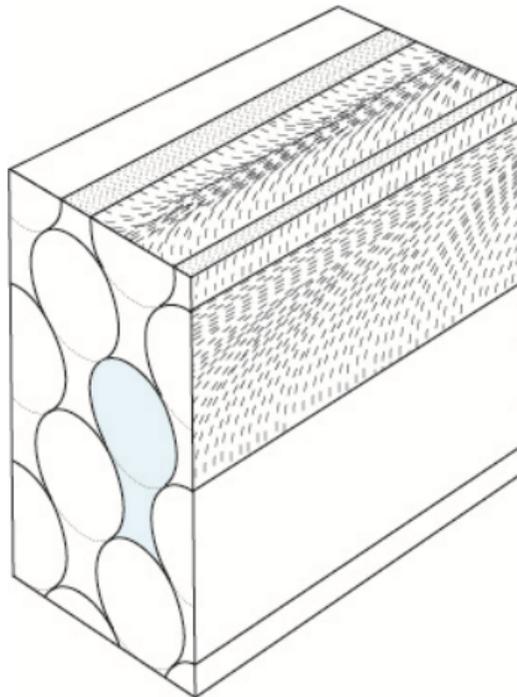


Figura 2.11: La sección transversal de los prismas de esmalte muestra una estructura de ojo de la cerradura (azul). Figura extraída de [17]

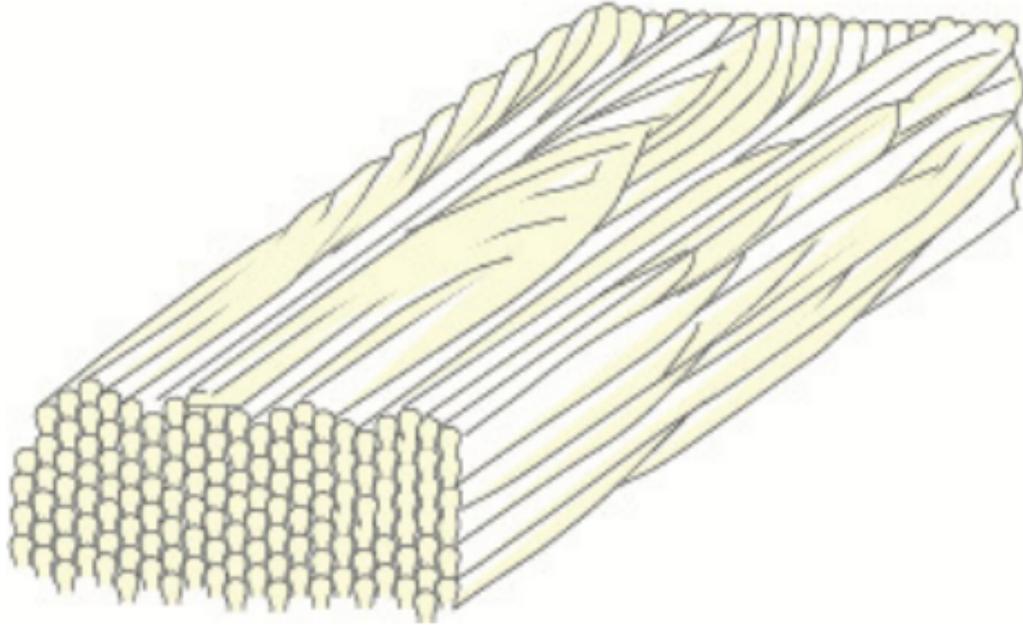


Figura 2.12: Los prismas en forma de ojo de cerradura se entrelazan cada vez más a medida que los prismas se acercan a la unión amelo dentinaria. Figura extraída de [17]

Estudios de modelamiento físico de fracturas han mostrado que los patrones de fractura ocurren dependiendo de las propiedades mecánicas de las comidas. Comidas suaves producen fracturas en la base del esmalte cercana a la unión amelodentinaria, alejado de los puntos de contacto debido a un aumento de los esfuerzos de tracción. Estos aumentos se producen alrededor de la región del cíngulo. [17]

Estudios muestran que el crecimiento de grietas debido a fatiga en el esmalte tiene un comportamiento de grietas cortas en ambas direcciones (dirección de avance (desde el esmalte exterior al interior), dirección inversa (desde el interior al exterior)), sin embargo el comportamiento de grietas largas en estado estacionario fueron exhibidas en solo dirección de avance. La extensión resultante de crecimiento estable de grietas en la dirección de avance fue aproximadamente el doble que la lograda para la dirección inversa, y también ocurrió en un rango de intensidad de estrés dos veces mayor que en la dirección inversa. El crecimiento de grietas monotónicas en la dirección de avance resultó en una curva R ascendente con un 300 % de aumento en la resistencia al crecimiento de grietas. El aumento de la resistencia al crecimiento de grietas se produjo en ambas direcciones y fue promovido por un combinación de puenteo de grietas, deflexión de grietas y bifurcación de grietas. Se descubrió que la materia orgánica en los límites del prisma juega un papel único en la impartición de grietas y retraso del crecimiento a través de la formación de varias ataduras ininterrumpidas y microfisuración inducida por aflojamiento de los prismas. El potencial de tales mecanismos se demostró que aumentaba en la dirección de avance debido a un aumento correspondiente en el contenido orgánico. La microestructura del esmalte está funcionalmente optimizada para guiar las grietas desde el esmalte exterior quebradizo hacia adentro, donde experimentan una mayor resistencia al crecimiento y son evitadas de causar fracturas y astillas.

2.3.4. Caracterización de fracturas

Hay diversos estudios que caracterizan los tipos de fractura dental y sus patrones, entre ellos se encuentran el estudio de Soares [18] en el cual se ponen a prueba cincuenta dientes colocándolos en 5 grupos que corresponden a G1, dientes intactos (grupo control), G2, preparación mesial-oclusal-distal (MOD), G3, preparación MOD restaurado con resina compuesta, G4, preparación MOD y tratamiento endodóntico y G5, preparación MOD con tratamiento endodóntico restaurado con resina compuesta. Además de las pruebas experimentales, se modelan en un modelo de elementos finitos los distintos grupos.

Los resultados obtenidos por este estudio se muestra en las figuras 2.13, 2.14 y la tabla 2.1.

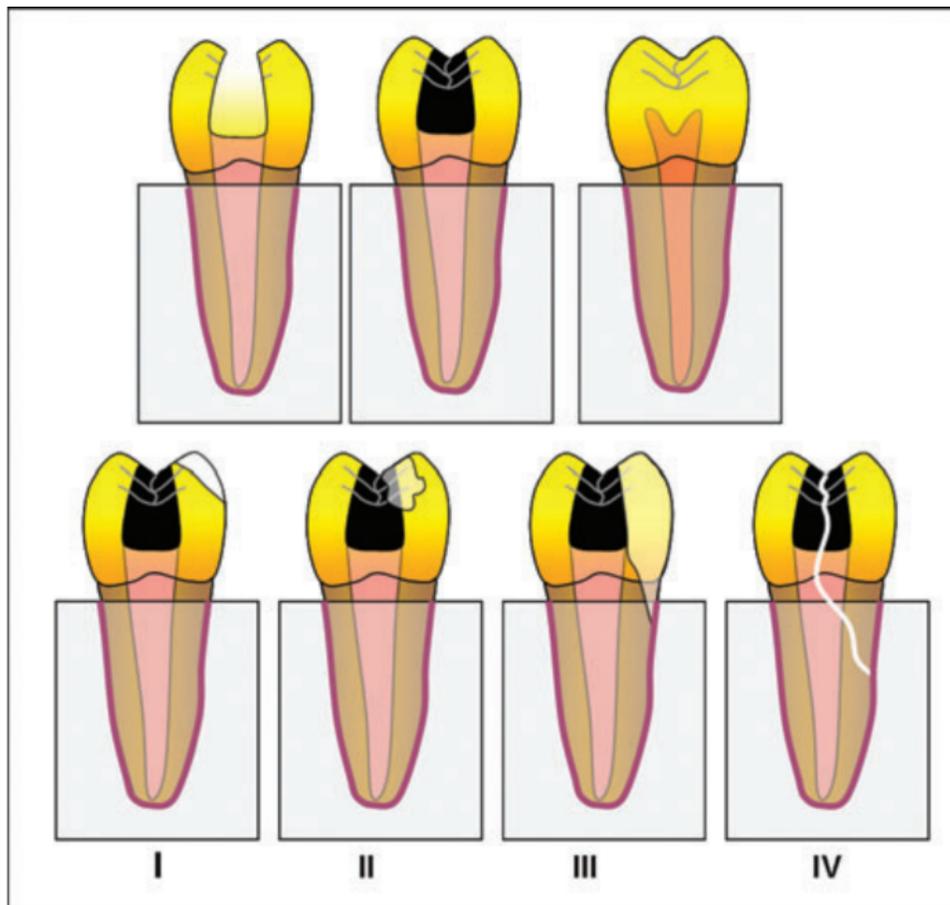


Figura 2.13: Patrones de fractura. Tipo I, fracturas que involucran pequeñas porciones coronales de los dientes. Tipo II, fracturas que involucran porciones coronales de los dientes además de fallas de cohesión con la resina compuesta. Tipo III, fracturas que involucran porciones coronales de los dientes con afectación periodontal además de fallas de cohesión con la resina compuesta. Tipo IV, fractura vertical coronal/radicular. Figura extraída de [18]

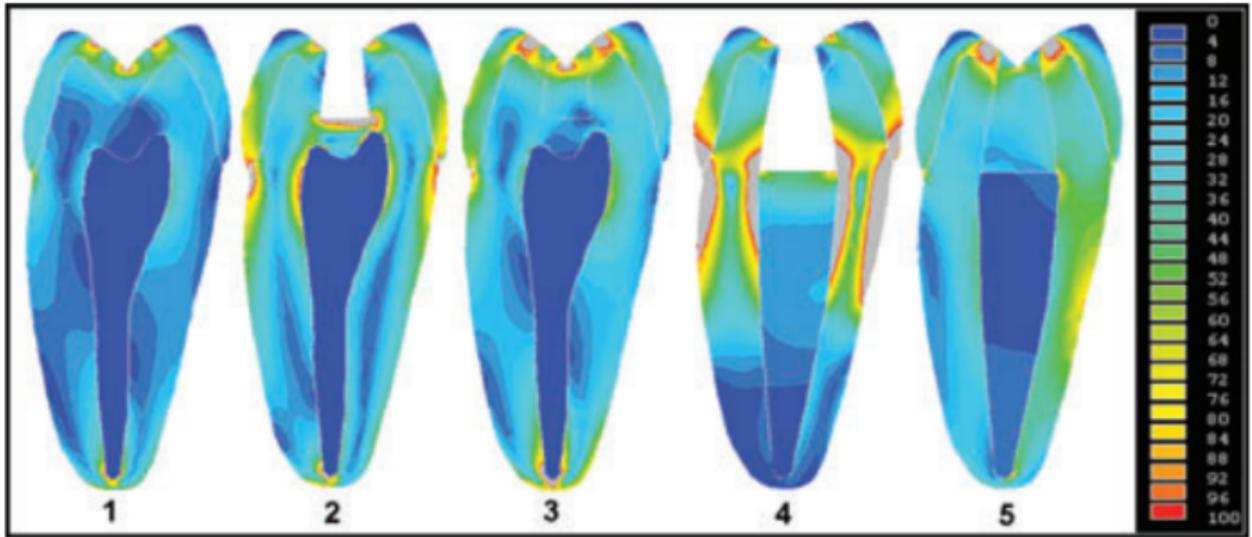


Figura 2.14: Distribución de esfuerzo de Von Mises para los cinco modelos.
Figura extraída de [18]

Tabla 2.1: Resistencia media a la fractura, y patrones de fractura para cada uno de los grupos.

Grupo (n=10)	Resistencia (N)	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
1 (Control)	820	10	-	-	0
2 (MOD preparación)	517	4	-	-	6
3 (MOD + restauración)	805	1	1	2	6
4 (MOD + Endo)	394	1	-	-	9
5 (MOD + Endo + restauración)	641	0	1	1	8

Estos diversos estudios concluyen que la conservación de estructura dental es fundamental para ofrecer resistencia a la fractura. El diente natural exhibe una resistencia a la fractura significativamente mayor que los dientes tratados endodónticamente[21]. La remoción de dentina interior en dientes tratados endodónticamente reduce los valores de resistencia a la fractura además de promover alteración en la distribución de esfuerzos. El uso de restauraciones adhesivas es recomendado para reforzar la estructura dental restante [18]. La restauración con resina compuesta obtiene resultados significativamente mejores comparados con restauraciones de vidrio ionomero. La falla adhesiva con la resina compuesta se mantiene como uno de los problemas más grande. La fatiga cíclica tiene un efecto negativo en la resistencia a la fractura de dientes restaurados [19].

2.4. Estudios previos

Existen distintos estudios respecto a análisis biomecánicos de dientes, sin embargo existe una alta variabilidad en los estudios, ya que la mayoría de los estudios esta enfocado a dientes molares, otros se enfocan en las propiedades de heterogeneidad e anisotropía de los materiales, algunos estudian solamente el comportamiento de dientes naturales y otros realizan un enfoque a dientes con tratamientos endodónticos y sus diferentes accesos.

2.4.1. Biomechanical Properties of First Maxillary Molars with Different Endodontic Cavities: A Finite Element Analysis [11]

Este estudio realiza un análisis biomecánico en un primer molar maxilar con diferentes accesos endodónticos.

En la figura 2.15 se pueden observar los diferentes accesos utilizados y las cargas aplicadas al modelo.

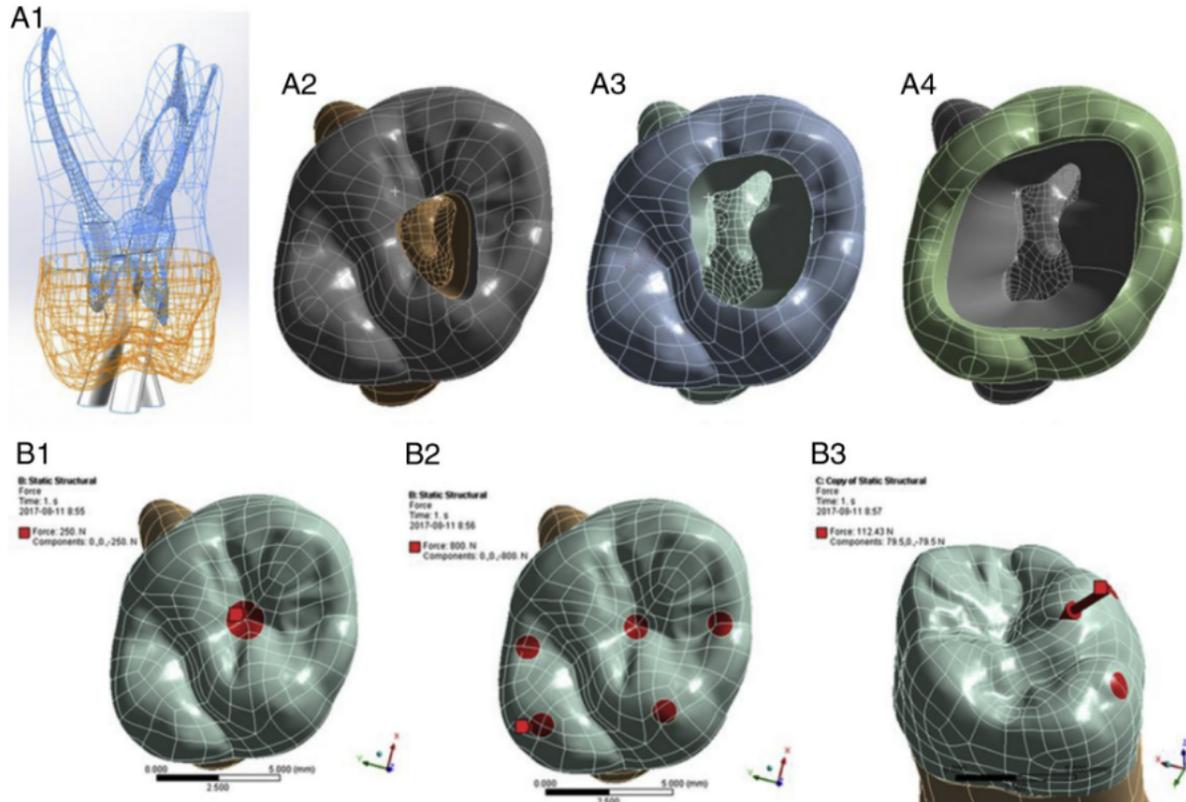


Figura 2.15: Accesos y cargas aplicadas. (A1 y A2) Acceso endodóntico conservativo. (A3) Acceso endodóntico tradicional. (A4) Acceso endodóntico extendido. (B1) Una fuerza vertical de 250 N aplicada en fosa central. (B2) Una fuerza total de 800N aplicada en 5 puntos. (B3) Una fuerza de 225 N aplicada en plano lingual aplicada en la cúspide lingual con un ángulo de 45°

Los resultados obtenidos para cada uno de los modelos se pueden observar en la figura 2.16 y 2.17.

Tabla 2.2: Propiedades mecánicas isotrópicas elásticas de los materiales utilizados.

Material	Elastic modulus (E; GPa)	Poisson ratio (μ)
Enamel (22)	84.1	0.002
Dentin (22)	18.6	0.31
Periodontal ligament (22)	0.0689	0.45
Gutta-percha (22)	0.00069	0.45
Cortical bone (23)	13.7	0.3
Cancellous bone (23)	1.37	0.3
Composite resin (24)	12	0.3
Flowable composite resin (24)	5.1	0.27
Cement layer (25)	6	0.3
Pulp (26)	0.002	0.45

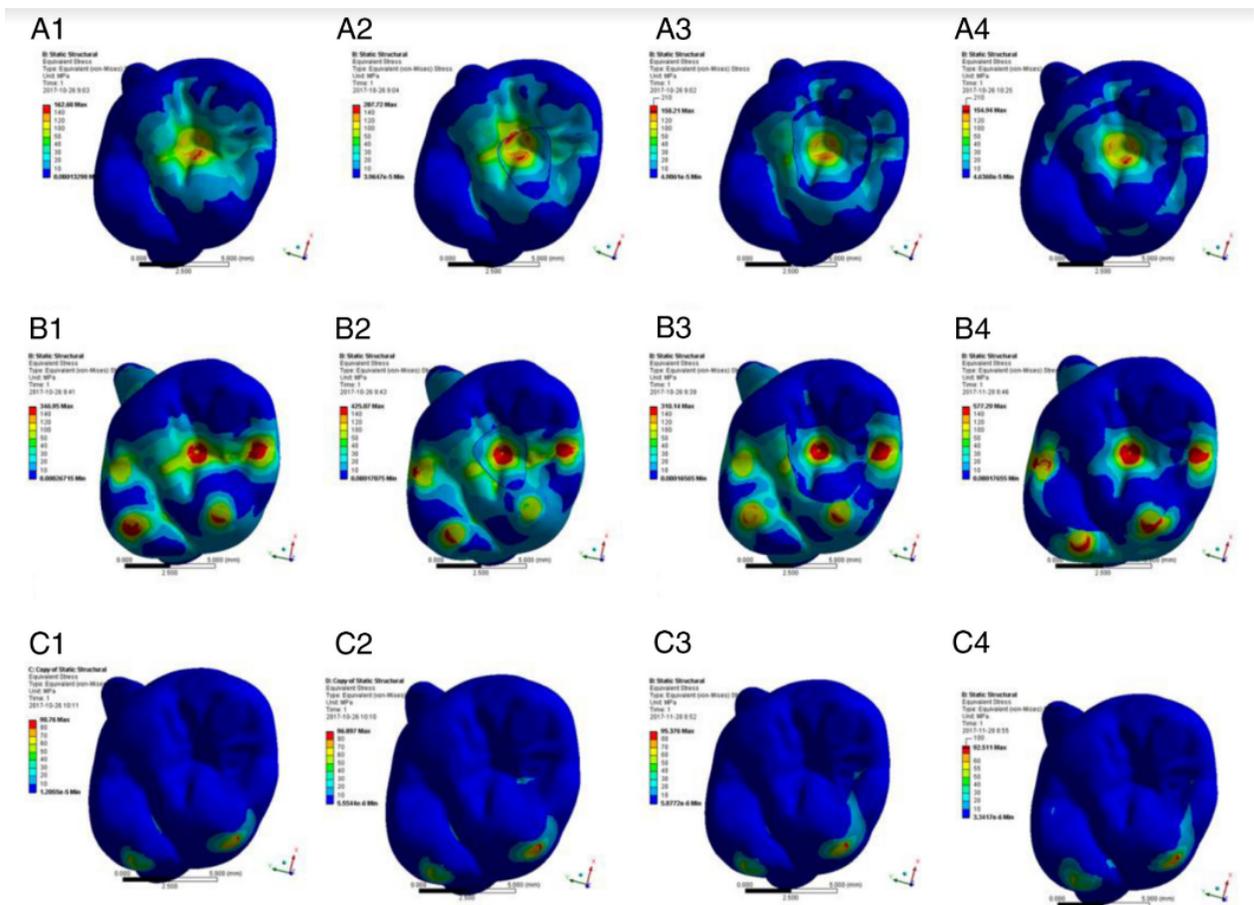


Figura 2.16: Distribución de esfuerzos de Von Mises [MPa] en la cara oclusal. (1-4) Diente intacto, acceso endodóntico conservativo, tradicional y extendido respectivamente. (A) Una fuerza vertical de 250 N aplicada en fosa central. (B) Una fuerza total de 800N aplicada en 5 puntos. (C) Una fuerza de 225 N aplicada en plano lingual aplicada en la cúspide lingual con un ángulo de 45°

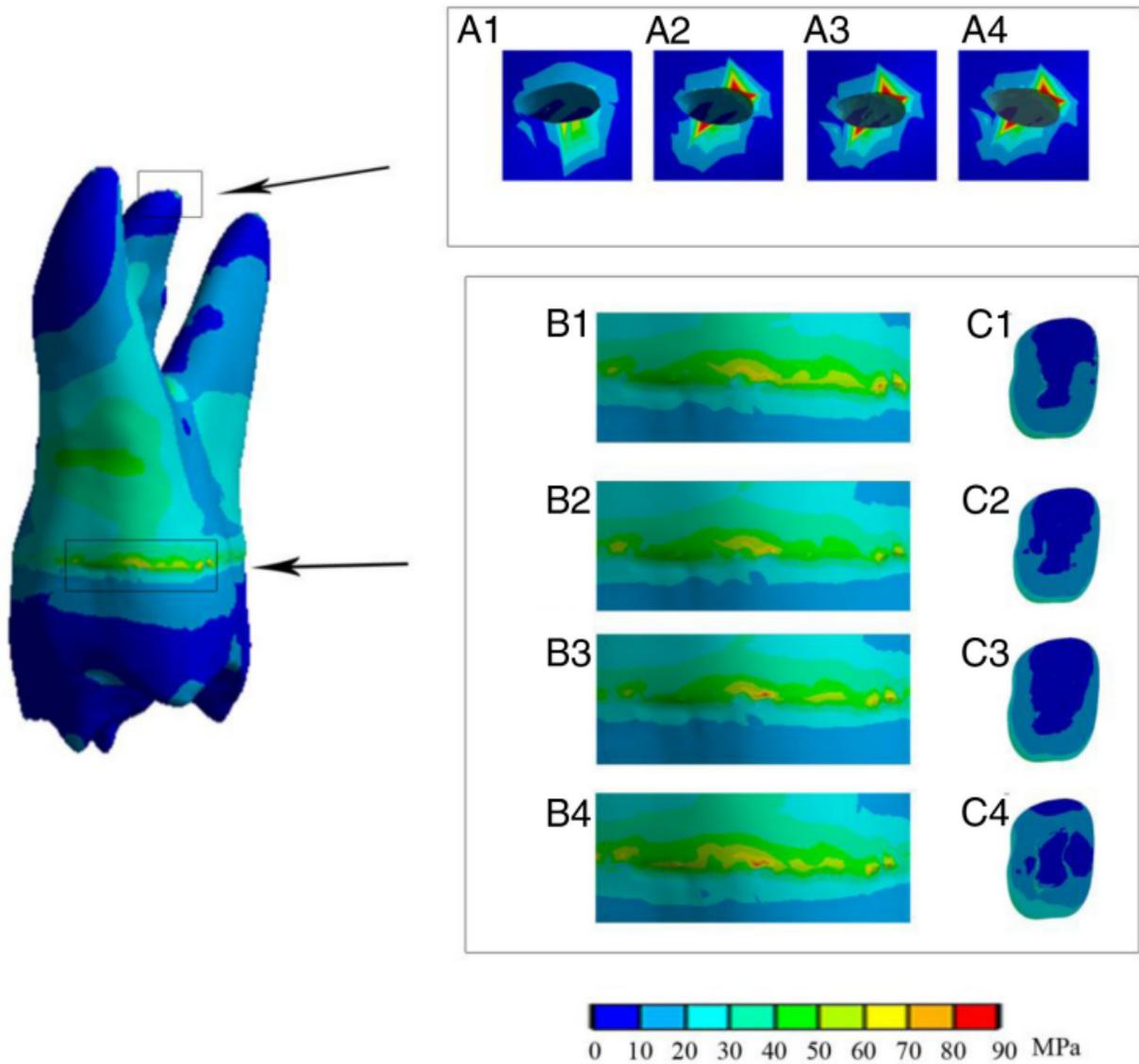
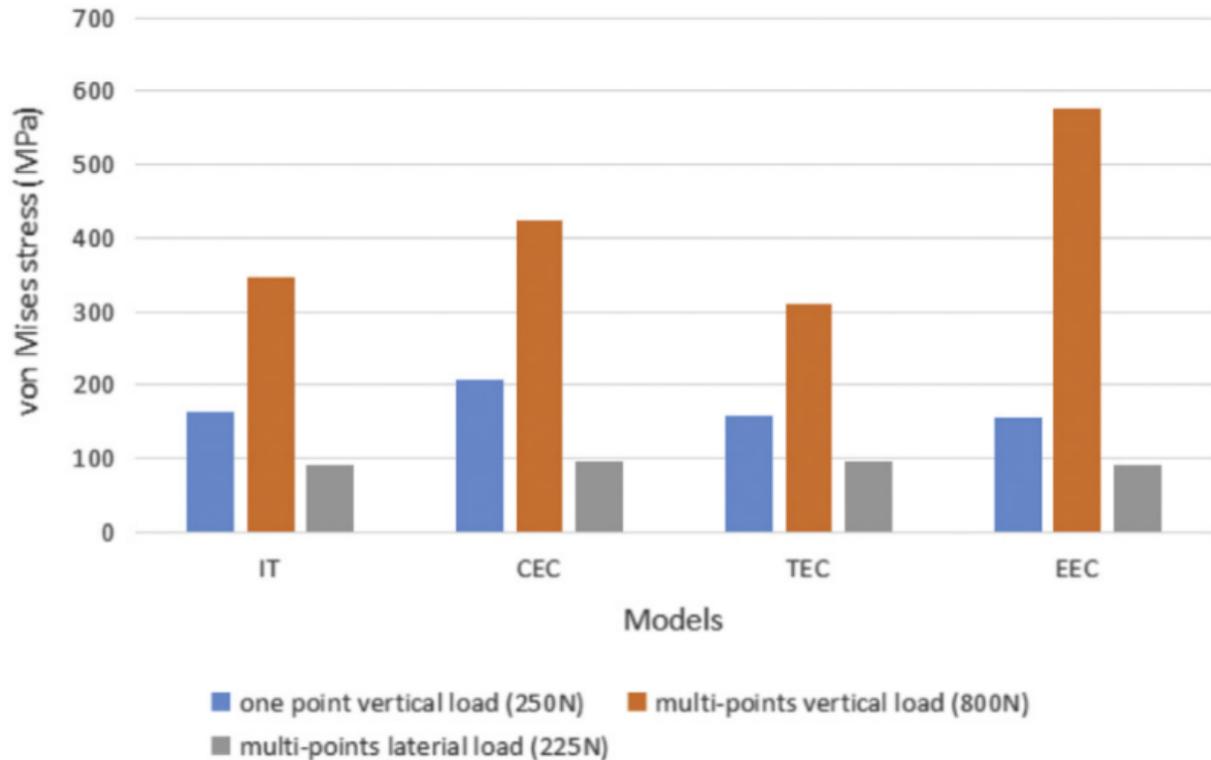


Figura 2.17: Distribución de esfuerzos de Von Mises [MPa] en la zona apical y pericervical aplicando una fuerza total de 800N aplicada en 5 puntos. (1-4) Diente intacto, acceso endodóntico conservativo, tradicional y extendido respectivamente. (A) Zona apical. (B) Zona pericervical. (C) Plano de corte al nivel de la unión cemento-esmalte.

Y una tabla resumen de los resultados se puede observar en 2.3

Tabla 2.3: Máximo esfuerzo Von Mises [MPa]



En este estudio se concluyó que los valores máximos de esfuerzo en la superficie oclusal fueron similares entre los diferentes accesos CEC, TEC y EEC. Sin embargo, el modelo CEC, que conservó una mayor cantidad de tejido duro coronal, puede preservar una mejor resistencia a la fractura. En todos los modelos, a medida que aumentaba el volumen de la cavidad, las tensiones en la región cervical están más concentradas. Por lo tanto, el modelo CEC podría reducir la distribución de esfuerzo en la estructura cervical.

Cabe mencionar que este estudio utiliza como esfuerzo de interés, el esfuerzo de Von Mises el cual no es adecuado al estar estudiando materiales frágiles. Además las conclusiones a las que llega no tienen relación directa con sus resultados, al observar la tabla 2.3 se puede observar que el acceso endodóntico tradicional percibe los menores esfuerzos tanto en la carga vertical de 250N así como también en la carga de 800N, mientras que para la carga de 225N no posee diferencia significativa.

2.4.2. Stress distribution in a premolar 3D model with anisotropic and isotropic enamel [12]

Este estudio realiza un análisis anisotrópico e isotrópico del esmalte dental en un premolar maxilar sano. Para el análisis isotrópico utiliza las propiedades mecánicas de la tabla 2.4. Para el análisis anisotrópico asume el esmalte como ortotrópico y utiliza coordenadas locales donde el módulo elástico en el eje 1 perpendicular a la superficie externa del esmalte es 80 GPa y para los ejes 2 y 3 que forman un plano perpendicular con eje 1 el módulo elástico es 40 GPa. Se puede observar en la figura 2.18.

Tabla 2.4: Propiedades mecánicas isotrópicas elásticas de los materiales utilizados.

Properties			
Material	E (MPa)	ν	References
Enamel	80×10^3	0.33	Rees and Jacobsen [22]
Dentin	$14,7 \times 10^3$	0.31	Sano et al. [25]
Periodontal ligament	50	0.45	Rees and Jacobsen [22]
Cortical bone	$13,7 \times 10^3$	0.30	Benzing et al. [2]
Trabecular bone	$1,37 \times 10^3$	0.30	Benzing et al. [2]

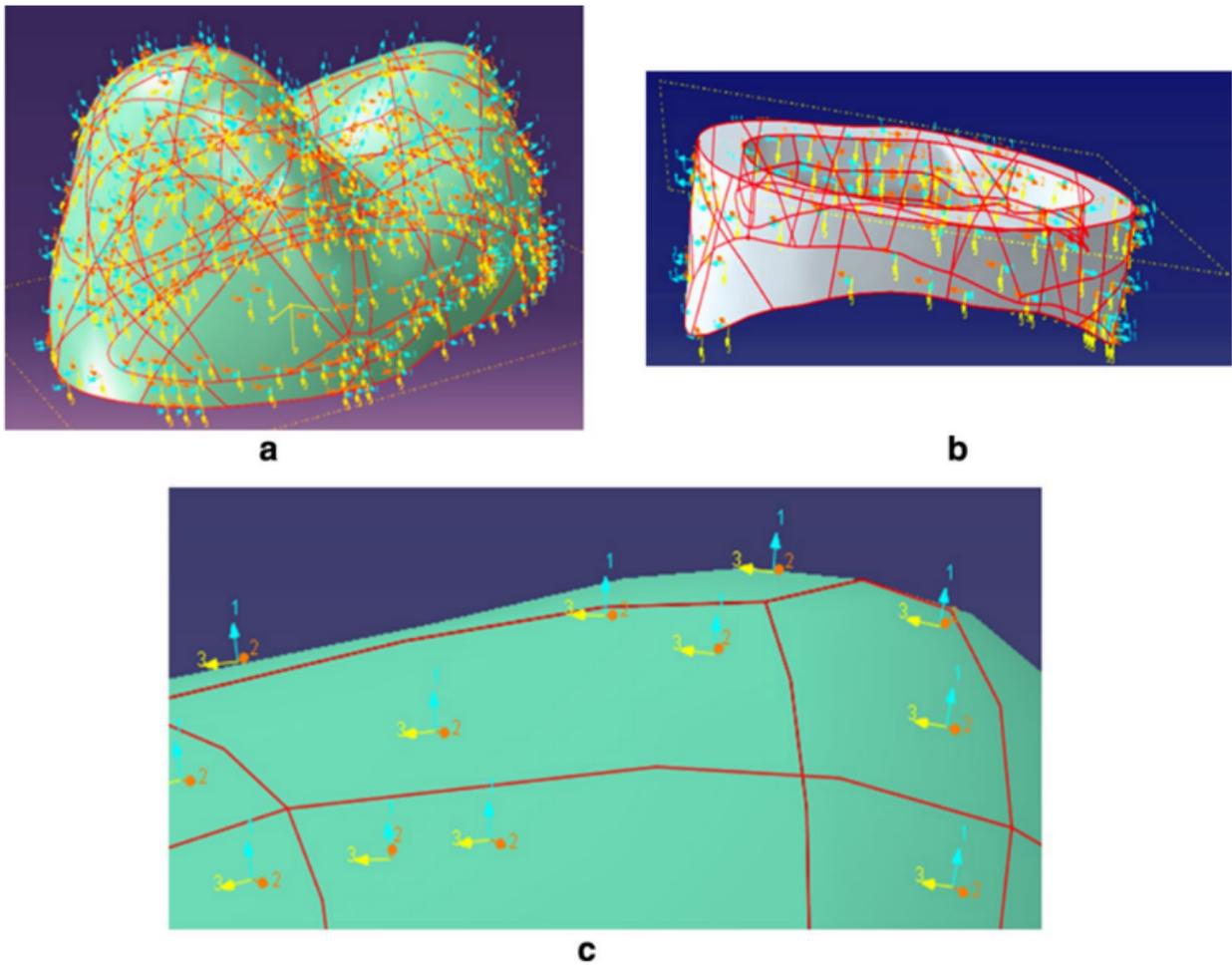


Figura 2.18: Orientación de las coordenadas locales para el modelo anisotrópico del esmalte.

Las cargas aplicadas en este estudio se pueden ver en la figura 2.19

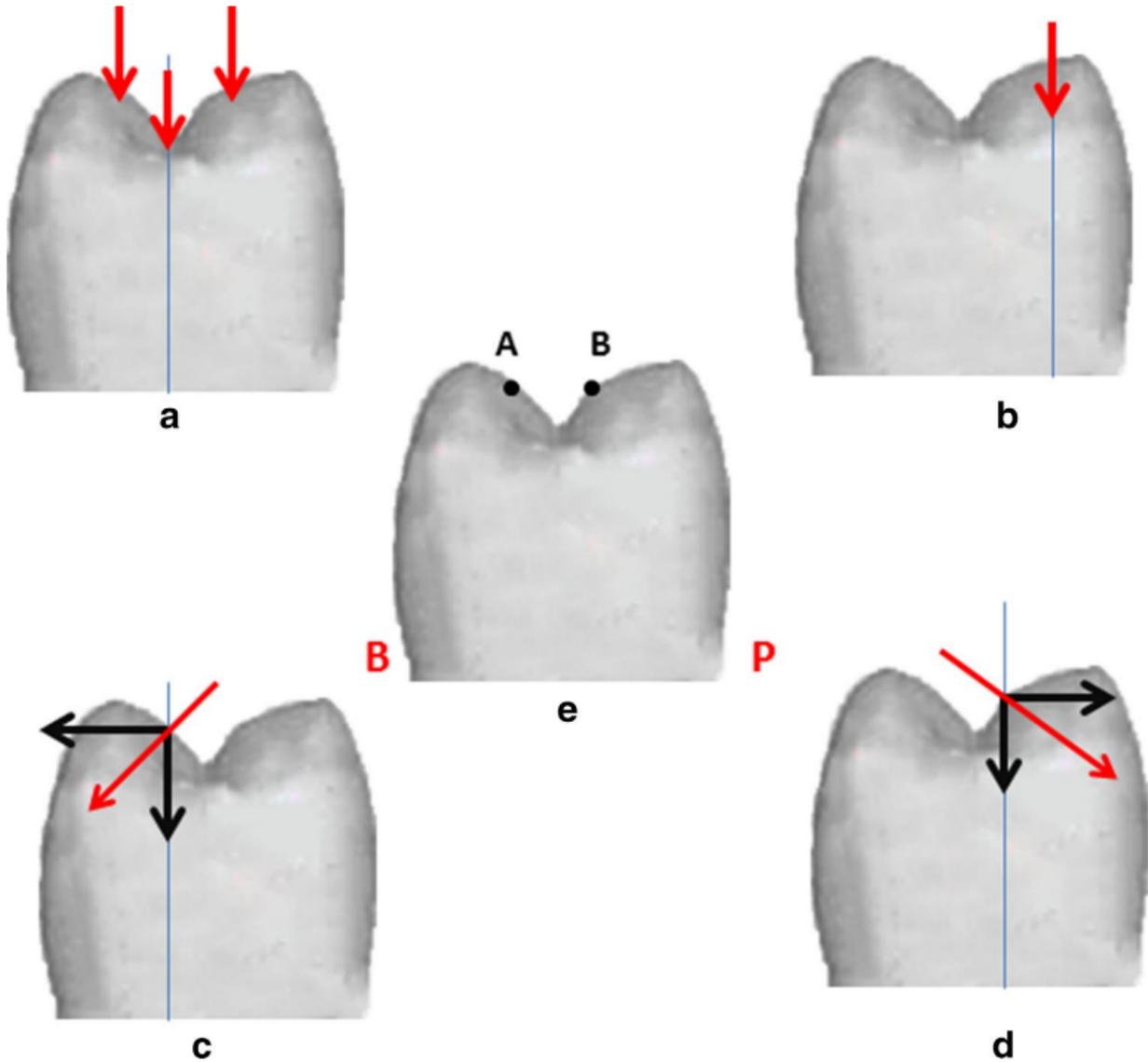


Figura 2.19: (a) Carga 1: Carga de 90 N dividida en 3 zonas. (b) Carga 2: Carga de 90 N en solo una cúspide. (c) Carga 3: Carga oblicua de 45 N en un ángulo de 45° aplicada en la cúspide vestibular. (d) Carga 4: Carga oblicua de 45 N en un ángulo de 45° aplicada en la cúspide palatal. (e) Puntos de contacto, A y B. B: Vestibular P:Palatal.

Tabla 2.5: Máximo estrés principal obtenido en los modelos isotrópicos e anisotrópicos.

	S. max. principal (MPa)								
	Enamel			Enamel–dentin junction (EDJ)			Dentin		
	Anisotropic	Isotropic	Difference (%)	Anisotropic	Isotropic	Difference (%)	Anisotropic	Isotropic	Difference (%)
Loading I	+16.00	+18.00	11.11	+2.20	+3.04	27.63	+9.19	+9.18	0.10
Loading II	+16.00	+20.00	20.00	+2.81	+4.68	39.96	+15.00	+11.10	26.00
Loading III	+8.00	+15.00	46.66	+1.68	+4.36	61.47	+12.79	+8.79	31.27
Loading IV	+13.00	+15.00	13.33	+1.52	+3.12	51.28	+16.38	+12.37	24.48

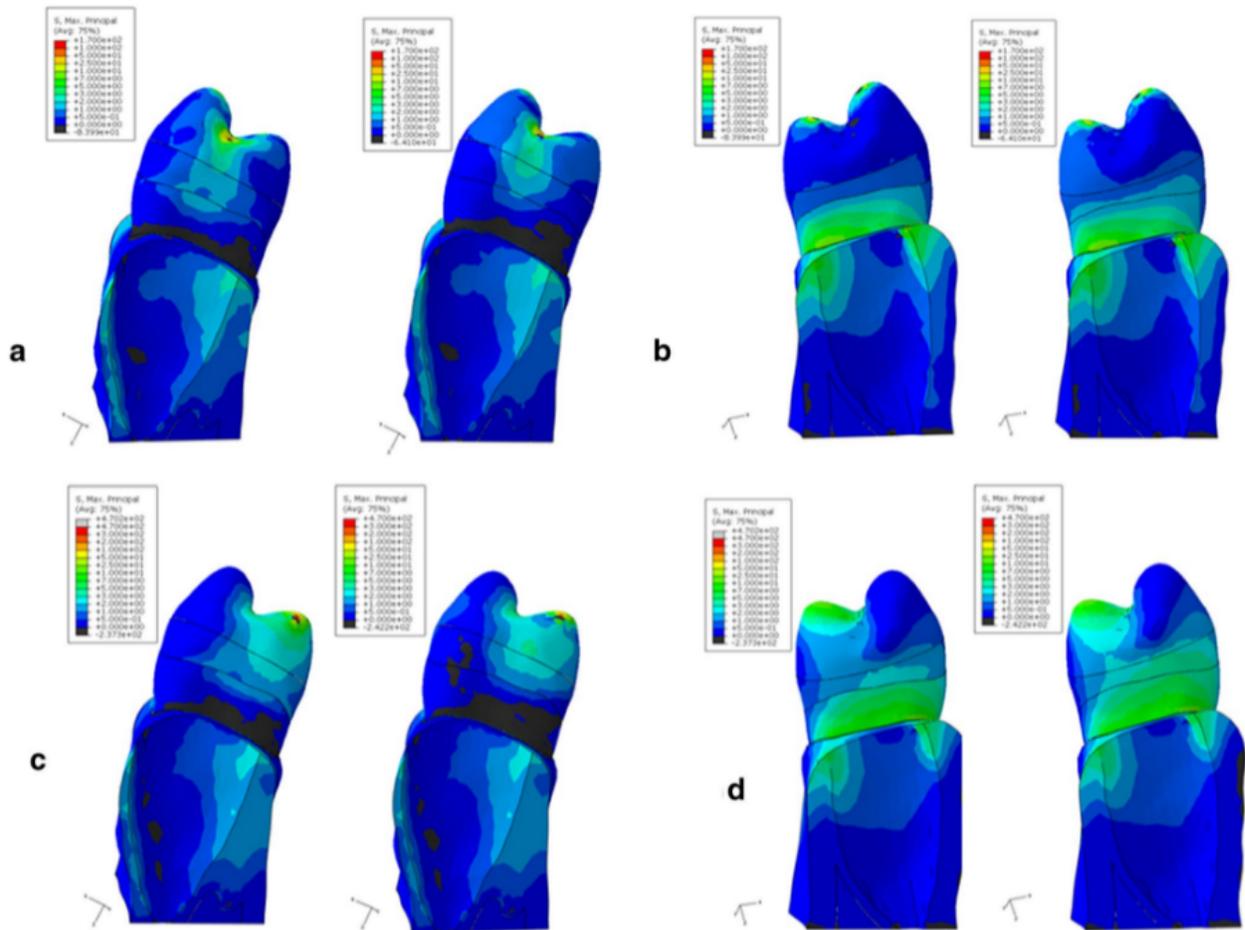


Figura 2.20: Máximo estrés principal obtenido en los modelos isotrópicos e anisotrópicos. Modelo isotrópico a la izquierda, modelo anisotrópico a la derecha. (a) Carga 1, vista mesial. (b) Carga 1, vista distal. (c) Carga 2, vista mesial. (d) Carga 2 vista distal.

Este estudio concluye que los esfuerzos de tracci3n generados por las aplicaciones de cargas axiales y oblicuas en modelos isotrópicos fue mayor que en los modelos anisotrópicos, pero la distribuci3n del esfuerzo fue similar.

La distribuci3n del esfuerzo fue más favorable bajo cargas axiales. En los modelos alrededor de las cargas, los esfuerzos fueron predominantemente compresivos y de tracci3n en el lado opuesto. Sin embargo, las cargas oblicuas dieron como resultado valores de esfuerzos más altos que se concentran principalmente en la zona cervical del diente y en la inserci3n del hueso trabecular. Por lo tanto, la mayor concentraci3n de esfuerzo fue en el área cervical del esmalte. Bajo estos resultados se incita a utilizar modelos anisotrópicos para evaluaciones del esmalte, antes del isotrópico en FEM.

Cabe mencionar que si bien modelan el esmalte dental como material ortotrópico, solo mencionan los m3dulos elásticos en las distintas coordenadas sin mencionar ni referenciar, los m3dulos de corte en los diferentes planos ni los coeficiente de Poisson, con lo que sin estos datos es imposible modelar ortotr picamente el material.

2.4.3. Tooth fracture risk analysis based on a new finite element dental structure models using micro-CT data [14]

Este estudio analiza el riesgo de fractura en un diente molar con diferentes ensanchamientos de los conductos radiculares en tratamientos endodónticos.

Lo interesante de este estudio es que a través de imágenes micro-ct logran obtener un mapa de las densidades de los materiales. Pudiendo así modelar el diente sin necesidad de separar la dentina del esmalte sino que generando un mapa de propiedades mecánicas en la geometría según la densidad presente en esa zona. Logrando así un modelo heterogéneo y con condiciones de contacto perfectas, al no necesitarlas.

El mapa de las distribuciones se puede observar en la figura 2.21

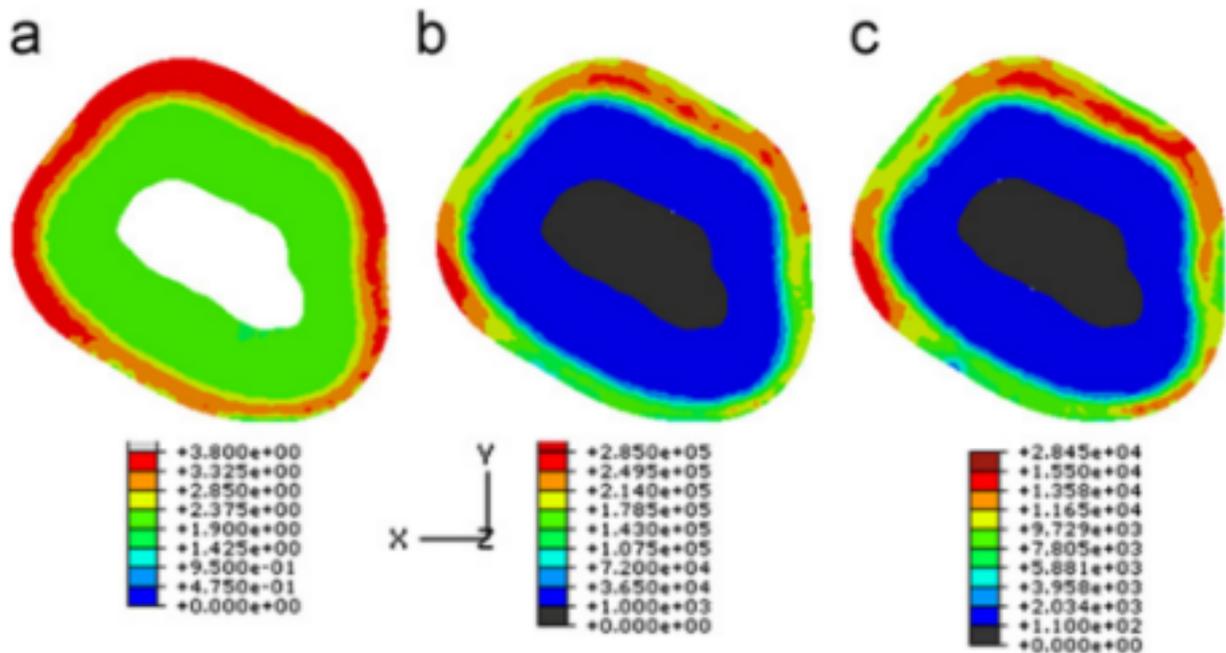


Figura 2.21: Distribución de propiedades del material en un plano. (a) Densidad [gr/cm^3]. (b) Módulo de Young [MPa]. (c) Esfuerzo de fluencia [MPa]

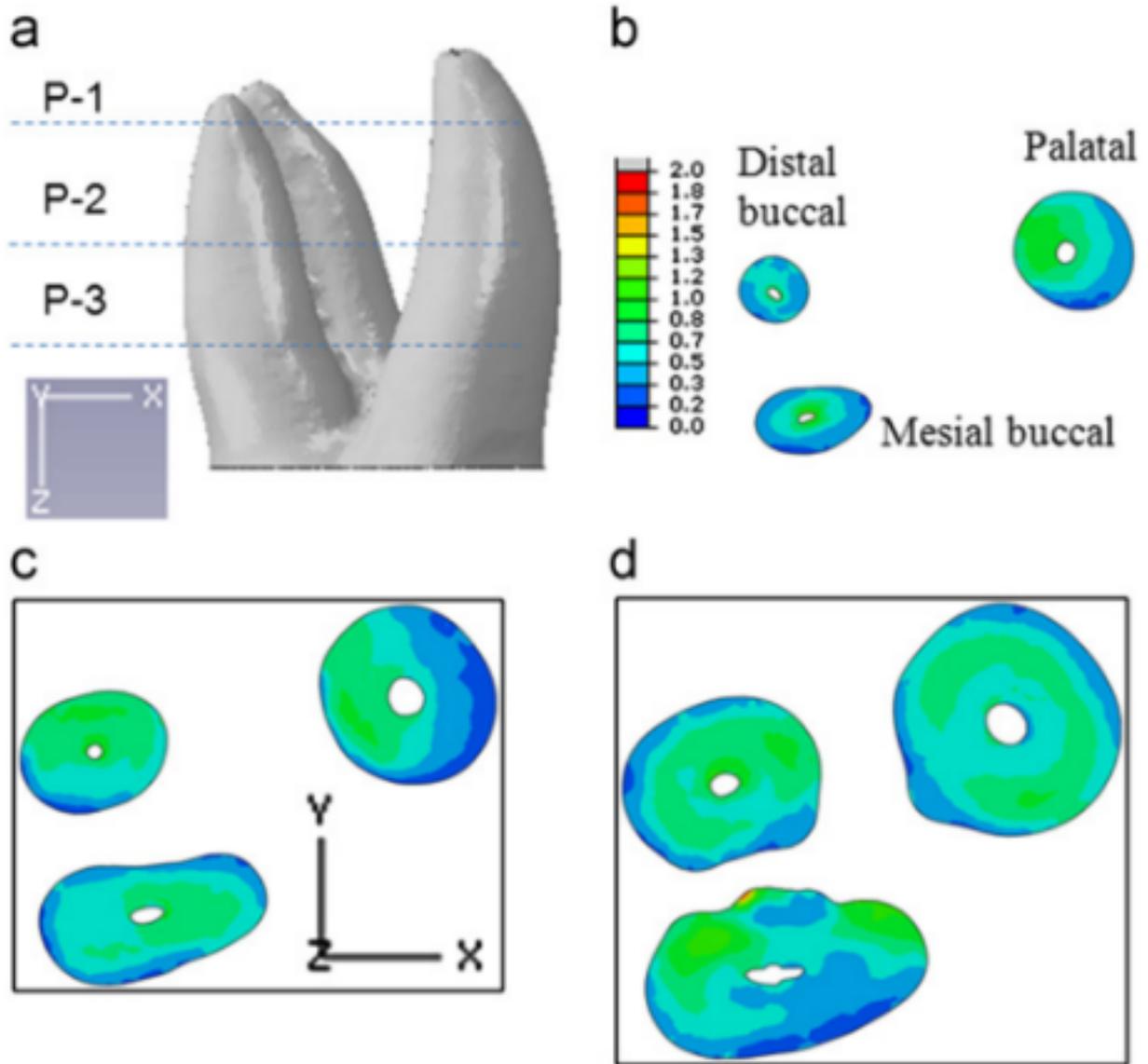


Figura 2.22: Distribución de esfuerzos de Von Mises a través de tres raíces con 0.04 táper bajo condiciones de carga normal. (a) Posiciones de los tres planos. (b) Distribución en el primer plano. (c) Distribución en el segundo plano. (d) Distribución en el tercer plano.

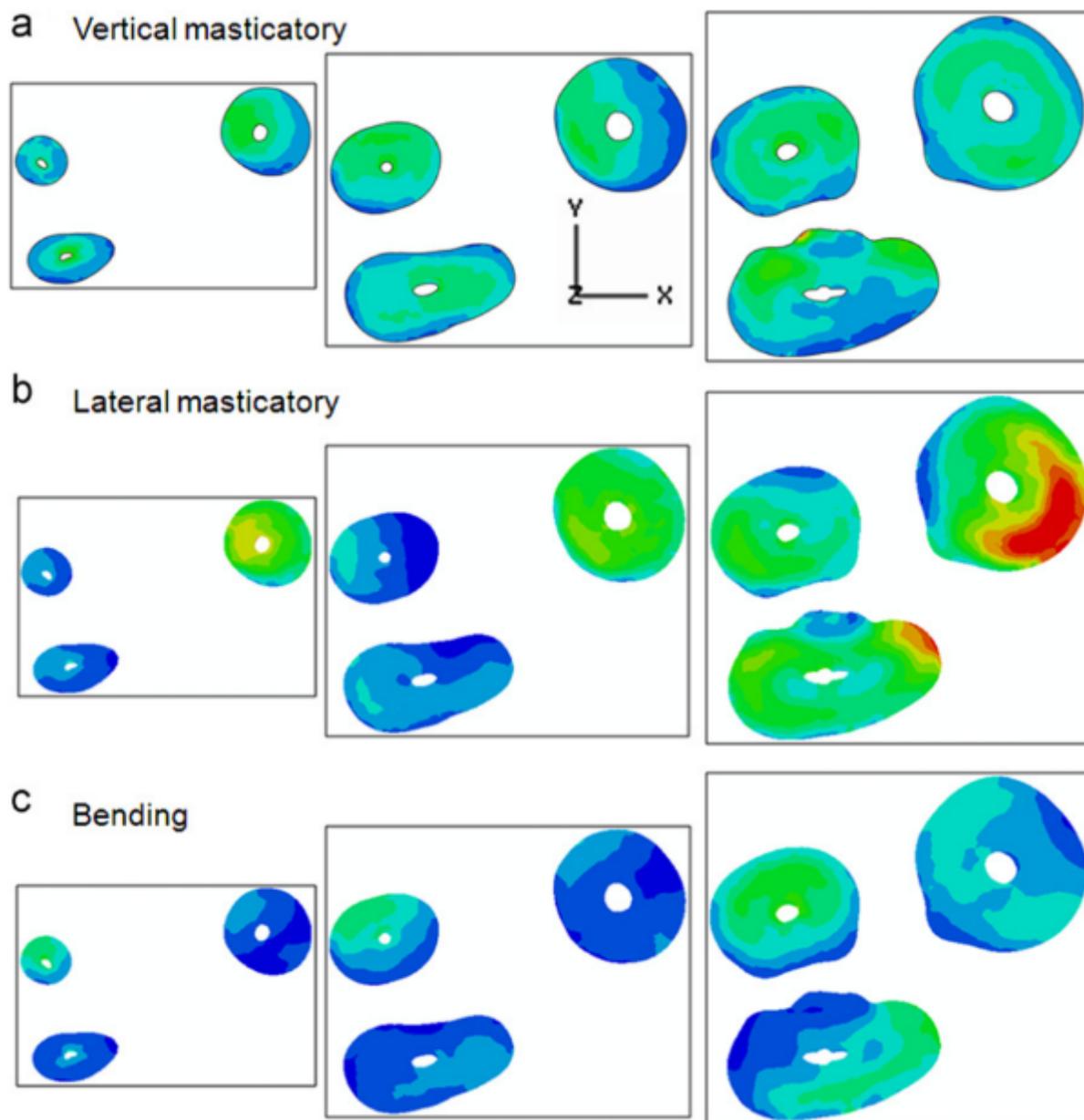


Figura 2.23: Distribución de esfuerzos de Von Mises a través de tres raíces para tres condiciones de cargas distintas. (a) Carga normal. (b) Carga oblicua 45°. (c) Torsional.

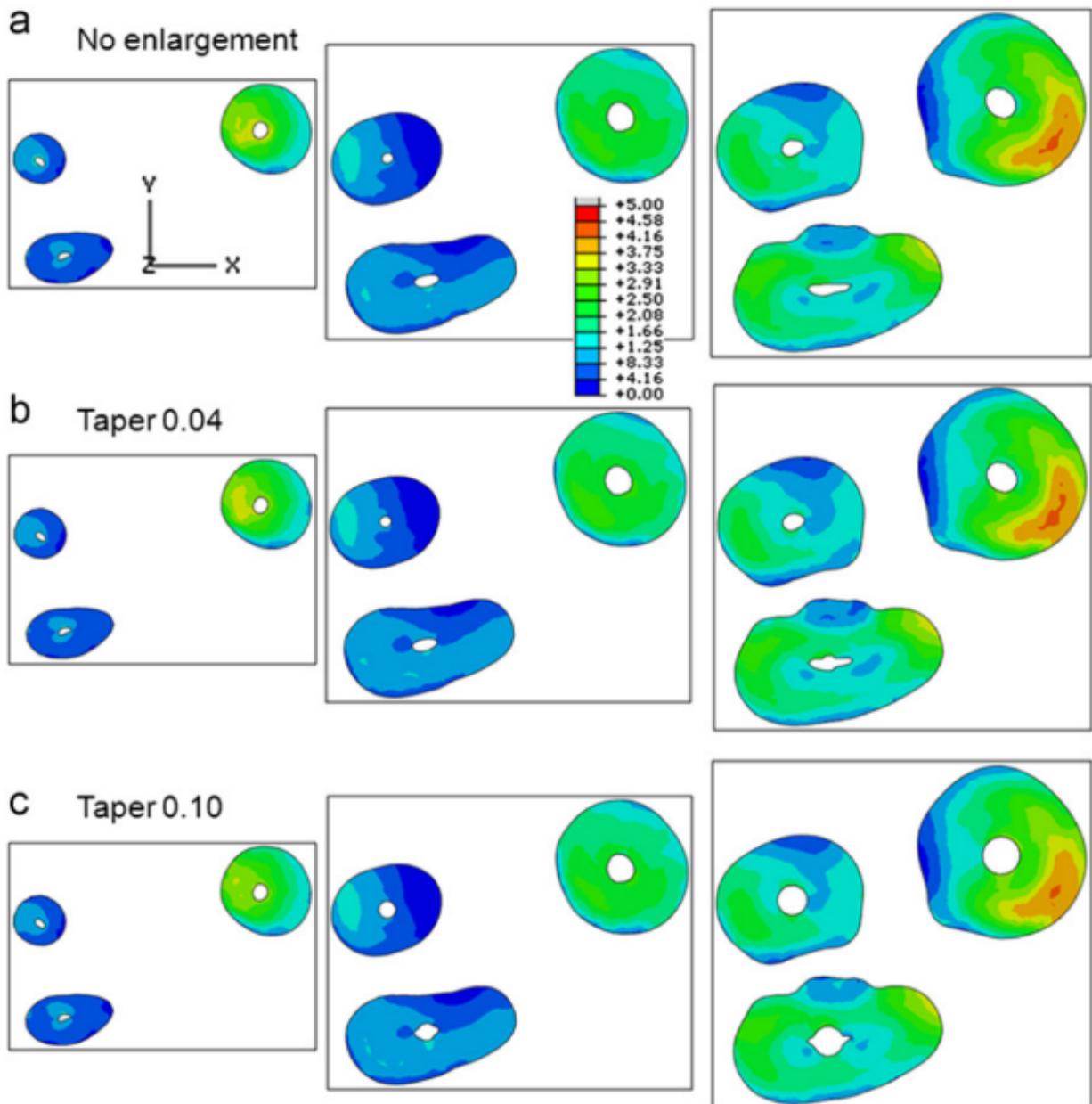


Figura 2.24: Distribución de esfuerzos de Von Mises con carga oblicua a través de tres raíces con tres tapers distintos. (a) Sin ensanchamiento. (b) Taper 0.04. (c) Taper 0.10.

Las conclusiones que obtiene este estudio son que se logra proponer un nuevo método para incorporar la heterogeneidad de los propiedades de los materiales de los dientes a un modelo de elementos finitos usando datos de micro-ct.

2.5. Estudio de validación

El estudio que se utilizará para la validación del modelo corresponde al caso 1 de *Comparison of occlusal loading conditions in a lower second premolar using three-dimensional finite*

element analysis [6].

Se utiliza este estudio porque utiliza como modelo un diente premolar inferior al igual que se utiliza en este trabajo de título. Esta investigación compara la distribución de esfuerzos para distintas condiciones de cargas, pero en nuestro caso ocuparemos la primera.

La tabla 2.6 muestra las propiedades mecánicas utilizadas en este estudio.

Tabla 2.6: Propiedades isotrópicas elásticas de los materiales

Material	E^b (GPa)	Poisson's ratio
Enamel	84.1	0.3
Dentine	18.6	0.31
Pulp	0.002	0.45
PDL	0.0689	0.45
Alveolar bone	11.5	0.3
Cortical bone	13.7	0.3

El caso 1 corresponde a una carga puntual de 100 N aplicada en la fosa mesio-distal, entre ambas cúspides principales. Los resultados se presentan en la figura 2.25

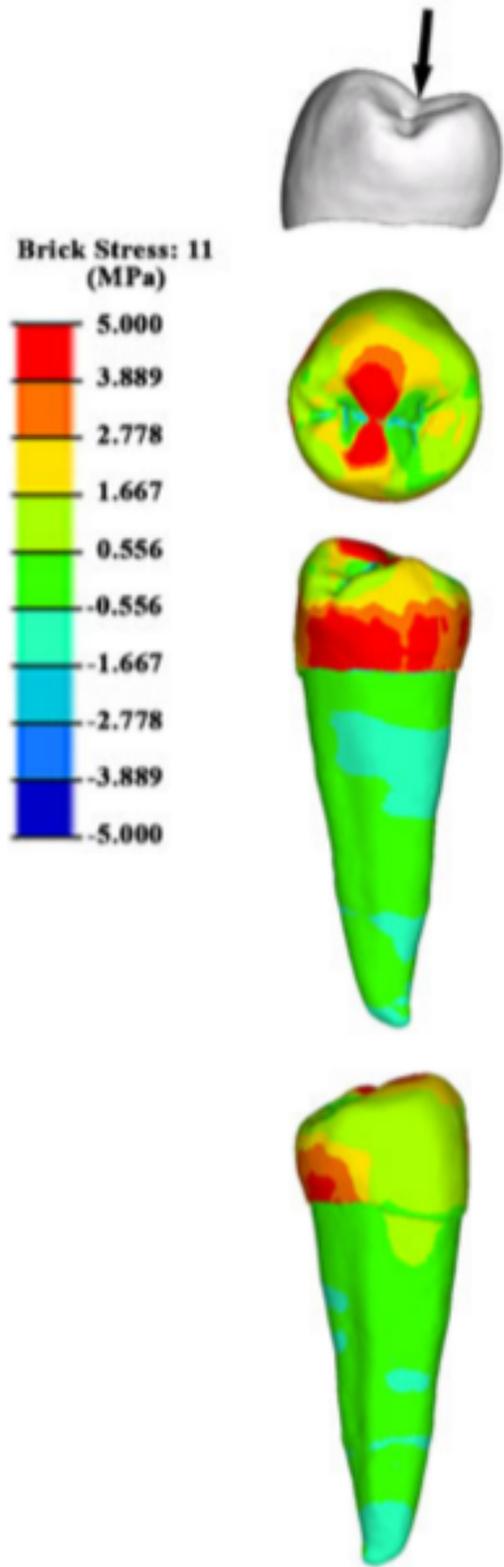


Figura 2.25: Esfuerzo máximo principal [MPa].

Capítulo 3

Metodología

En la figura 3.1 se puede observar gráficamente la metodología aplicada.

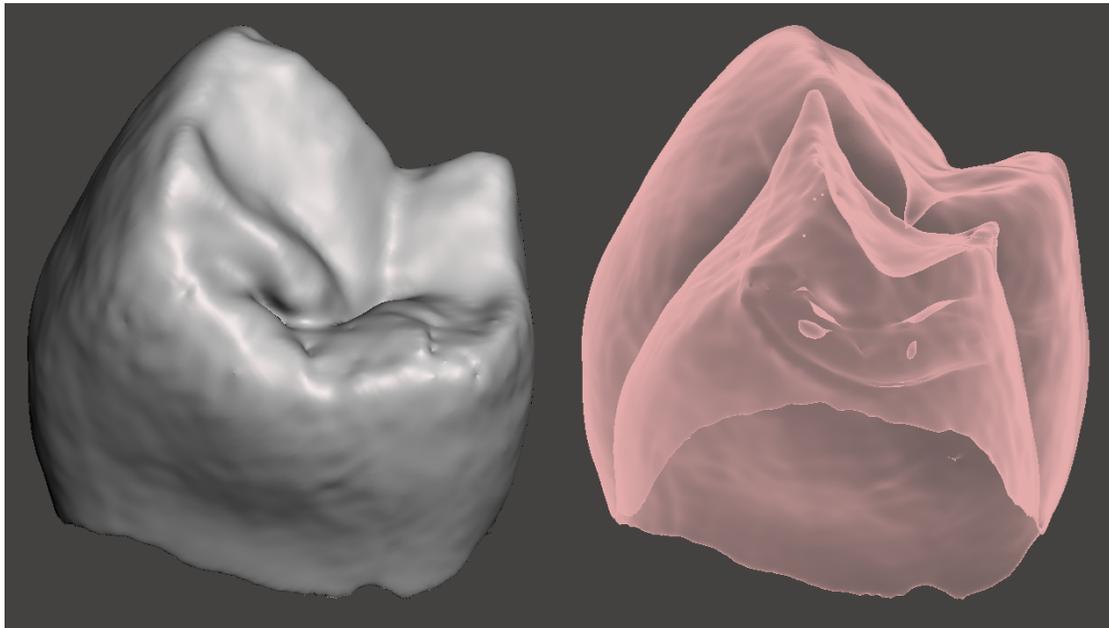


Figura 3.1: Metodología

3.1. Carga de geometrías a través de las microtomografías computarizadas

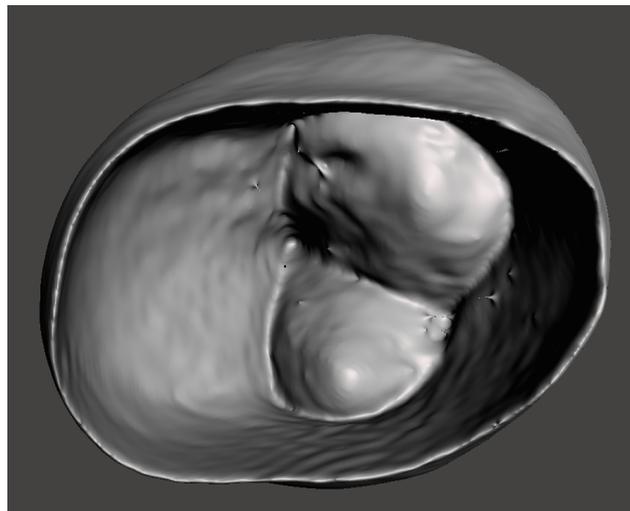
Las microtomografías computarizadas del esmalte, la dentina y la pulpa se encuentran ya procesadas, de tal manera que están presentes en formato .stl.

Éstas son cargadas al software *Autodesk Meshmixer* el cual permite observar las geometrías y modificarlas.



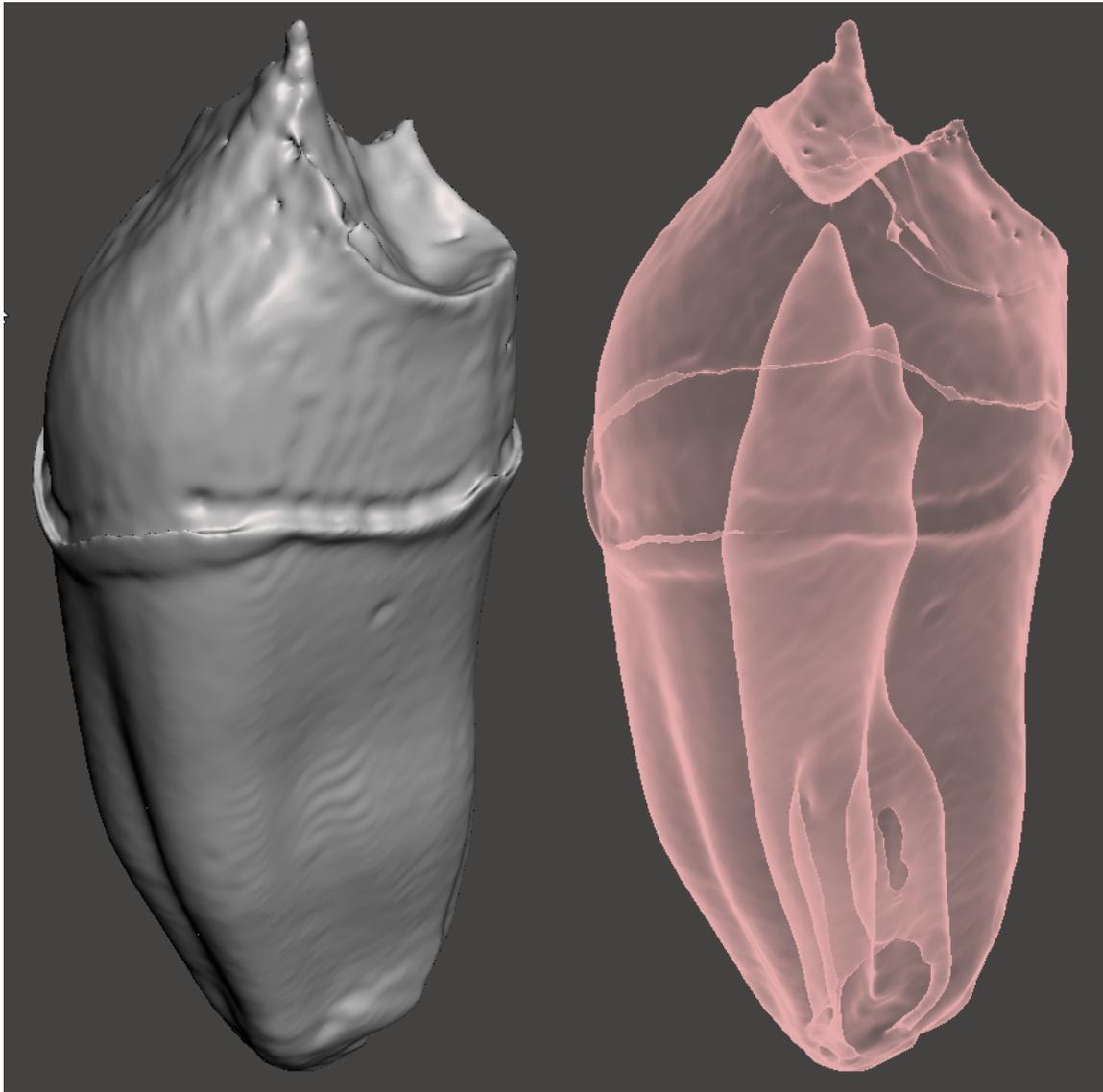
(a)

(b)



(c)

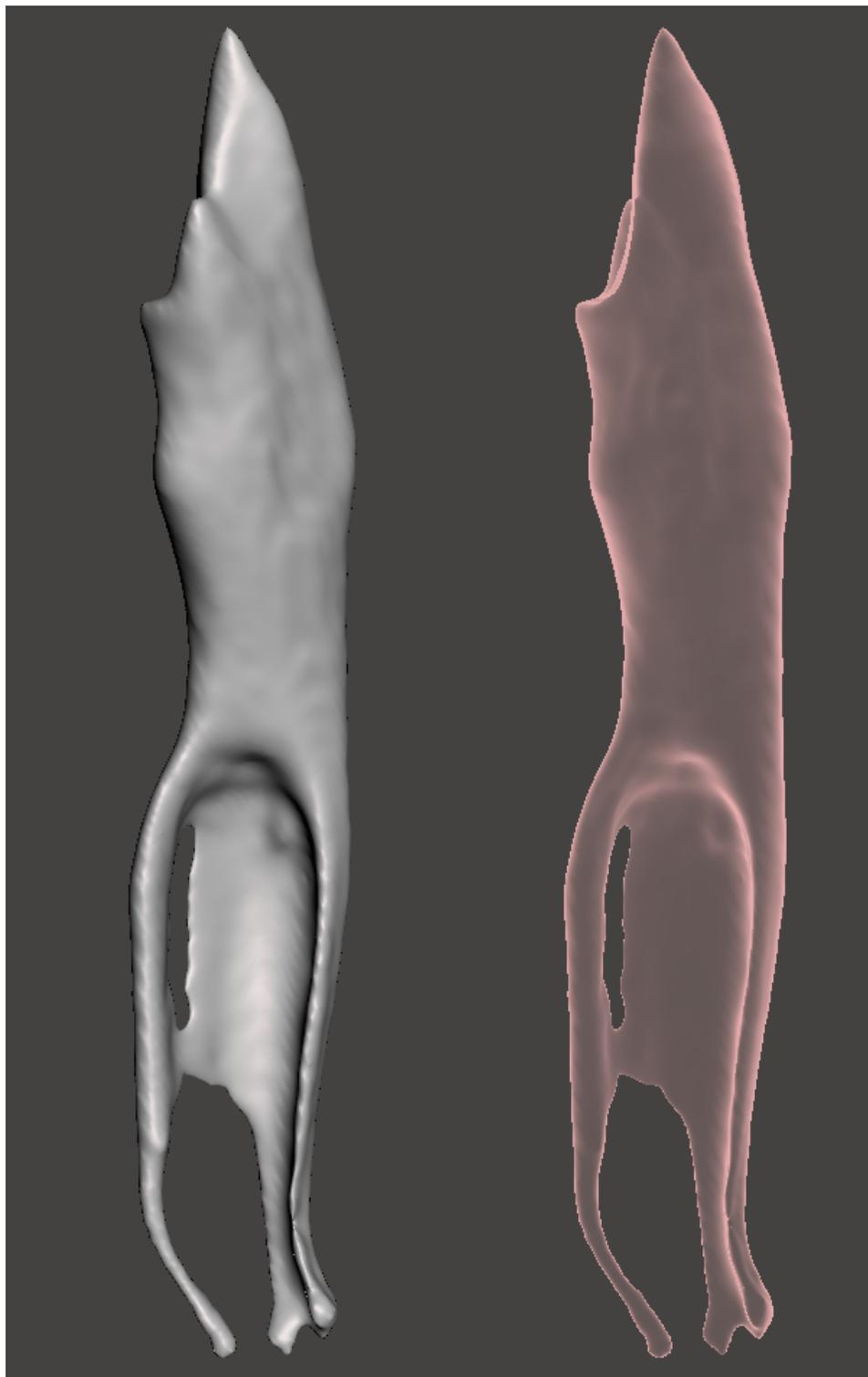
Figura 3.2: Geometrías del esmalte obtenidas de las micro-ct. (a) Vista isométrica mesial-oclusal. (b) Vista isométrica mesial-oclusal transparente. (c) Vista inferior.



(a)

(b)

Figura 3.3: Geometrías de la dentina obtenidas de las micro-ct.(a) Vista isométrica mesial-oclusal. (b) Vista isométrica mesial-oclusal transparente.



(a)

(b)

Figura 3.4: Geometrías de la pulpa obtenidas de las micro-ct. (a) Vista isométrica. (b) Vista isométrica transparente.

3.2. Arreglo de las geometrías

Como se puede observar en las imágenes, las geometrías presentan defectos los cuales son arreglados en el software, eliminando los puntos complejos y rehaciendo la malla en estas zonas además de aplicarle un suavizado a la superficie.

Para simplificar la geometría se adapta la pulpa para obtener solo un conducto radicular.

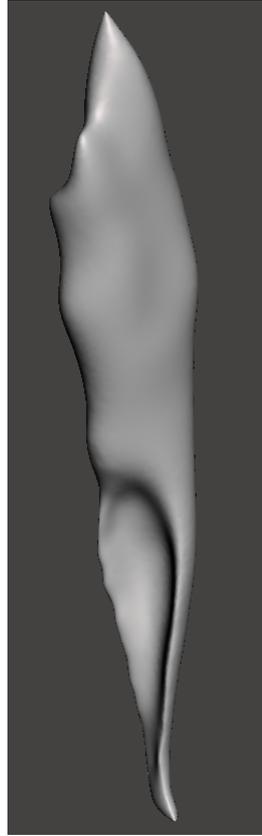
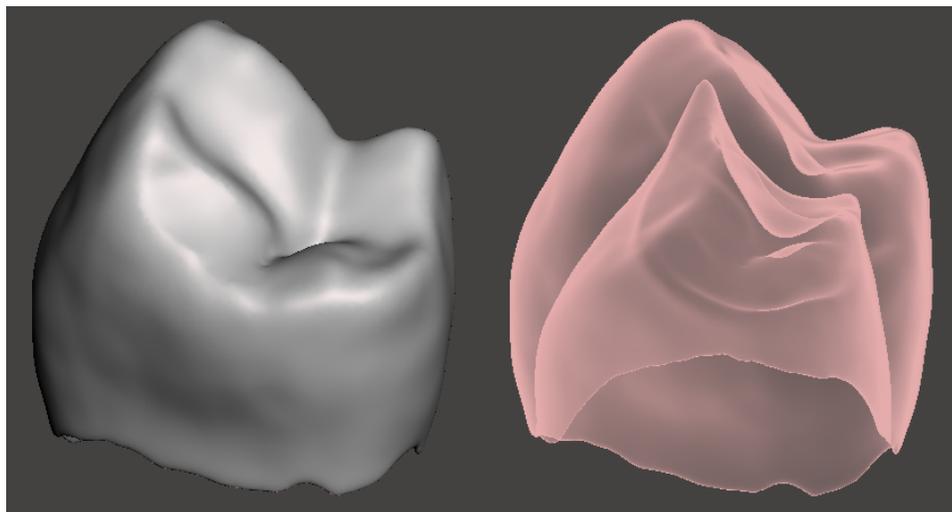


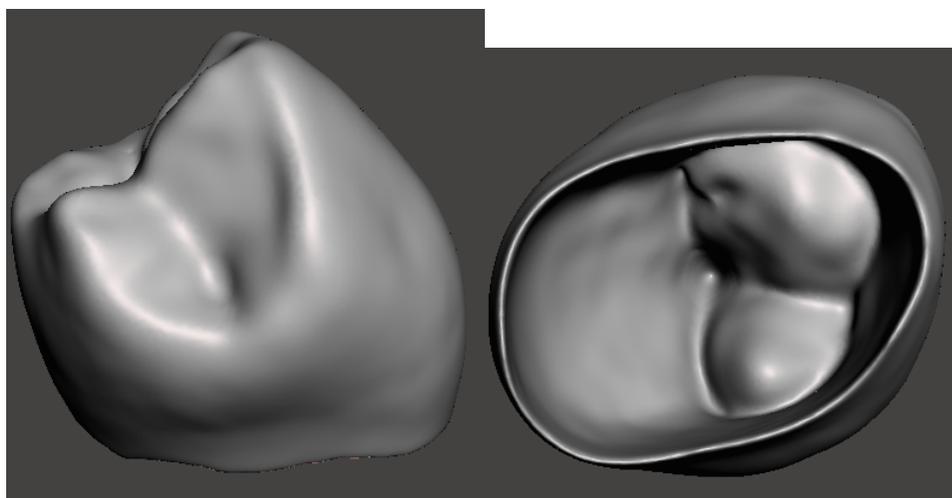
Figura 3.5: Pulpa modificada de un solo conducto

El esmalte es suavizado y eliminado de imperfecciones rehaciendo la malla en las zonas de conflicto. La dentina se hace sólida, y se le aplica una resta booleana con la pulpa para así obtener una geometría adecuada con los nuevos conductos. Además se proyecta la parte interior del esmalte reemplazando la parte superior de la dentina para así lograr un mejor contacto entre las superficies.



(a)

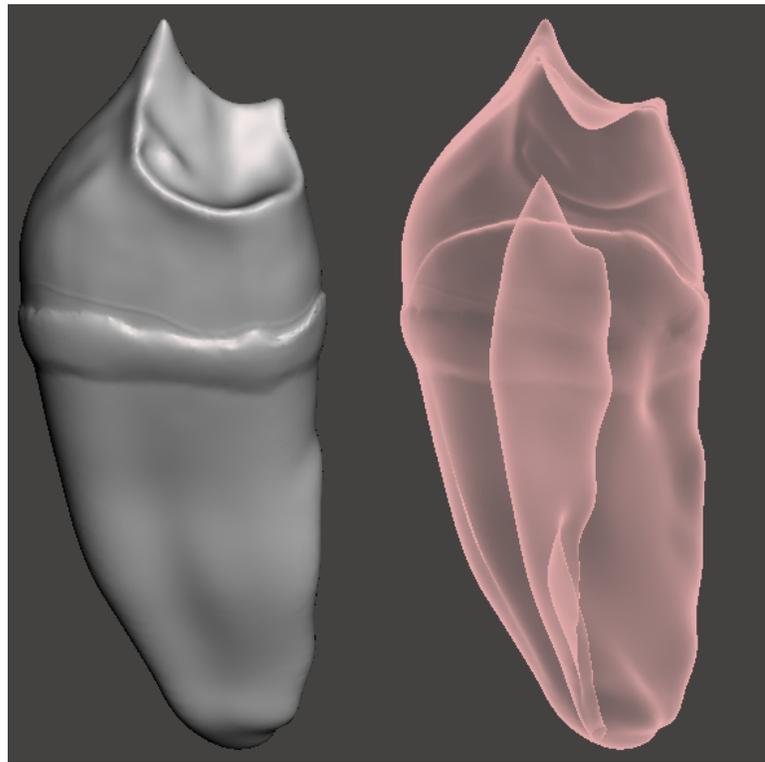
(b)



(c)

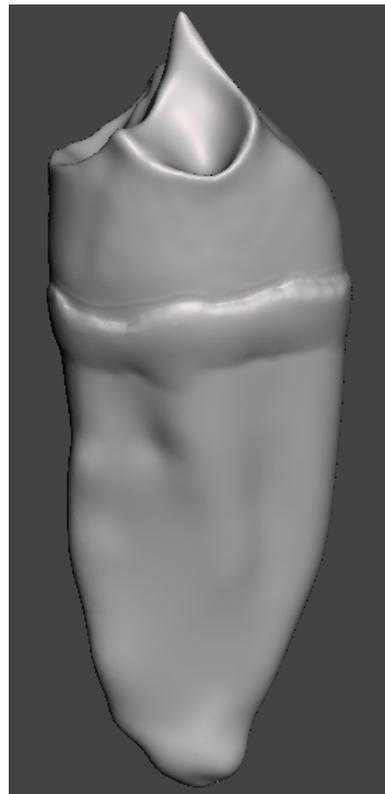
(d)

Figura 3.6: Esmalte modificado. (a) Vista isométrica mesial-oclusal. (b) Vista isométrica mesial-oclusal transparente. (c) Vista isométrica distal-oclusal. (d) Vista inferior



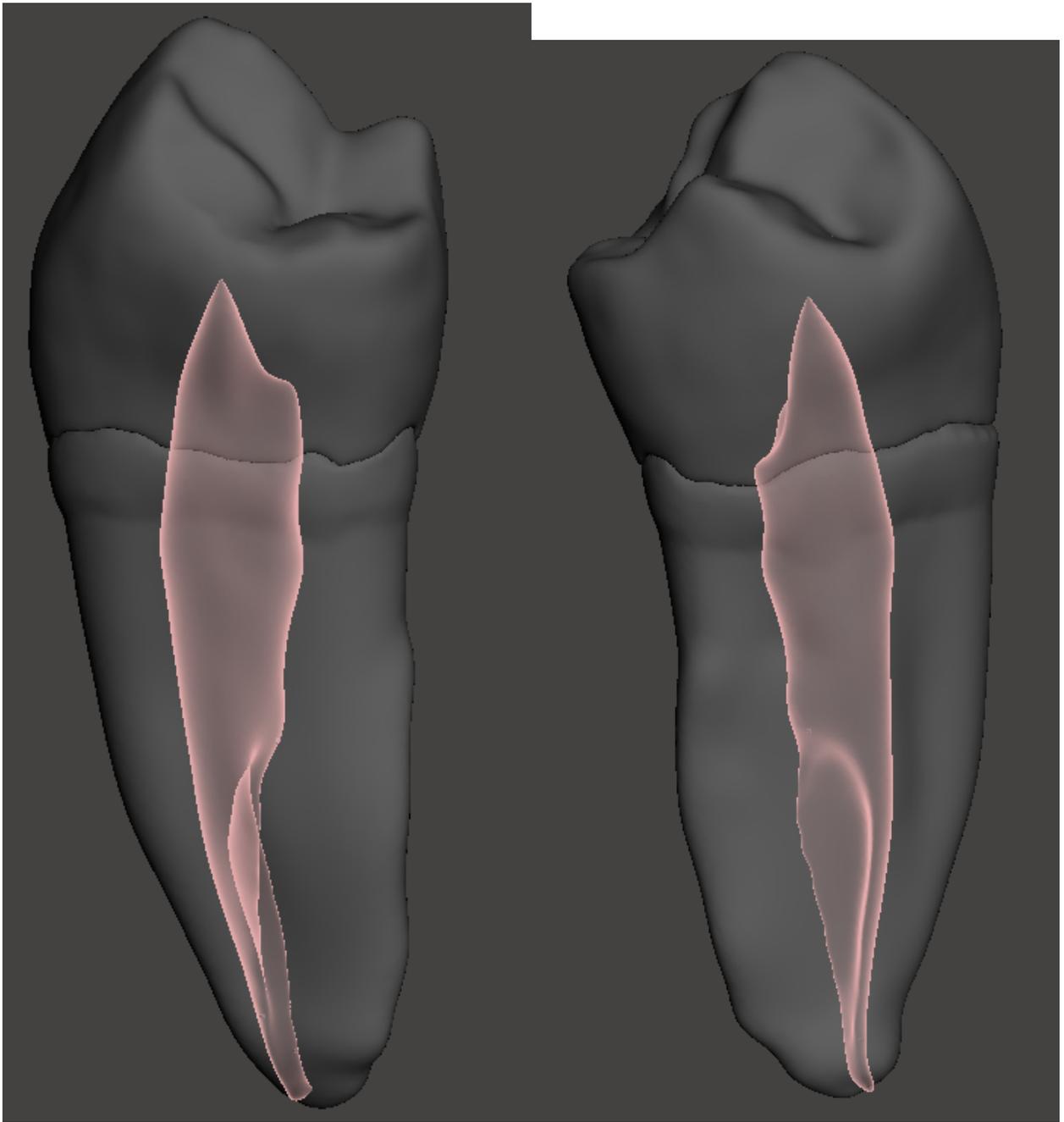
(a)

(b)



(c)

Figura 3.7: Dentina modificada. (a) Vista isométrica mesial-oclusal. (b) Vista isométrica mesial-oclusal transparente. (c) Vista isométrica distal-oclusal.



(a)

(b)

Figura 3.8: Diente modificado. (a) Vista isométrica mesial-oclusal. (b) Vista isométrica distal-oclusal.

3.3. Mallado en FeBio

Las geometrías son cargadas al software de análisis de elementos finito FeBio, y estas son malladas utilizando el generador de mallas *TetGen*. Si es que estas presentan algún error son revisadas nuevamente en el software *Autodesk Meshmixer* repitiendo los pasos anteriores hasta no obtener errores en el mallado.

La malla del esmalte se puede observar en la figura 3.9. Esta posee un total de 64684 nodos y 234900 elementos.

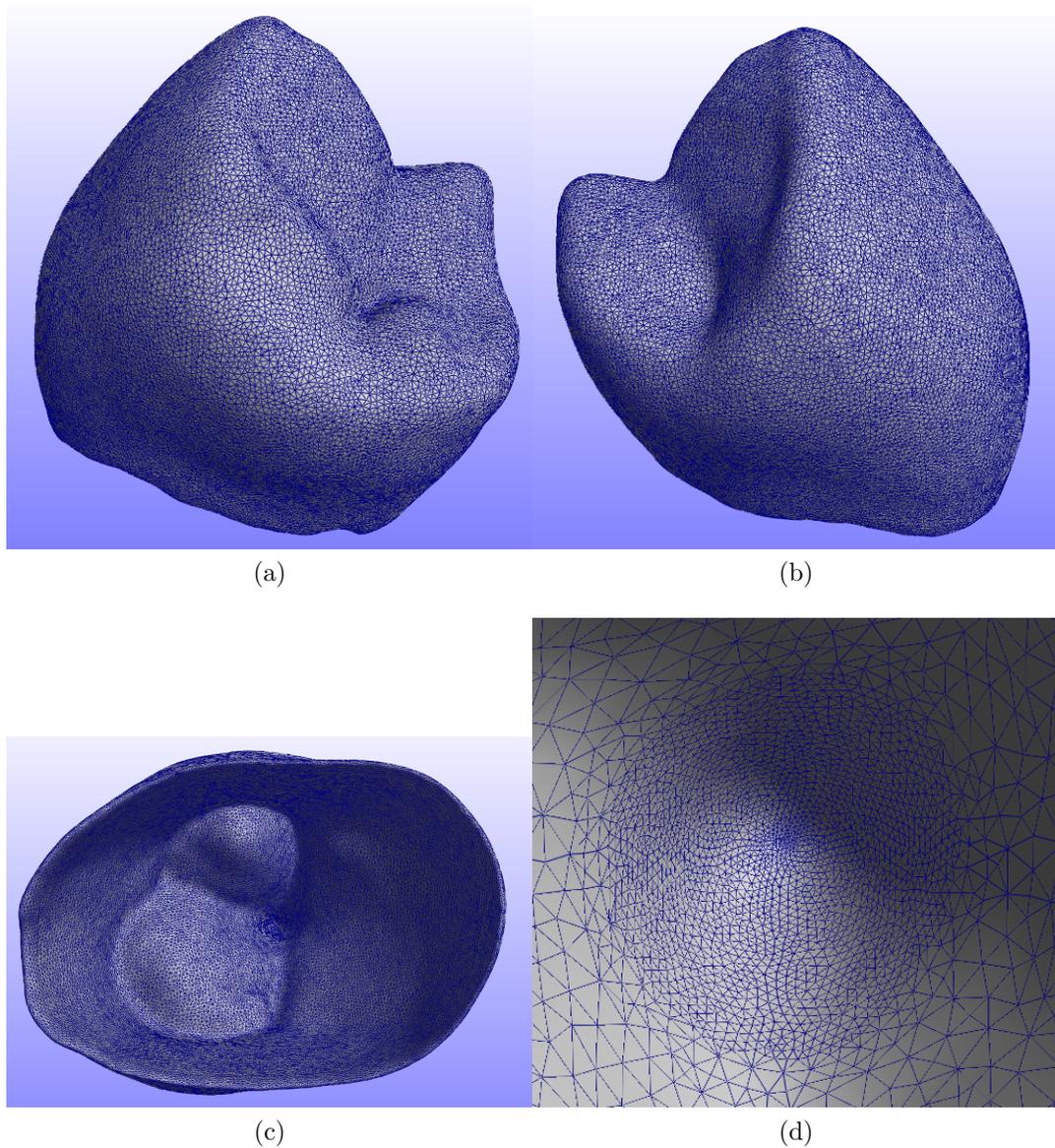
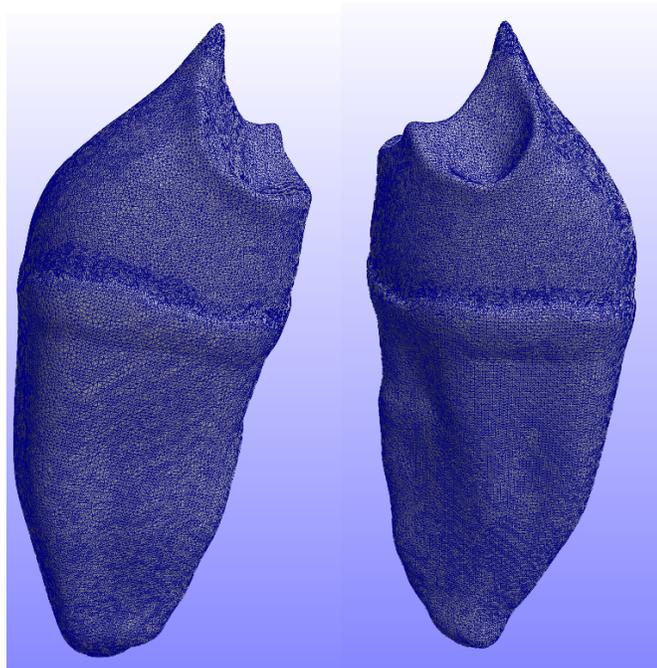


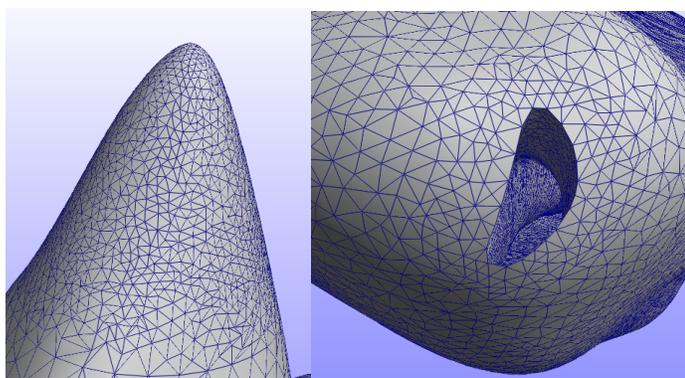
Figura 3.9: Mallado del esmalte. (a) Vista isométrica mesial-oclusal. (b) Vista isométrica distal-oclusal. (c) Vista inferior. (d) Detalle cúspide interior.

La malla de la dentina se puede observar en la figura 3.10. Esta posee un total de 81535 nodos y 301817 elementos.



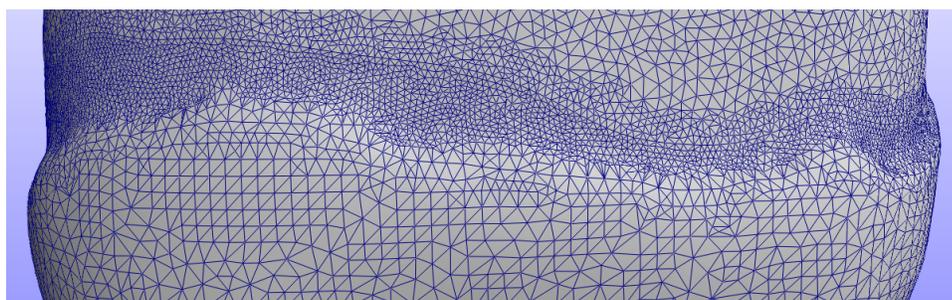
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

Figura 3.10: Mallado de la dentina. (a) Vista isométrica mesial-oclusal. (b) Vista isométrica distal-oclusal. (c) Vista inferior. (d) Detalle cúspide interior.

La malla de la pulpa se puede observar en la figura 3.11. Esta posee un total de 29333 nodos y 64664 elementos.

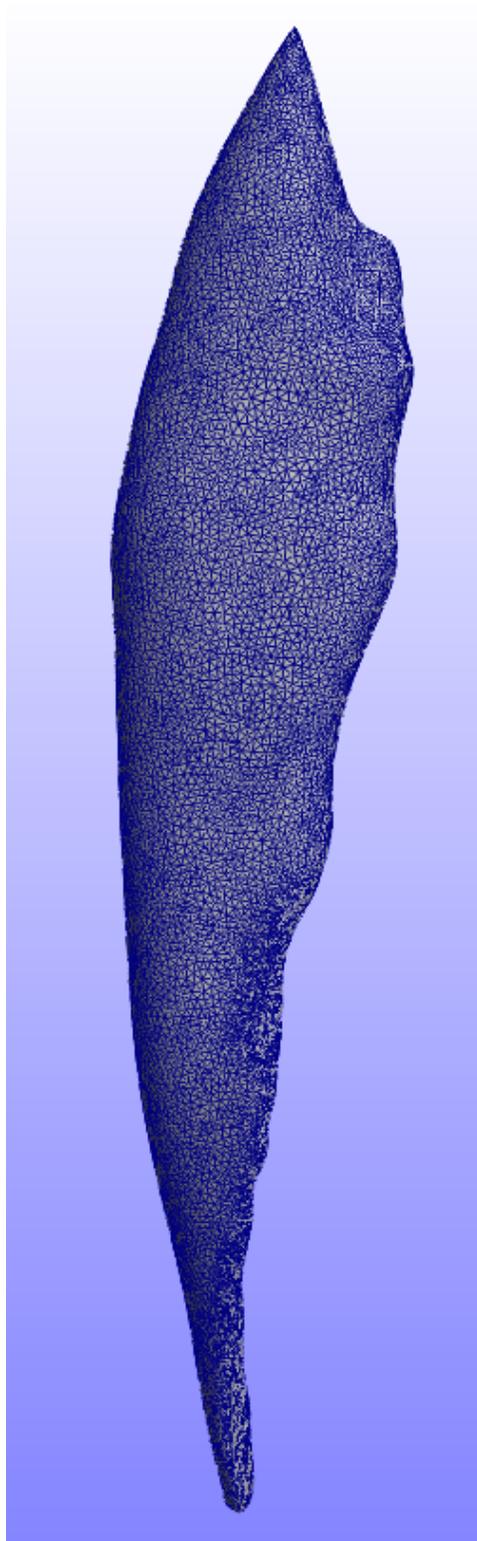


Figura 3.11: Mallado de la pulpa

3.4. Modelamiento del hueso trabecular, hueso cortical y ligamento periodontal

Una vez obtenidas las geometrías se genera alrededor de la dentina el hueso cortical y el hueso trabecular como se muestra en las figuras 3.12 y 3.13.

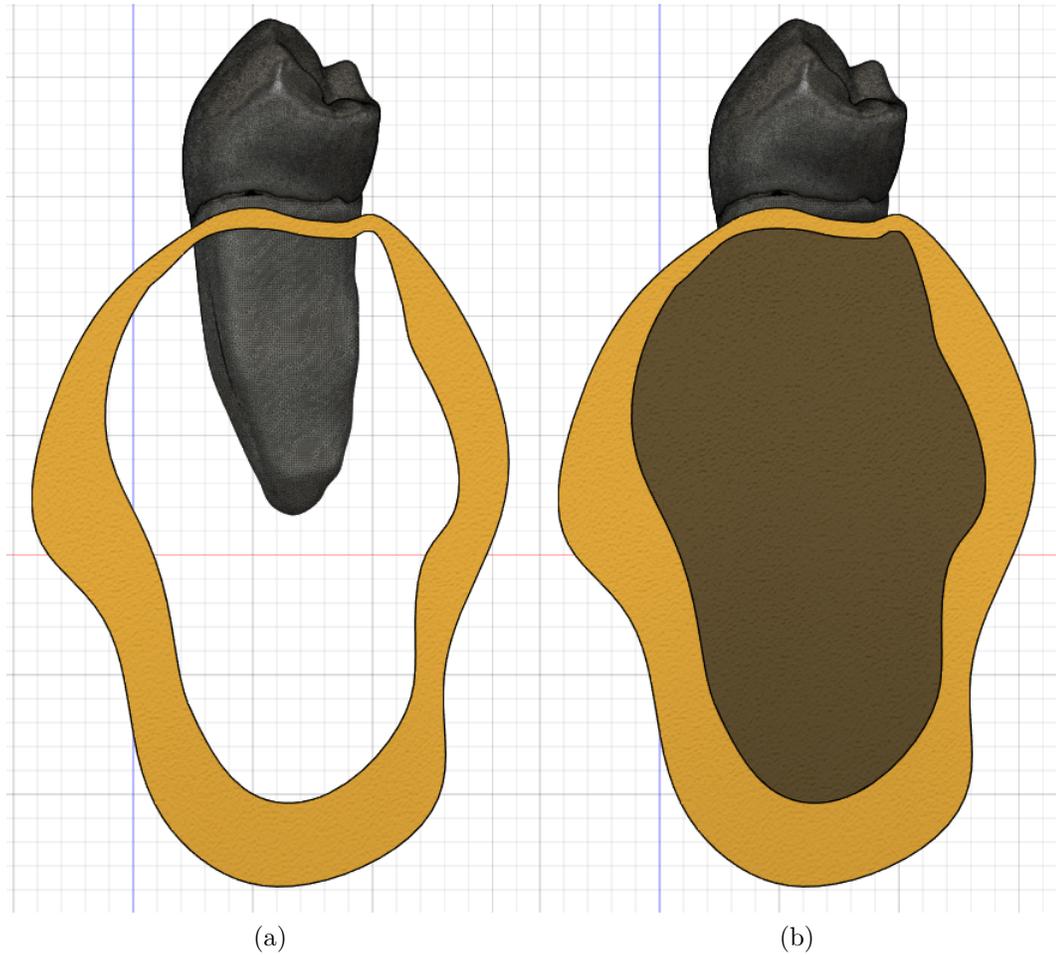


Figura 3.12: (a) Hueso cortical. (b) Hueso trabecular.

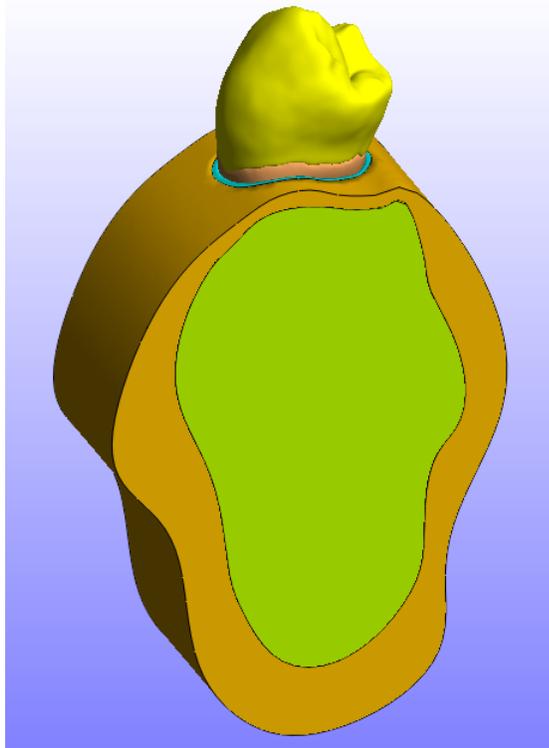


Figura 3.13: Vista isométrica diente y huesos.

Alrededor de la dentina se genera el ligamento periodontal. Esto se realiza generando un elemento que cubre externamente a la dentina hasta la misma altura que el hueso la cual es aproximadamente 0.75 mm por debajo del esmalte con un grosor de 0.3 mm .

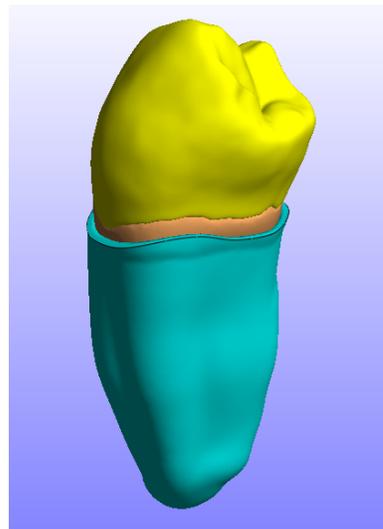


Figura 3.14: Ligamento periodontal

Estas geometrías se importan y se mallan en el software FeBio.

La malla del hueso cortical y el hueso trabecular se puede observar en la figura 3.15 y 3.16. El hueso cortical posee un total de 6299 nodos y 19959 elementos. El hueso trabecular posee un total de 14077 nodos y 52345 elementos.

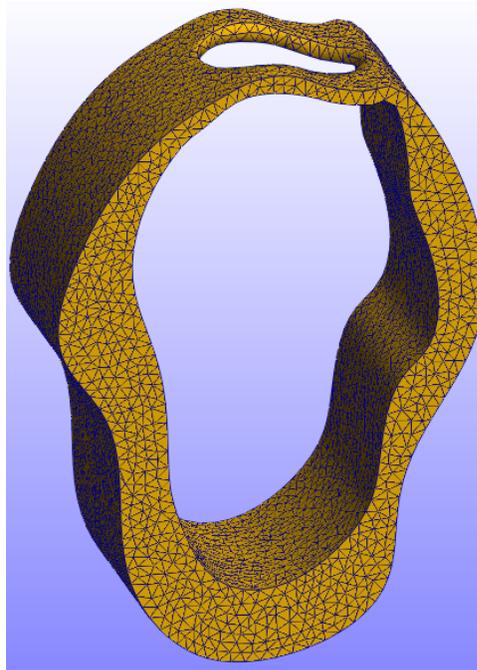


Figura 3.15: Malla hueso cortical

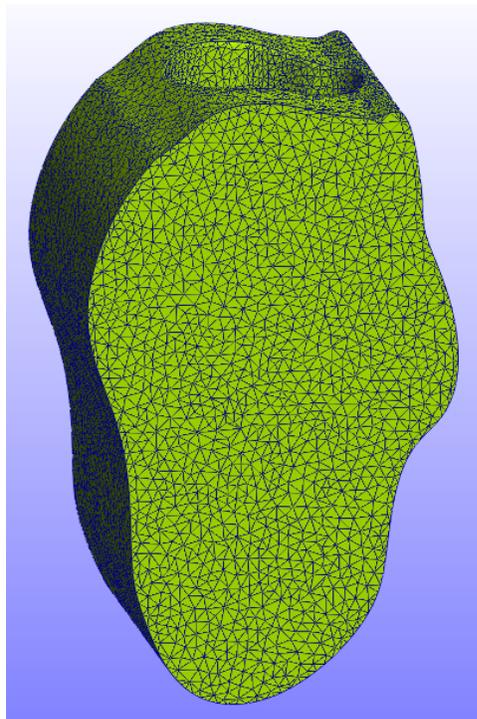


Figura 3.16: Malla hueso trabecular

La malla del ligamento periodontal se puede observar en la figura 3.17. Esta posee un total de 29036 nodos y 92452 elementos.

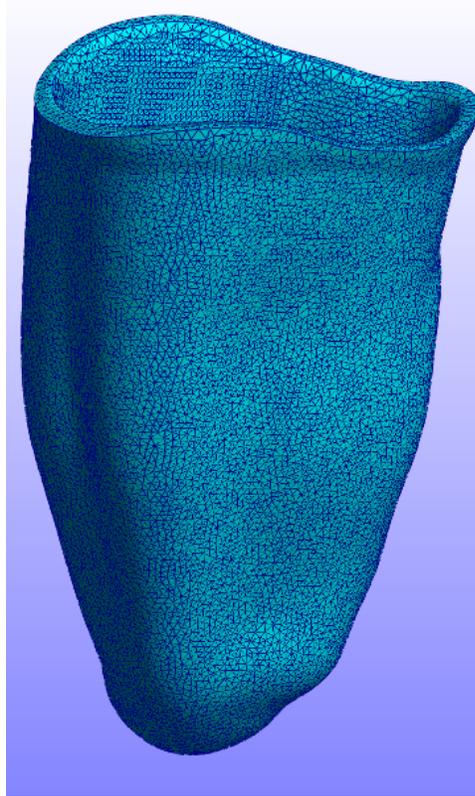


Figura 3.17: Malla ligamento periodontal

3.5. Condiciones de borde

La única condición de borde a aplicar es en la base del hueso, esta es restringida de movimiento en todas las direcciones.

3.6. Contactos

Se aplican contactos *Tied-elastic* entre las superficies esmalte-dentina, dentina-pulpa, dentina-ligamento y ligamento-hueso cortical-hueso trabecular.

3.7. Aplicar propiedades mecánicas y validar el modelo

Para validar el modelo se aplican las propiedades mecánicas y la carga aplicada en el caso 1 de la investigación de referencia previamente mencionada “*Comparison of occlusal loading conditions in a lower second premolar using three-dimensional finite element analysis*” [6].

Tabla 3.1: Propiedades elásticas de materiales isotrópicos. E: Módulo de elasticidad. ν : Coeficiente de poisson

Material	E (MPa)	ν
Esmalte	84100	0.3
Dentina	18600	0.31
Pulpa	2	0.45
Ligamento periodontal	68.9	0.45
Hueso cortical	13700	0.3
Hueso trabecular	1370	0.3

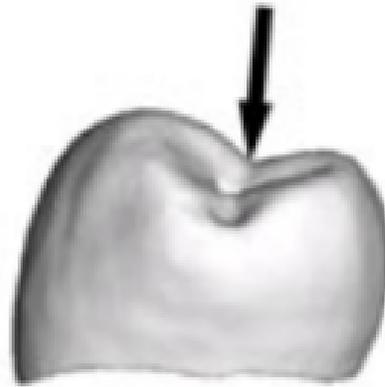


Figura 3.18: Posición carga de 100N. Entre la fosa mesio-distal entre las dos cúspides.

3.8. Modelar accesos endodónticos

Para modelar los accesos endodónticos se utiliza el software *Autodesk Fusion 360*. En el se importan las geometrías previamente obtenidas y se crean distintos modelos para simular los diferentes accesos. Para el acceso endodóntico tradicional (TEC) se realizan una proyección entre la base de la cámara pulpar hacia la superficie del esmalte, evitando remover la cúspide por lo que hace de manera angulada.

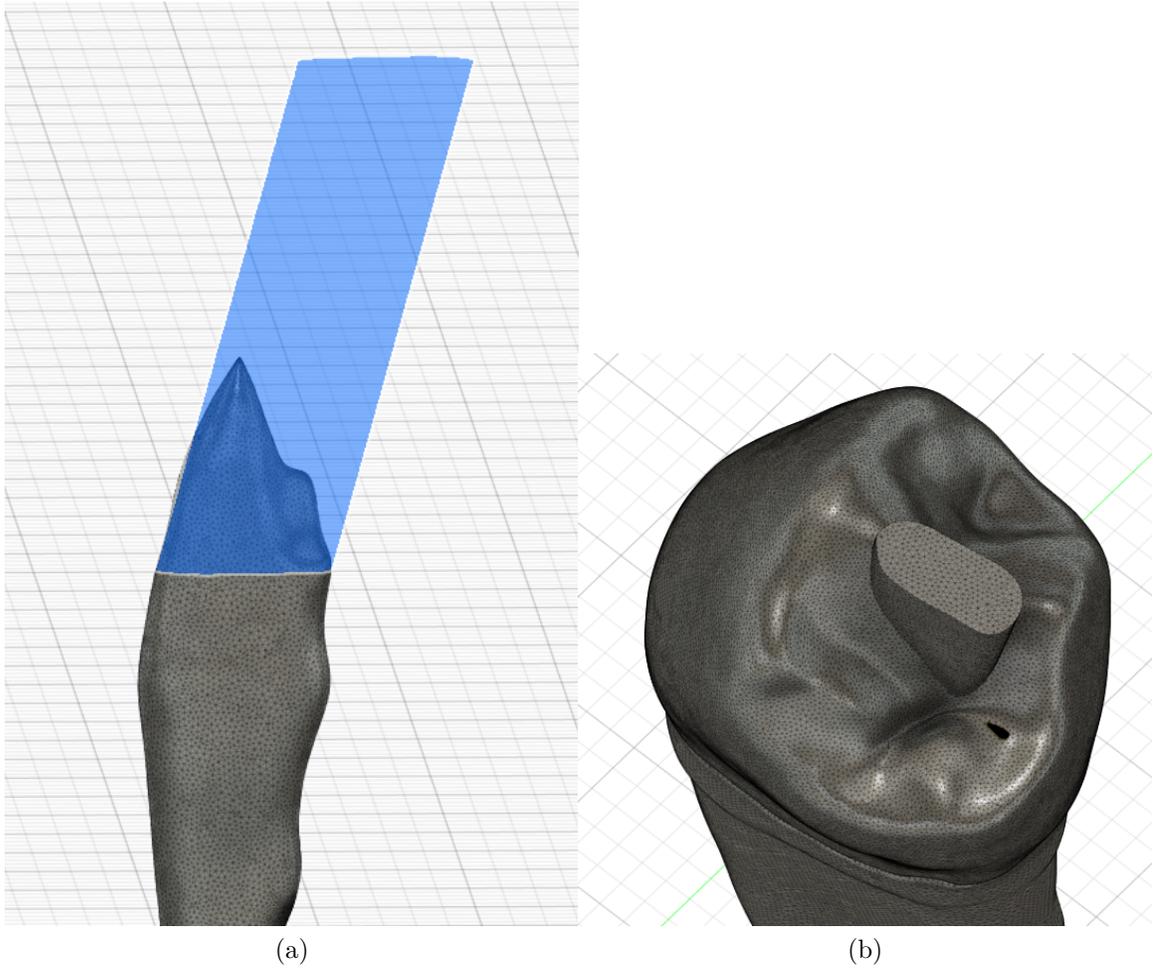


Figura 3.19: Acceso endodóntico tradicional (TEC). (a) Vista desde cámara pulpar. (b) Vista desde el esmalte.

Para el acceso endodóntico conservativo (CEC) se utiliza la proyección realizada en el acceso endodóntico tradicional sobre el esmalte pero esta proyección se ve modificada con un *offset* interior de 0.4 mm .

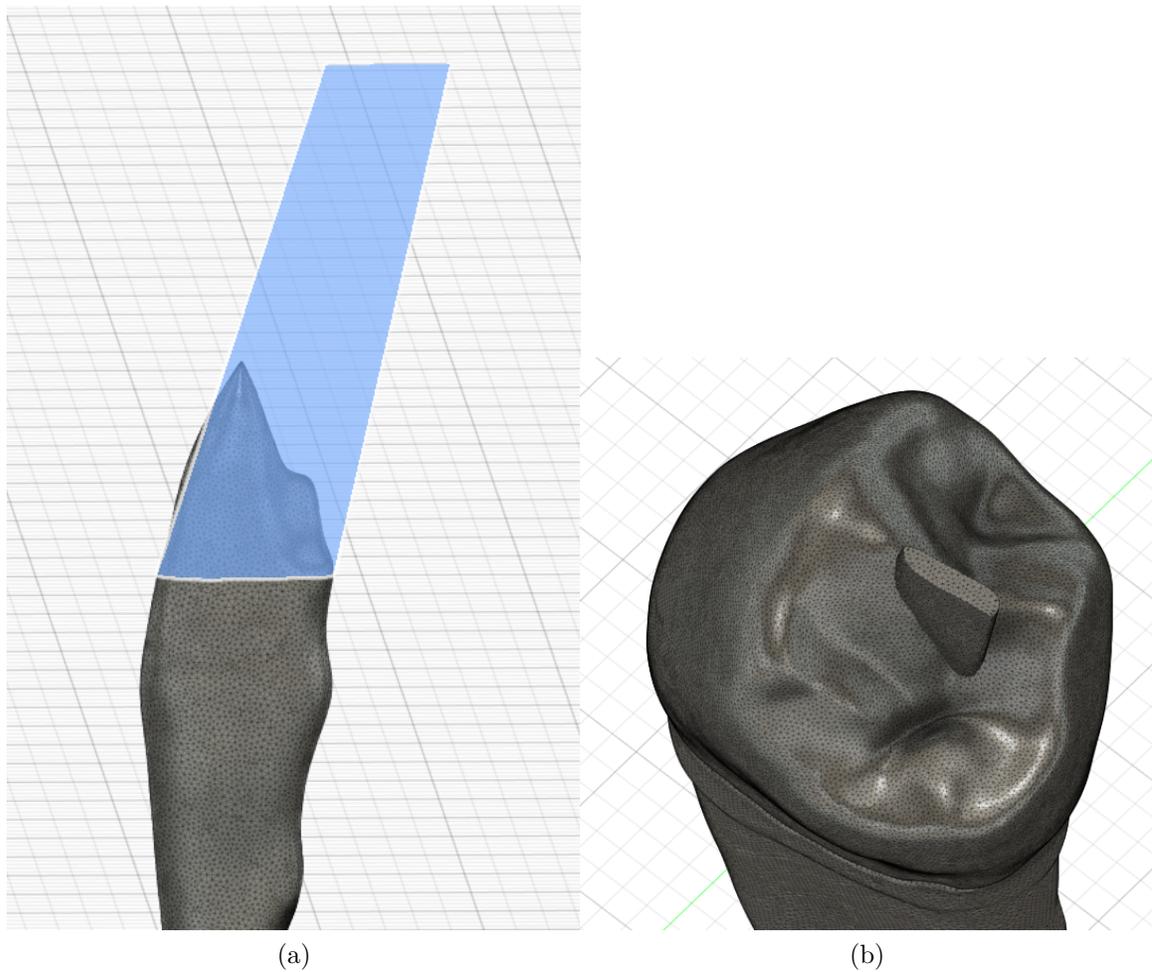


Figura 3.20: Acceso endodóntico conservativo (CEC). (a) Vista desde cámara pulpar. (b) Vista desde el esmalte.

Para el acceso endodóntico ultra conservativo o 'ninja' (UCEC) se utiliza la proyección realizada en el acceso endodóntico conservativo sobre el esmalte pero esta proyección se ve modificada con un *offset* de 0.135 y se reducen su extensión (largo) en 0.5mm, 2.5mm por cada extremo para dejar una forma más realista.

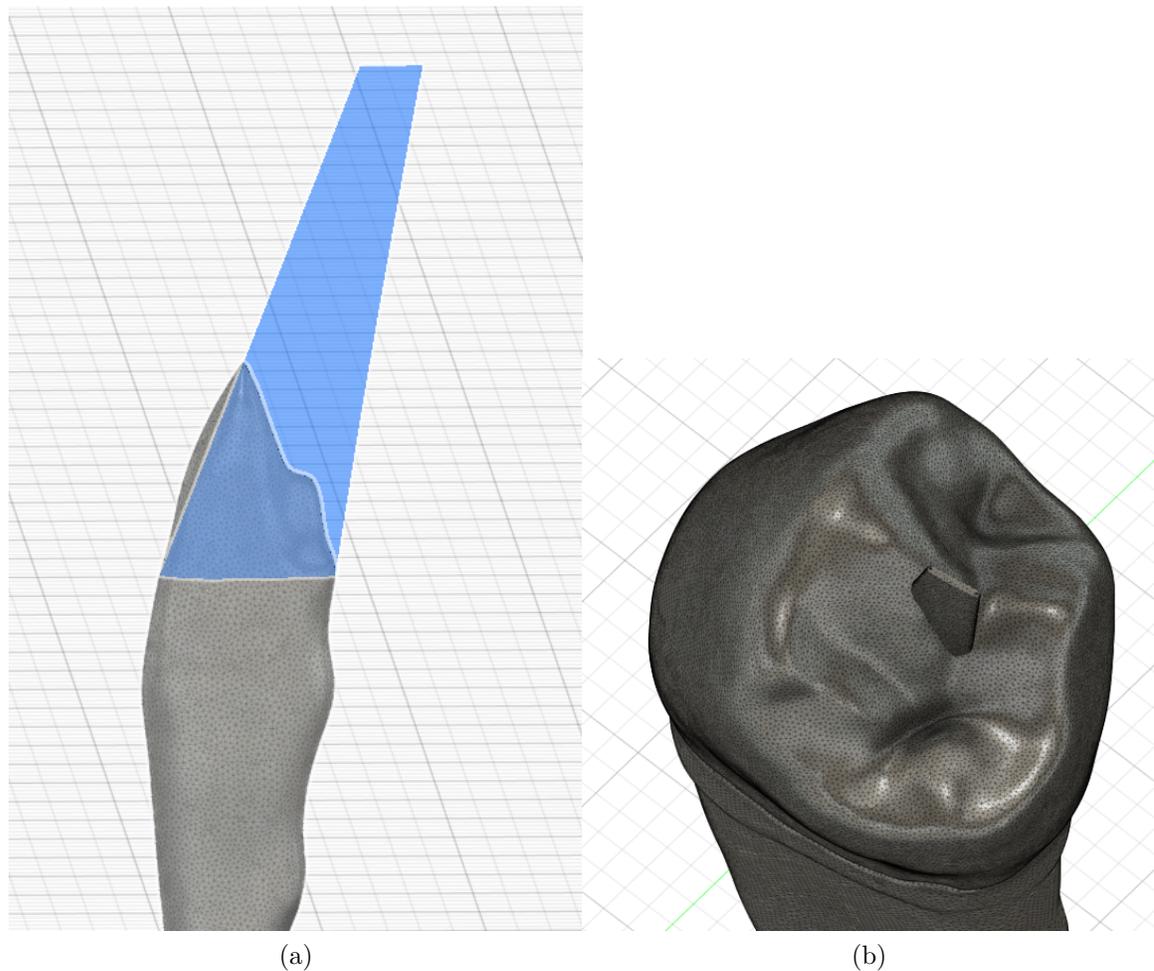


Figura 3.21: Acceso endodóntico ultra conservativo/ Ninja (UCEC). (a) Vista desde cámara pulpar. (b) Vista desde el esmalte.

Para el acceso endodónico extendido (EEC) se utiliza la proyección realizada en el acceso endodónico tradicional sobre el esmalte pero esta proyección se ve modificada aplicando un offset exterior de 0.491 mm .

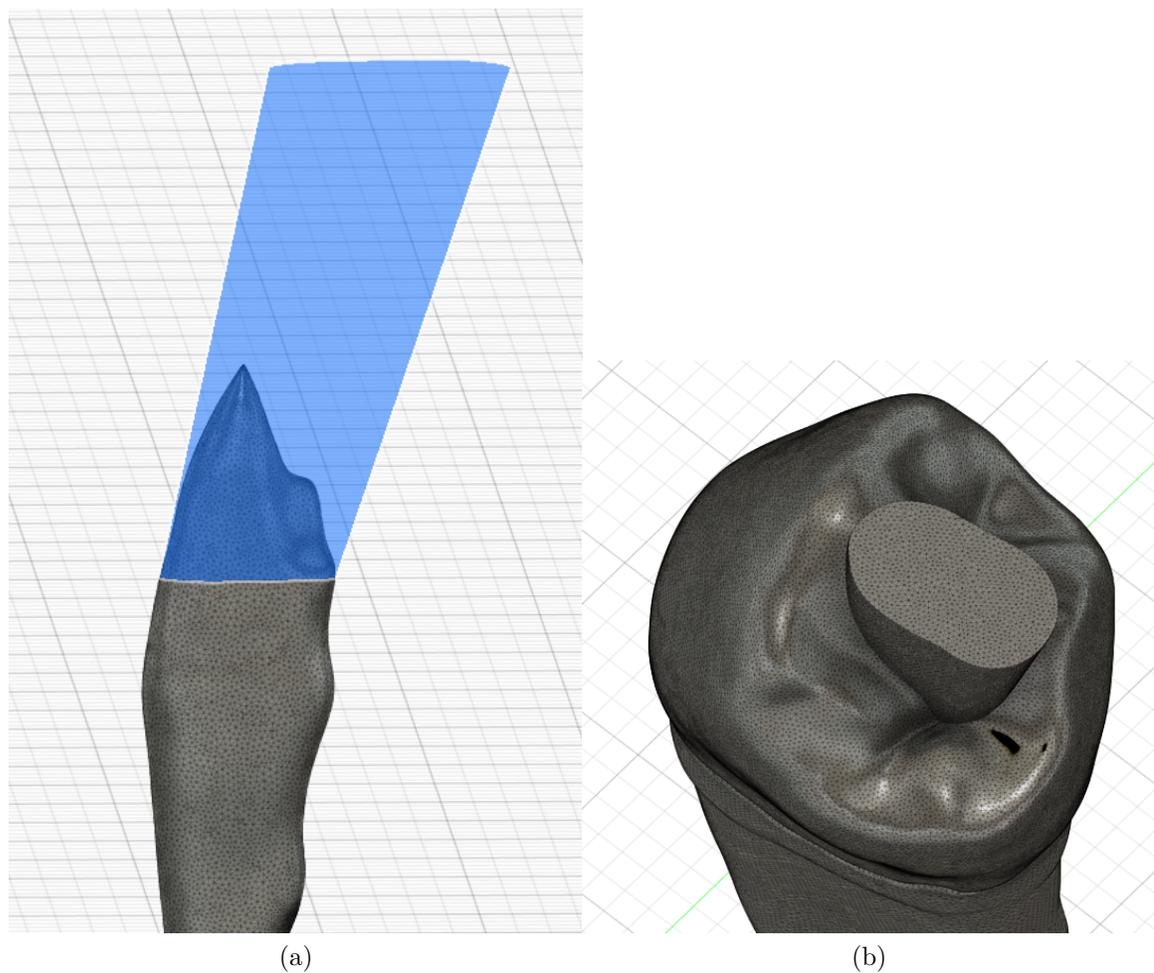


Figura 3.22: Acceso endodónico extendido (EEC). (a) Vista desde cámara pulpar. (b) Vista desde el esmalte.

Las geometrías obtenidas son importadas al software *Meshmixer* donde se utilizan para realizar restas booleanas tanto a la dentina como al esmalte, obteniendo así geometrías del esmalte y la dentina para cada uno de los 4 diferentes accesos.

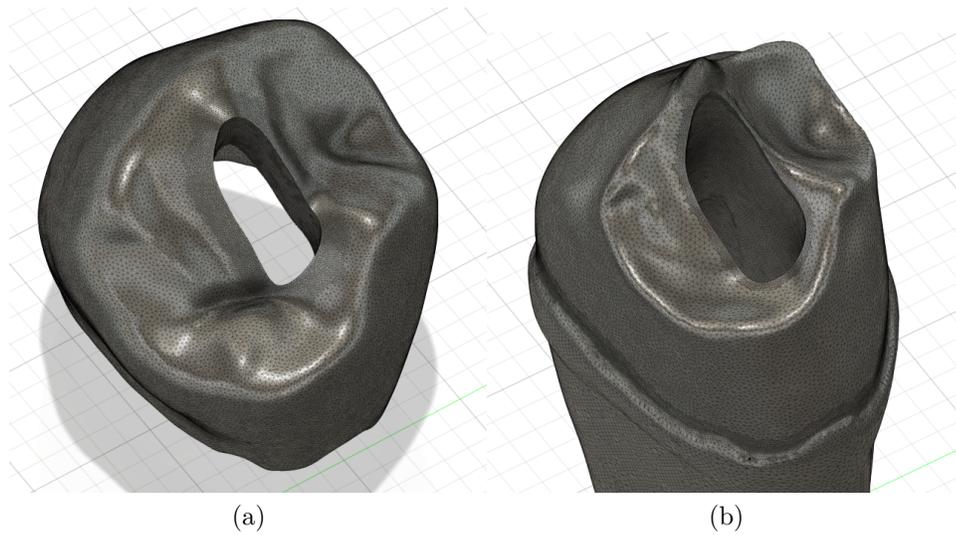


Figura 3.23: Esmalte y dentina con acceso endodóntico tradicional. (a) Esmalte. (b) Dentina

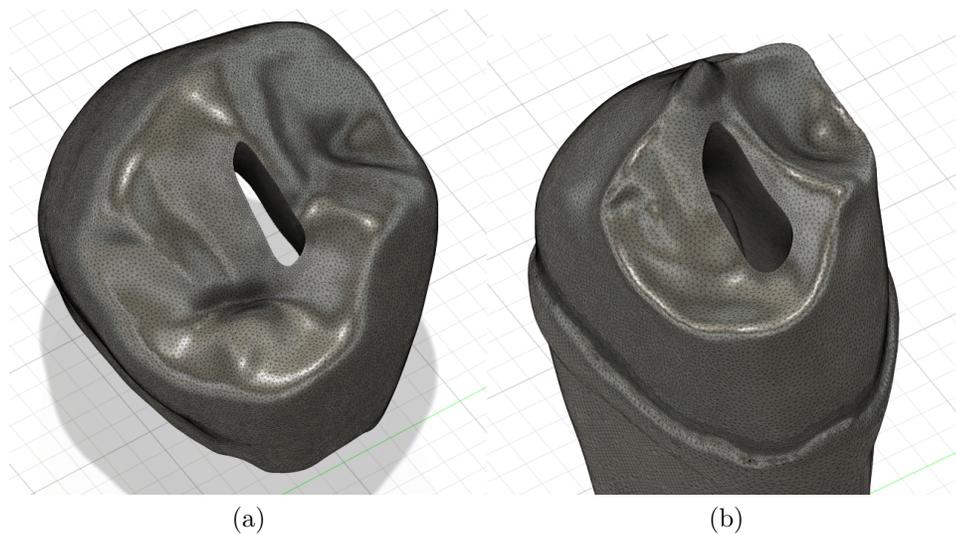


Figura 3.24: Esmalte y dentina con acceso endodóntico conservativo. (a) Esmalte. (b) Dentina

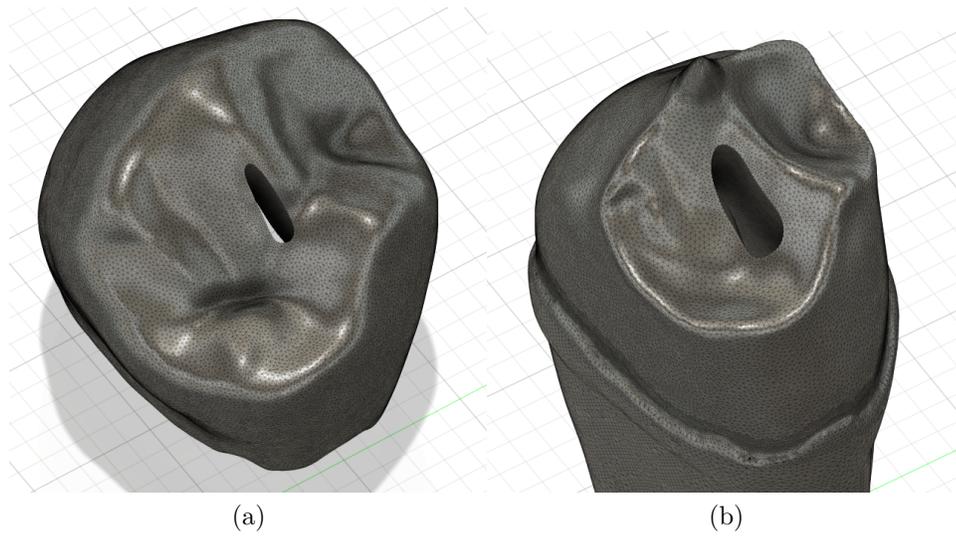


Figura 3.25: Esmalte y dentina con acceso endodóntico ultra conservativo. (a) Esmalte. (b) Dentina

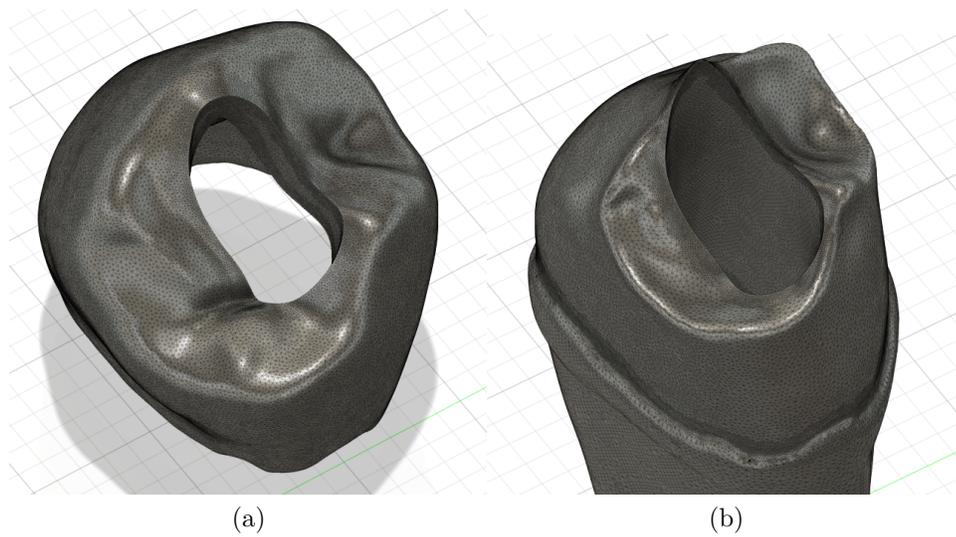


Figura 3.26: Esmalte y dentina con acceso endodóntico extendido. (a) Esmalte. (b) Dentina

3.9. Modelar materiales de relleno y restauración.

Para rellenar los espacios formados de los accesos con los materiales de relleno y restauración, se aplica una unión booleana entre la pulpa y los huecos presentes en el esmalte y la dentina. La geometría resultante es dividida en tres secciones representando la gutapercha, la resina compuesta fluida y la resina compuesta. La gutapercha corresponde a la sección desde el ápice hasta 1.25 mm por debajo de la cámara pulpar. La resina compuesta fluida corresponde a la continuación de la gutapercha hasta los cuernos de la pulpa, y finalmente desde los cuernos de la pulpa hasta el exterior del esmalte corresponde a la resina compuesta. Este proceso se realiza para cada uno de los diferentes accesos.

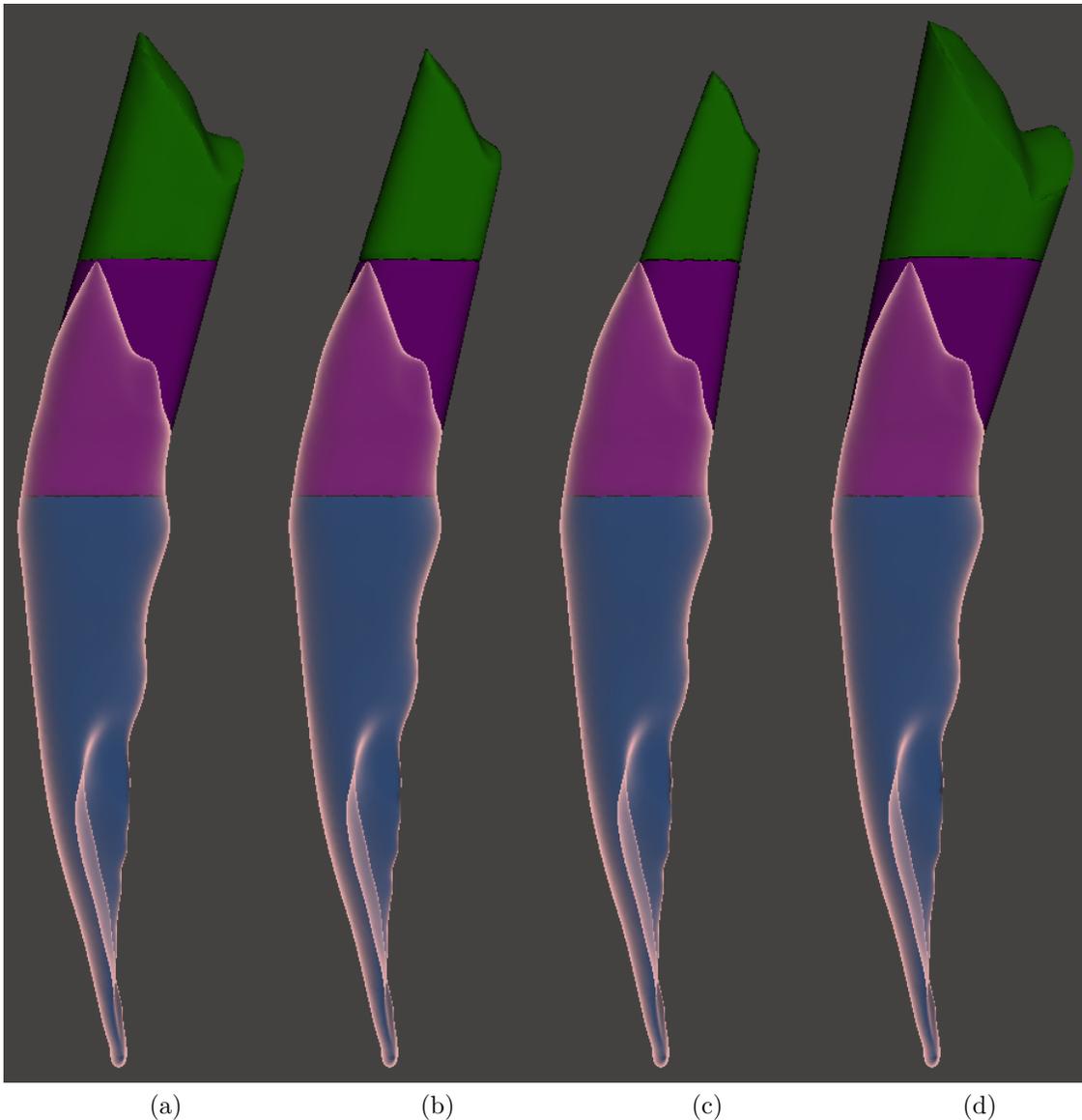


Figura 3.27: Materiales de sellado y restauración en (a) TEC, (b) CEC, (c) UCEC, (d) EEC. En azul la gutapercha, en morado el material compuesto fluido y en verde el material compuesto.

3.10. Carga y modelo de nuevas geometrías a FeBio

Para cada uno de los modelos de dientes (TEC, CEC, UCEC, EEC) se importan las geometrías correspondientes en modelos del software FeBio, en él para cada uno se mallan utilizando el generador de mallas *TetGen* los diferentes componentes (esmalte, dentina, ligamento periodontal, hueso trabecular, gutapercha, resina compuesta fluida y resina compuesta).

Las condiciones de borde aplicadas son las mismas expuestas anteriormente donde la base del hueso está restringida en movimiento en todas sus direcciones.

Se aplican contactos *Tied-elastic* entre las superficies, esmalte-dentina, esmalte-resina compuesta, dentina-resina compuesta, dentina-resina compuesta fluida, dentina-gutapercha, dentina-ligamento, ligamento-huesos, resina compuesta-resina compuesta fluida, resina compuesta fluida- gutapercha

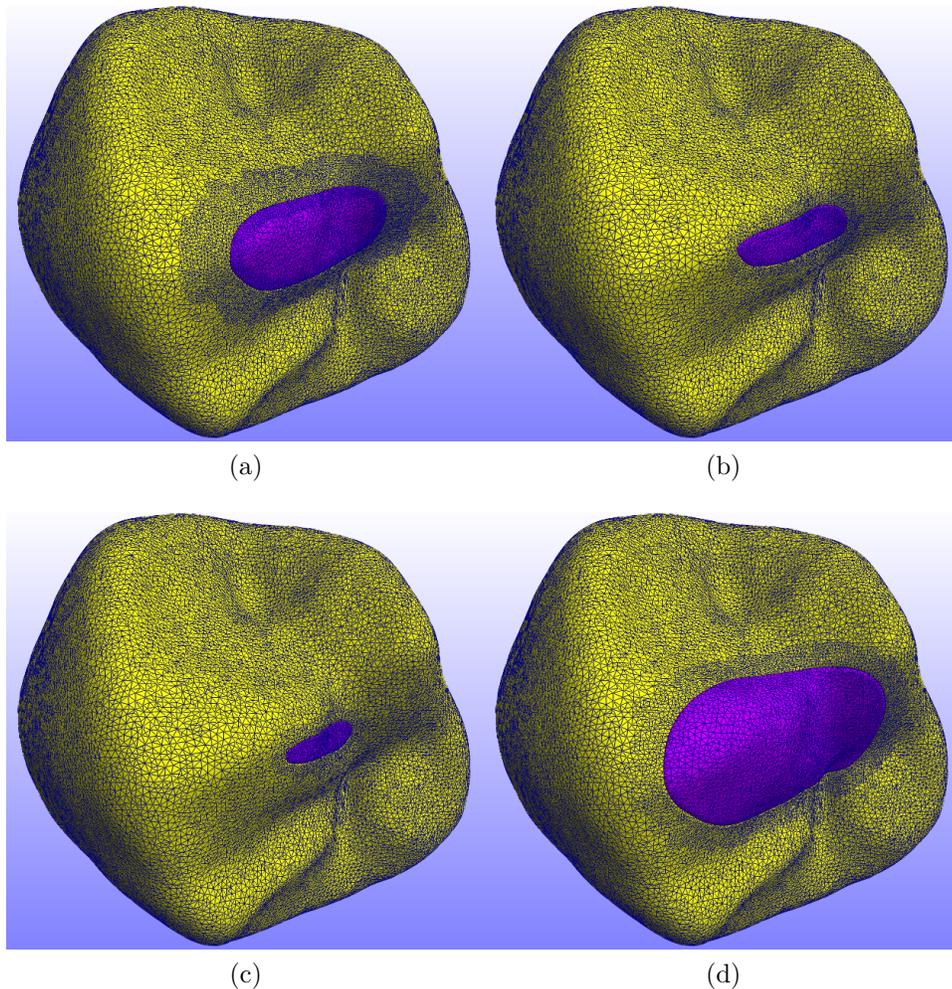


Figura 3.28: Mallado para los diferentes accesos. (a) TEC. (b) CEC. (c) UCEC. (d) EEC

3.11. Agregar propiedades mecánicas

Para los modelos isotrópicos se aplican las propiedades mecánicas presentes en la tabla 3.4.

Tabla 3.2: Propiedades elásticas de materiales isotrópicos.

Material	E (MPa)	ν
Esmalte	84100	0.33
Dentina	18600	0.31
Pulpa	2	0.45
Ligamento periodontal	68.9	0.45
Hueso trabecular	1370	0.3
Hueso cortical	13700	0.3
Gutapercha	0.69	0.45
Resina compuesta fluida	5100	0.27
Resina compuesta	12000	0.3

Para los modelos anisotrópicos solo se cambia el valor del esmalte el cual se simula ortotrópicamente. En las direcciones perpendiculares a la carga los módulos elásticos E_1 y E_2 poseen valores de 40 GPa y en la dirección perpendicular a estas un módulo elástico E_3 igual a 80 GPa. Al no tener valores para los diferentes coeficientes de poisson en las distintas direcciones se asume $\nu_1 = \nu_2 = \nu_3 = 0.33$ y utilizando la formula para predecir los módulos de corte $G_{12} = \frac{\sqrt{E_1 E_2}}{2(1+\sqrt{\nu_1 \nu_2})}$ propuesta en [35] se obtienen los valores $G_{12} = 8584 \text{ MPa}$, $G_{23} = 12139 \text{ MPa}$, $G_{31} = 12139 \text{ MPa}$.

3.12. Simular para todos los modelos, un caso de oclusión normal y uno de bruxismo.

Para cada uno de los modelos (NT, TEC, CEC, UCEC y EEC) se aplican cargas nodales en las mismas zonas de contacto, el primer caso corresponde a una distribuida uniformemente de 150N simulando una oclusión normal, y el segundo caso corresponde a una carga distribuida uniforme de 500N simulando una condición de bruxismo. Para cada uno de los modelos se simulan dos casos uno con un esmalte isotrópico y otro con un esmalte ortotrópico.

Las zonas de carga se pueden observar en la figura 3.29

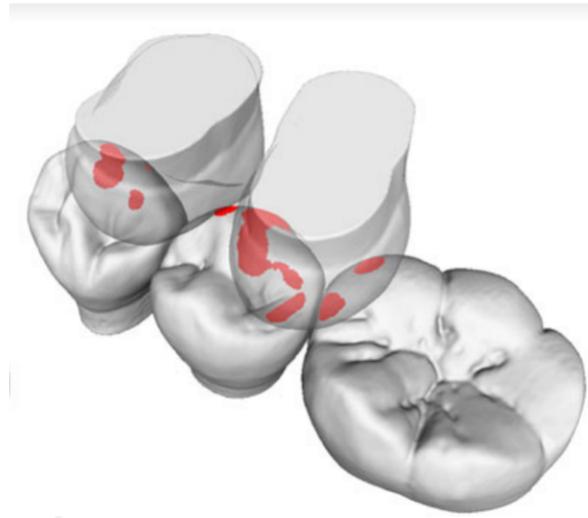
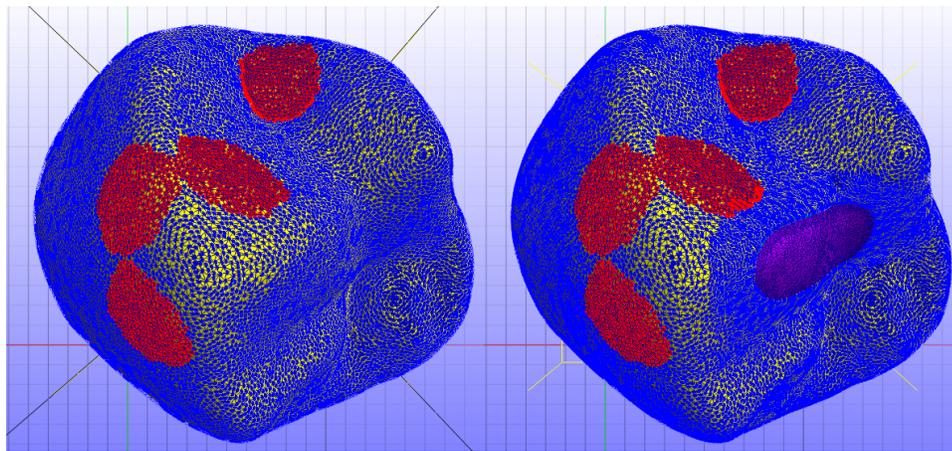
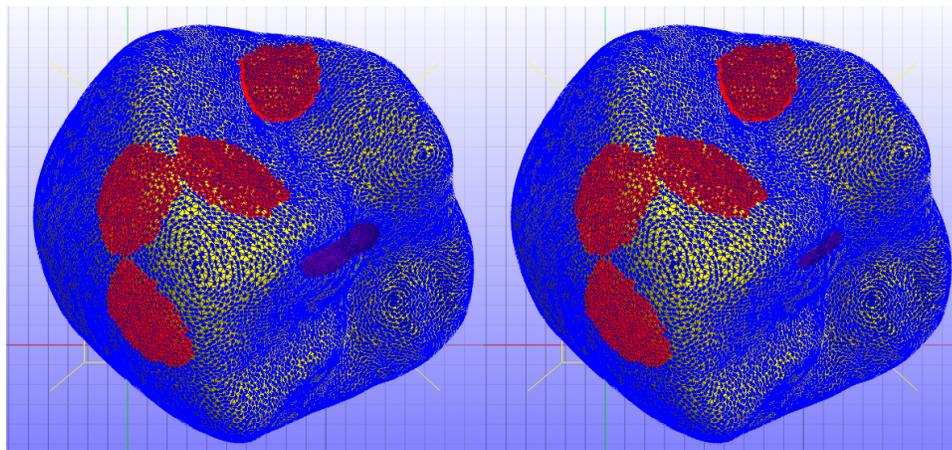


Figura 3.29: Zona de contacto. Figura extraída de [6]



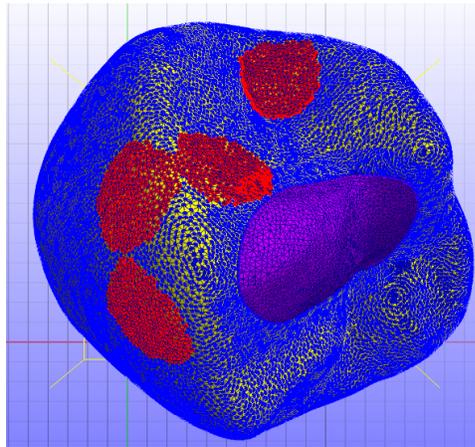
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

Figura 3.30: Zona de aplicación de cargas.(a) NT. (b) TEC. (c) CEC. (d) UCEC. (e) EEC

3.13. Resumen de nodos y elementos en el mallado y propiedades mecánicas utilizadas

Tabla 3.3: Número de nodos y elementos para el esmalte y la dentina en los diferentes modelos.

Modelo	Componente	Nodos	Elementos
Diente Natural (NT)	Esmalte	64684	234900
	Dentina	81535	301817
Acceso endodóntico tradicional (TEC)	Esmalte	73168	263078
	Dentina	100099	355295
Acceso endodóntico conservativo (CEC)	Esmalte	70171	251960
	Dentina	112692	397536
Acceso endodóntico ultra conservativo (UCEC)	Esmalte	67762	244914
	Dentina	88979	313932
Acceso endodóntico extendido (EEC)	Esmalte	67225	241489
	Dentina	90601	331443

Tabla 3.4: Propiedades elásticas de materiales isotrópicos.

Material	E (MPa)	ν
Esmalte	84100	0.33
Dentina	18600	0.31
Pulpa	2	0.45
Ligamento periodontal	68.9	0.45
Hueso trabecular	1370	0.3
Hueso cortical	13700	0.3
Gutapercha	0.69	0.45
Resina compuesta fluida	5100	0.27
Resina compuesta	12000	0.3

3.13.1. Simular para distintos materiales de restauración

Adicionalmente se simulan para el acceso endodóntico tradicional con modelo ortotrópico, dos configuraciones extras de materiales de restauración en la que se simula una restauración con vidrio ionomero y resina compuesta y otra solamente con vidrio ionomero. Para esto se cambian los valores de las restauraciones por las del vidrio ionomero que corresponde a un módulo elástico de 4 GPa y un coeficiente de poisson de $\nu = 0.35$. [34]

3.13.2. Simular para distintas posiciones de acceso endodóntico tradicional

Además se simulan tres modelos dentales extras con diferentes accesos endodónticos tradicionales con esmalte ortotrópico para comparar como afecta la ubicación del acceso a la distribución de esfuerzos. Para evitar errores en el modelo con los nuevos accesos se generan nuevas zonas de cargas reducidas para que no interfieran directamente en los accesos. Los nuevos modelos dentales se pueden observar en la figura 3.31 y las zonas de carga en la figura 3.32.



Figura 3.31: Nuevos accesos endodónticos tradicionales.

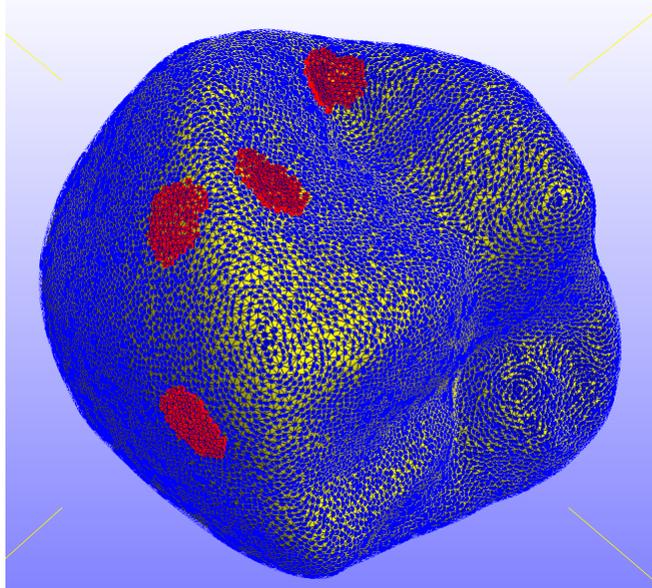


Figura 3.32: Nuevas zonas de carga.

Capítulo 4

Análisis y resultados

En primer lugar se presentan los resultados del estudio de validación y luego se comparan con los resultados obtenidos por el modelo de validación.

4.0.1. Validación

Se puede observar en la figura 4.1 que en la vista oclusal, obtenemos los mayores esfuerzos de tracción desde la fosa central (el lugar de aplicación de la carga) y se extiende hacia ambas cúspides, la vestibular y lingual. Como segunda zona de mayores esfuerzos de tracción se obtienen en las zonas de rodets marginales distal y mesial y las zonas que se extienden de la cúspide a la cara lingual y vestibular.

En la vista mesial-lingual se aprecia una gran concentración de esfuerzo de tracción en la zona cervical mientras que la dentina no posee esfuerzos significativos. En la vista distal-vestibular en la cara cervical vestibular no se observan esfuerzos de tracción elevados. mientras que la zona cervical distal si posee esfuerzos de tracción elevados.

En los resultados obtenidos por el modelo de validación 4.2 se obtienen resultados bastante similares al del estudio de validación, donde en la vista oclusal se observa un patrón equivalente al observado en el estudio de validación. En la vista mesial la principal diferencia se observa en la zona cervical donde no se presentan una concentración de esfuerzo elevada en la zona cervical, esto se puede explicar debido a los diferentes contactos que existen entre el esmalte y la dentina entre ambas geometrías. En la vista distal los resultados son similares aunque aquí es donde se aprecia la mayor diferencia ya que en el estudio de validación no presenta esfuerzo de tracción elevado en la zona vestibular de la dentina mientras que en los resultados del modelo de validación si presenta resultados elevados, esto nuevamente puede ser explicado por los contactos entre esmalte y dentina además de la variabilidad geométrica existente entre los dos modelos.

Viendo los resultados se puede apreciar que lo resultados son bastante similares a pesar de existir una gran variabilidad existente entre las geometrías posibles que puede tomar un diente premolar inferior.

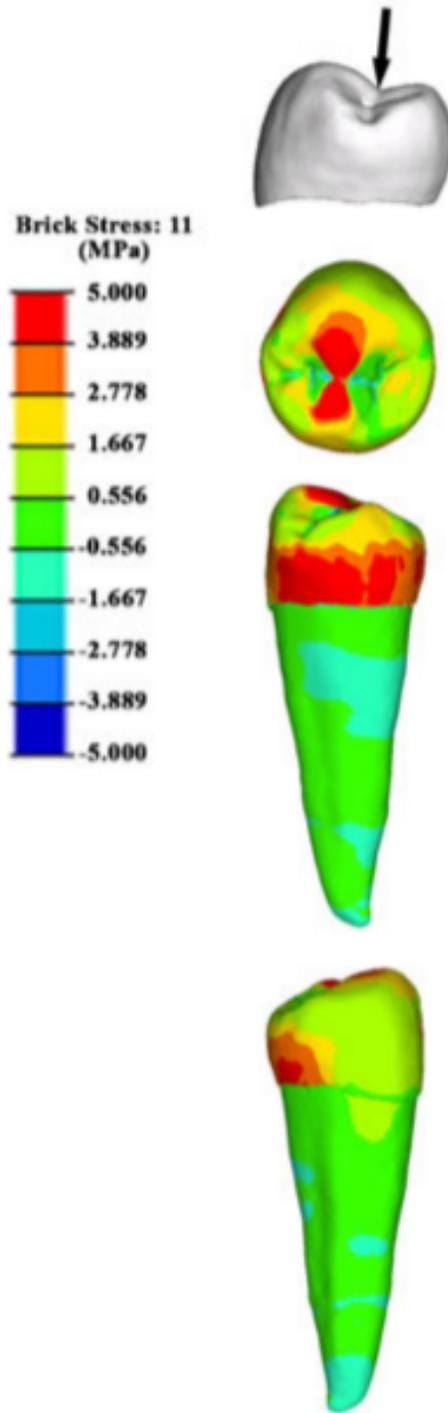
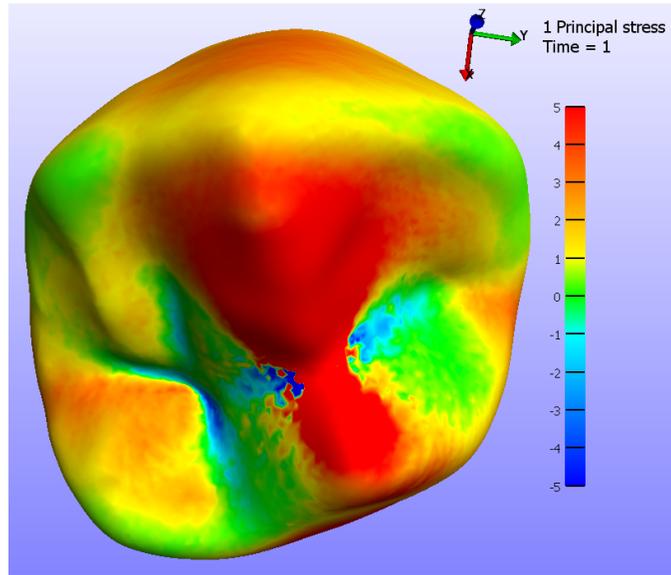
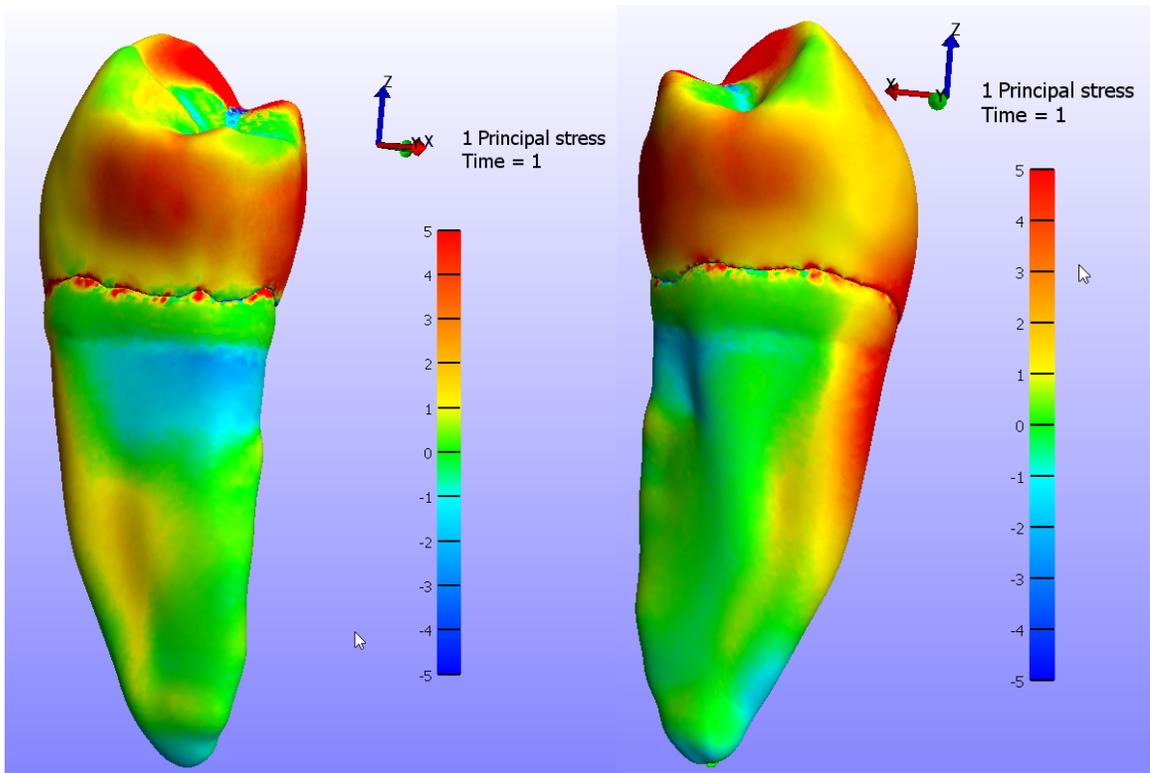


Figura 4.1: Resultados estudio de validación. (a) Vista oclusal. (b) Vista mesial. (c) Vista distal



(a)



(b)

(c)

Figura 4.2: Esfuerzo máximo principal [MPa] modelo de validación.

4.0.2. Planos de corte utilizados

Para entender de mejor manera los resultados se muestran en las figuras 4.3 y 4.4 los planos de corte utilizados para mostrar los esfuerzos internos del diente.

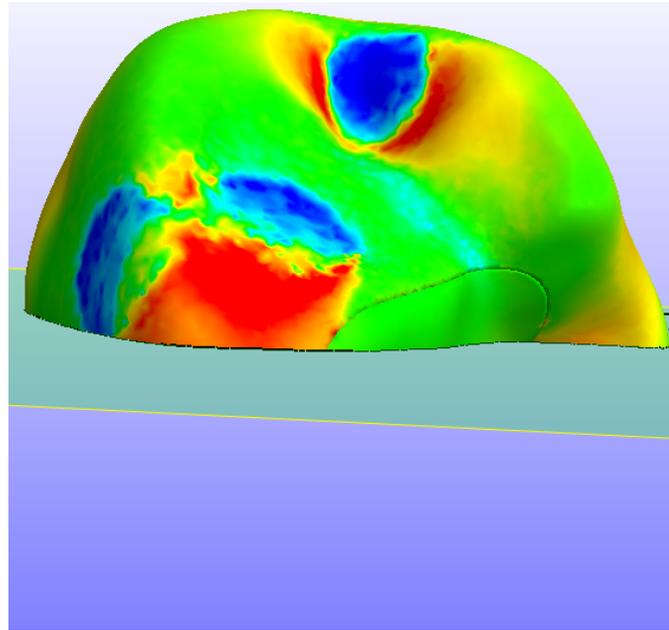


Figura 4.3: Vista oclusal de plano de corte esfuerzos internos entre cúspides.

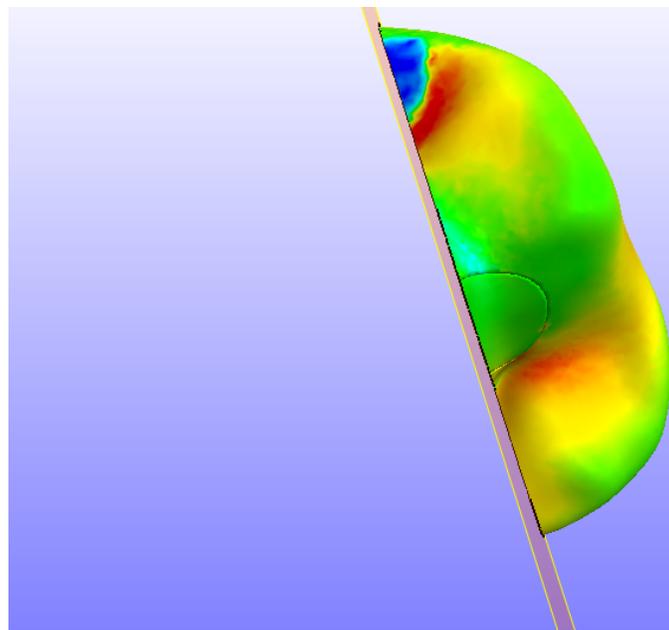


Figura 4.4: Vista oclusal de plano de corte esfuerzos internos entre cúspides.

4.1. Oclusión normal 150 N, modelo isotrópico

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para los diferentes accesos endodónticos simulados bajo una carga de oclusión normal de 150 N utilizando valores isotrópicos para el esmalte.

4.1.1. Diente natural

En la figura 4.5 (a) se puede observar que el esfuerzo máximo principal obtenido corresponde a 21.3 MPa. Las zonas de mayor tracción corresponden a la cúspide y en la zona del rodete marginal distal alrededor de la fosa distal. En las zonas de aplicación de carga se obtienen esfuerzos principales de compresión.

En la figura 4.5 (b) se puede observar la distribución de esfuerzo al interior del diente entre las cúspides. Se observan tres zonas principales de esfuerzos de tracción, los cuales son en la cúspide vestibular, en la unión dentina-esmalte vestibular y desde la zona de la cúspide lingual interna de la dentina proyectada hacia el esmalte.

En la figura 4.6 (a) se observa la distribución de esfuerzo interna entre rodetes marginales. Se puede apreciar que los mayores esfuerzos se observan en el rodete marginal distal alrededor de la zona de carga y en menor medida se aprecian esfuerzos en el rodete marginal mesial.

En la figura 4.6 (b) se observa la distribución de esfuerzo en la zona apical. Se puede apreciar que en la apertura del conducto radicular se concentran esfuerzos llegando aproximadamente a 10 MPa.

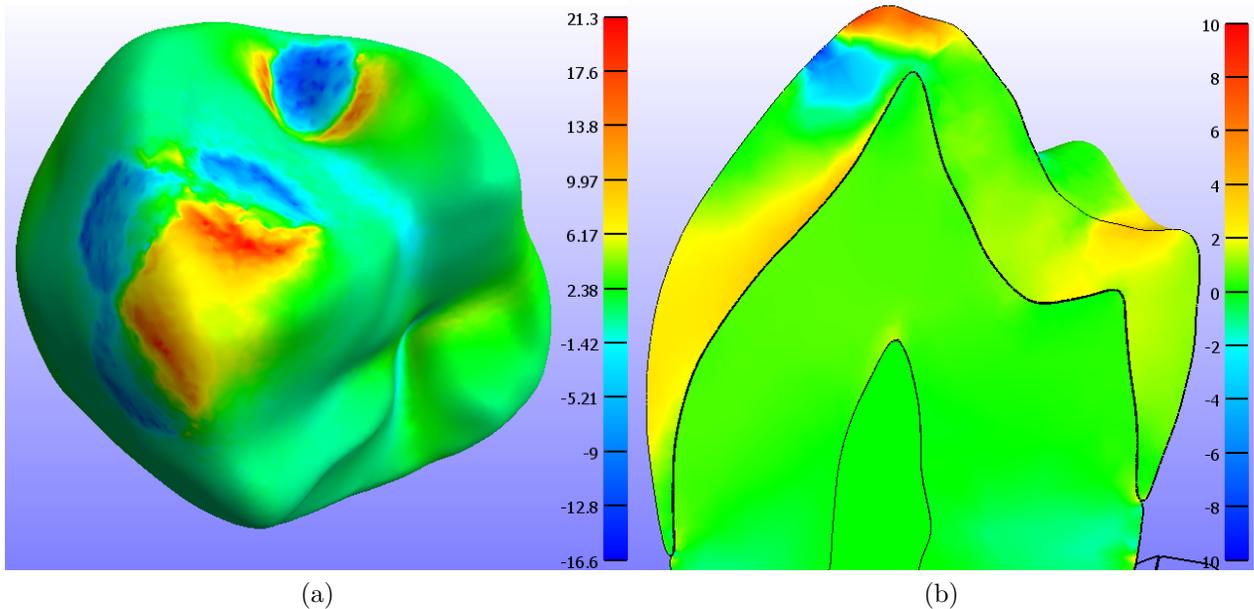


Figura 4.5: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente natural bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.

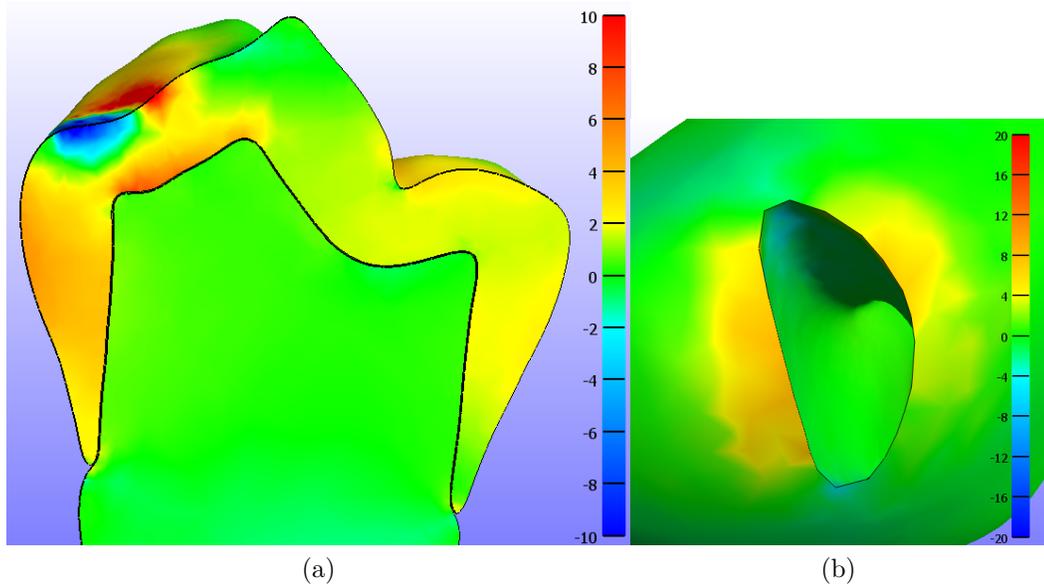


Figura 4.6: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente natural bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.

En la figura 4.6 (c) y (d) se pueden observar la distribución de esfuerzo en la cara distal y mesial del diente. Se advierte que en la dentina existe una concentración de esfuerzo a la altura del ligamento que se atribuye a un valor elevado debido a un error despreciable en las condiciones de contacto, mientras que en el esmalte cercano a la zona cervical existen

esfuerzos principales de tracción alrededor de los 6 MPa.

4.1.2. Diente con acceso endodóntico ultra conservativo

En la figura 4.7 (a) se puede observar que el esfuerzo máximo principal obtenido corresponde a 21.5 MPa. Tal como en el diente natural Las zonas de mayor tracción corresponden a la cúspide y en el rodete marginal distal alrededor de la fosa distal. Además se aprecian levemente en la zona cercana a la cúspide vestibular del acceso una concentración de los esfuerzos de tracción. En las zonas de aplicación de carga se obtienen esfuerzos principales de compresión.

En la figura 4.7 (b) se puede observar la distribución de esfuerzo al interior del diente. Se observan cuatro zonas principales de esfuerzos de tracción, los cuales son en la cúspide vestibular, en la unión dentina-esmalte vestibular, alrededor del acceso endodóntico en el esmalte y desde la zona de la cúspide lingual interna de la dentina proyectada hacia el esmalte.

En la figura 4.8 (a) se observa la distribución de esfuerzo interna entre rodetes marginales. Se puede apreciar que los mayores esfuerzos se observan en el rodete marginal alrededor de la zona de carga y en menor medida se aprecian esfuerzos en toda la zona del esmalte mesial posterior al acceso.

En la figura 4.8 (b) se observa la distribución de esfuerzo en la zona apical. Se puede apreciar que en la apertura del conducto radicular se concentran esfuerzos llegando aproximadamente a 16 MPa.

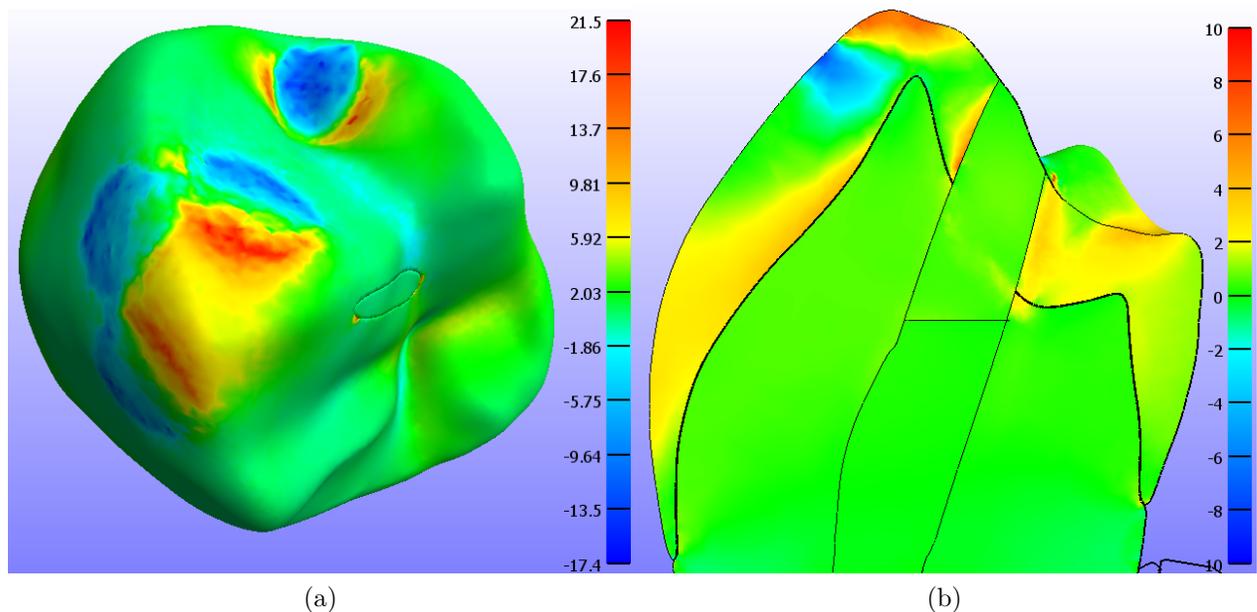


Figura 4.7: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico ultra conservativo bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.

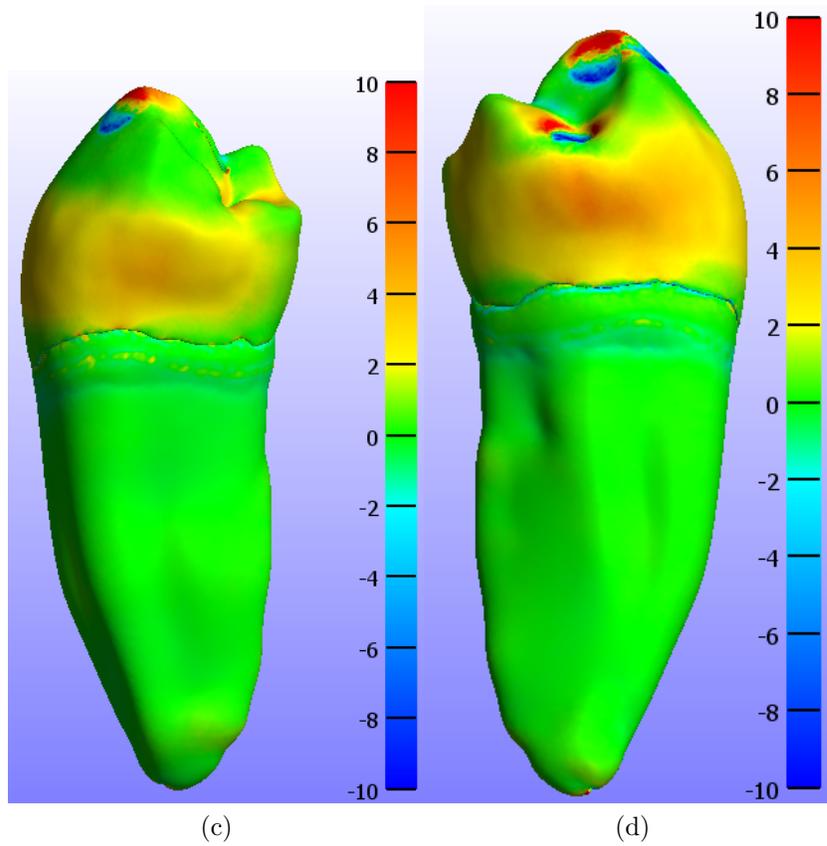
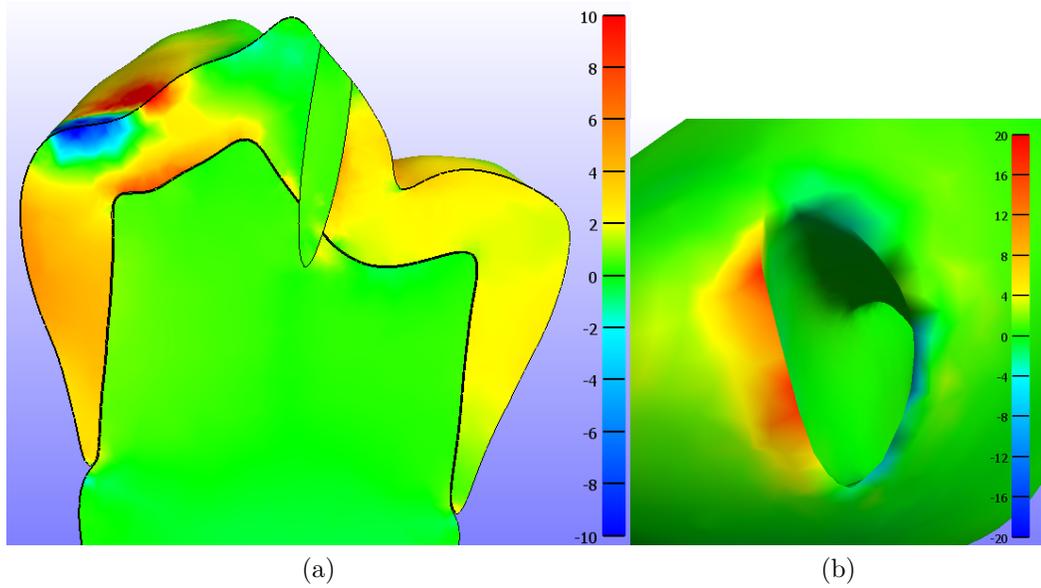


Figura 4.8: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico ultra conservativo bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista en corte entre rodets marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.

En la figura 4.8 (c) y (d) se pueden observar la distribución de esfuerzo en la cara distal y mesial del diente. Se advierte que en la dentina no se observan esfuerzos considerables mientras que en el esmalte cercano a la zona cervical existen esfuerzos principales de tracción alrededor de los 6 MPa.

4.1.3. Diente con acceso endodóntico conservativo

En la figura 4.9 (a) se puede observar que el esfuerzo máximo principal obtenido corresponde a 26 MPa. Tal como en el diente con acceso endodóntico ultra conservativo las zonas de mayor tracción corresponden a la cúspide y en el rodete marginal distal alrededor de la fosa distal. Además se aprecian levemente en la zona cercana a la cúspide vestibular del acceso una concentración de los esfuerzos de tracción. En las zonas de aplicación de carga se obtienen esfuerzos principales de compresión.

En la figura 4.9 (b) se puede observar la distribución de esfuerzo al interior del diente. Se observan cuatro zonas principales de esfuerzos de tracción, los cuales son en la cúspide vestibular, en la unión dentina-esmalte vestibular, alrededor del acceso endodóntico en el esmalte y desde la zona de la cúspide lingual interna de la dentina proyectada hacia el esmalte.

En la figura 4.10 (a) se observa la distribución de esfuerzo interna entre rodetes marginales. Se puede apreciar que los mayores esfuerzos se observan en el rodete marginal distal alrededor de la zona de carga y en menor medida se aprecian esfuerzos en toda la zona del esmalte mesial posterior al acceso.

En la figura 4.10 (b) se observa la distribución de esfuerzo en la zona apical. Se puede apreciar que en la apertura del conducto radicular se concentran esfuerzos llegando en su zona máxima a aproximadamente 12 MPa.

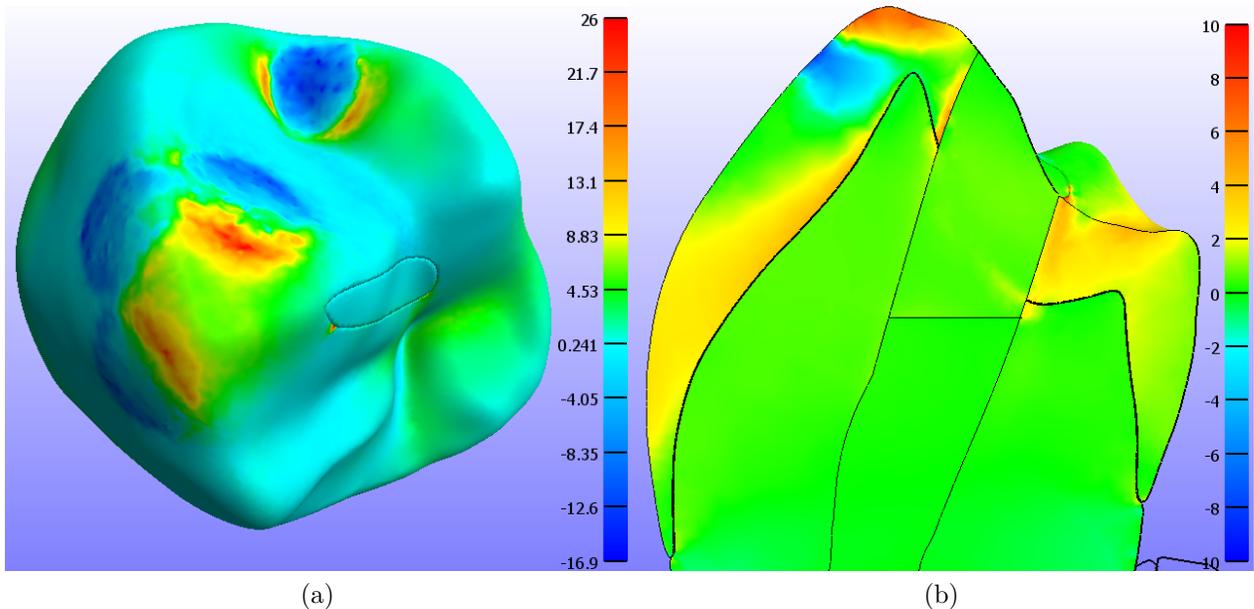


Figura 4.9: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico conservativo bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.

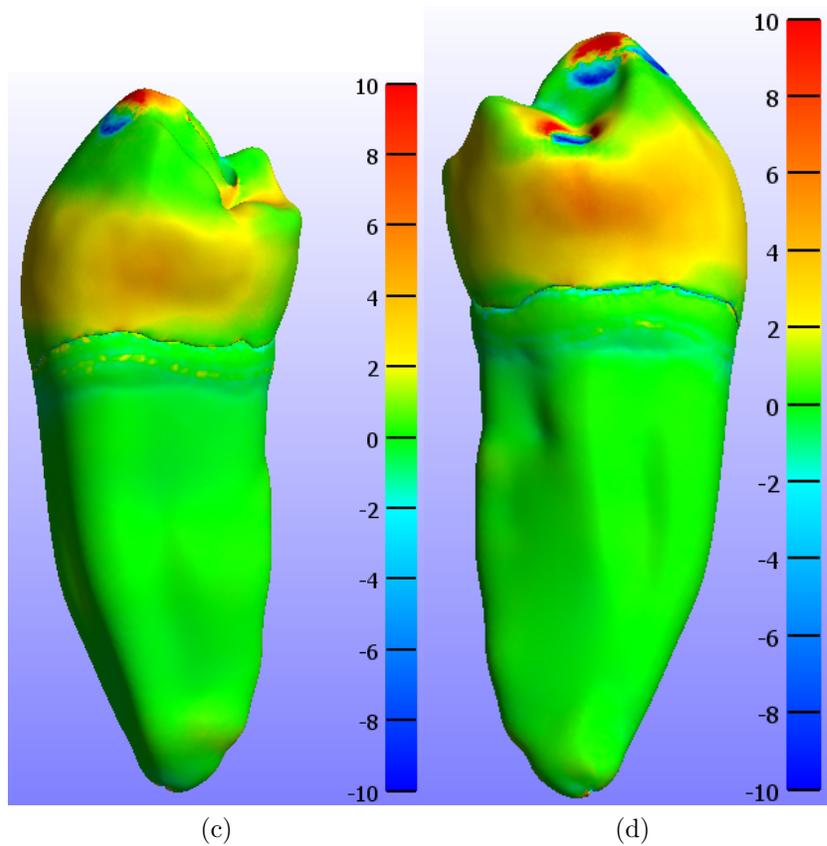
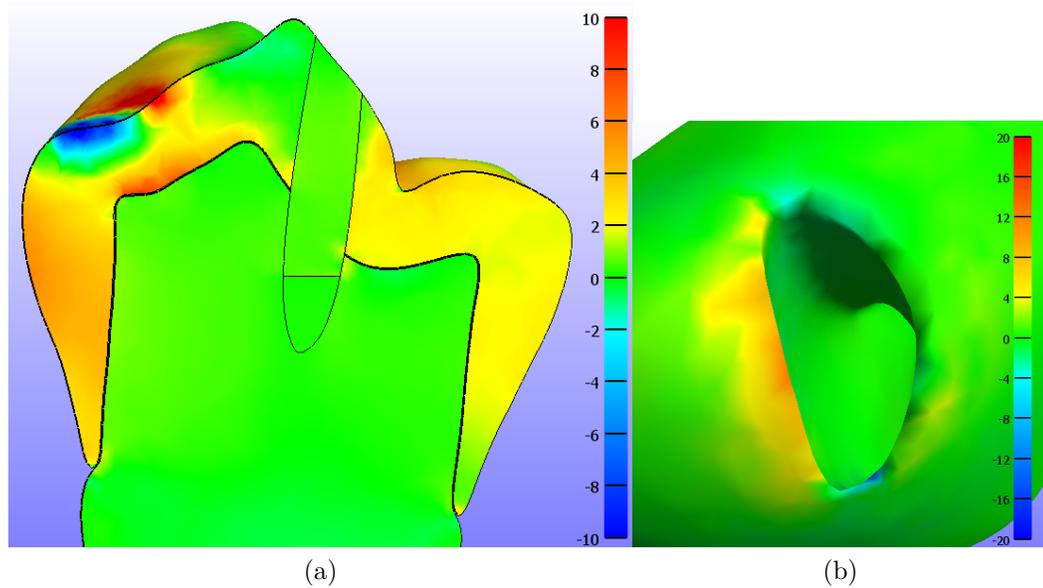


Figura 4.10: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico conservativo bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.

En la figura 4.10 (c) y (d) se pueden observar la distribución de esfuerzo en la cara distal y mesial del diente. Se advierte que en la dentina no se observan esfuerzos considerables mientras que en el esmalte cercano a la zona cervical existen esfuerzos principales de tracción alrededor de los 6 MPa.

4.1.4. Diente con acceso endodóntico tradicional

En la figura 4.11 (a) se puede observar que el esfuerzo máximo principal obtenido corresponde a 26.1 MPa. Tal como en el diente con acceso endodóntico conservativo las zonas de mayor tracción corresponden a la cúspide y en el rodete marginal distal alrededor de la fosa distal. Además se aprecian levemente en la zona cercana a la cúspide vestibular del acceso una concentración de los esfuerzos de tracción así como también en la fosa mesial cercano al acceso. En las zonas de aplicación de carga se obtienen esfuerzos principales de compresión.

En la figura 4.11 (b) se puede observar la distribución de esfuerzo al interior del diente. Se pueden observar que las zonas de concentración de esfuerzo corresponden a las mismas mencionadas anteriormente pero en esta ocasión la zona de concentración de esfuerzos principales de tracción de la cúspide se une con la zona alrededor del acceso endodóntico produciendo un aumento en los valores de los esfuerzos.

En la figura 4.12 (a) se observa la distribución de esfuerzo interna entre rodetes marginales. Se puede apreciar que los mayores esfuerzos se observan en el rodete marginal distal alrededor de la zona de carga y en menor medida se aprecian esfuerzos en toda la zona del esmalte mesial posterior al acceso.

En la figura 4.12 (b) se observa la distribución de esfuerzo en la zona apical. Se puede apreciar que en la apertura del conducto radicular se concentran esfuerzos llegando en su zona máxima a aproximadamente 12 MPa.

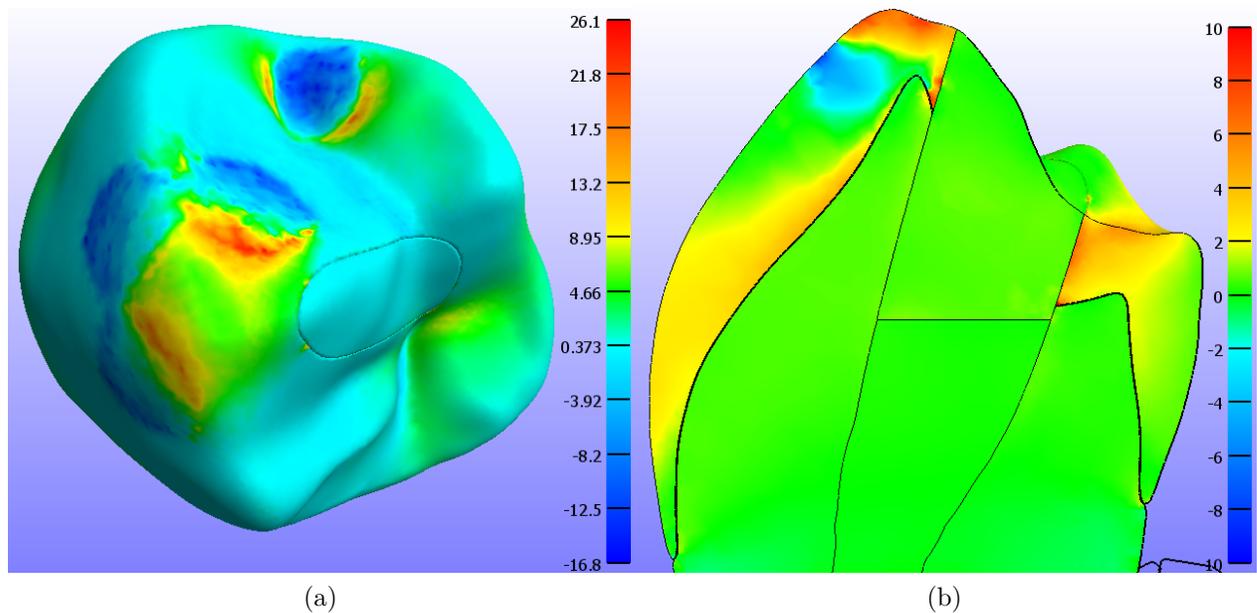


Figura 4.11: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico tradicional bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.

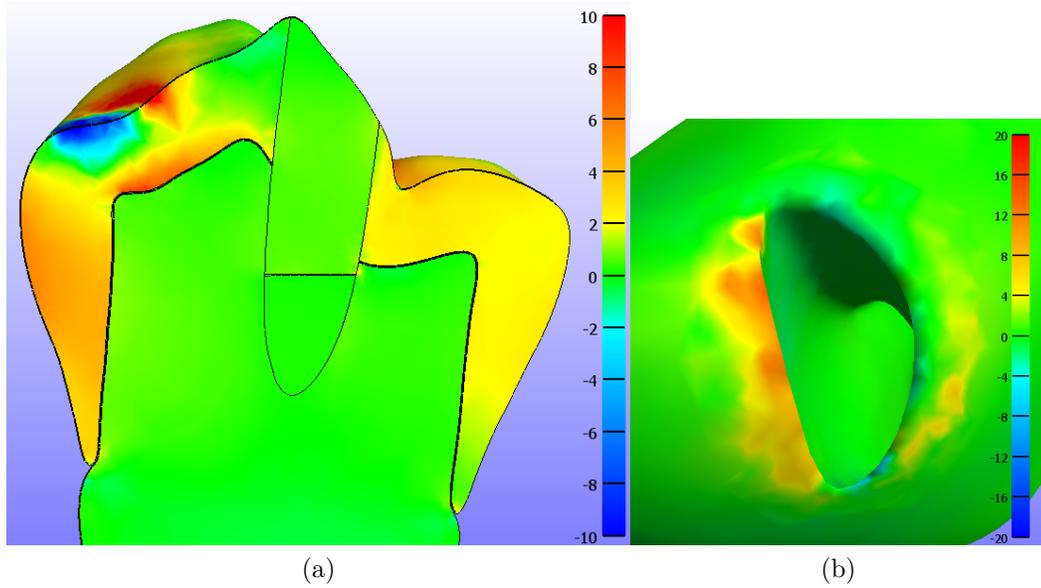


Figura 4.12: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodónico tradicional bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.

En la figura 4.12 (c) y (d) se pueden observar la distribución de esfuerzo en la cara distal y mesial del diente. Se advierte que en la dentina no se observan esfuerzos considerables mientras que en el esmalte cercano a la zona cervical existen esfuerzos principales de tracción alrededor de los 6 MPa.

4.1.5. Diente con acceso endodónico extendido

En la figura 4.13 (a) se puede observar que el esfuerzo máximo principal obtenido corresponde a 30.1 MPa. Tal como en el diente con acceso endodónico tradicional las zonas de mayor tracción corresponden a la cúspide y en el rodete marginal distal alrededor de la fosa distal. Además se aprecian levemente en la zona cercana a la cúspide vestibular del acceso una concentración de los esfuerzos de tracción así como también en la fosa mesial cercano al acceso. En las zonas de aplicación de carga se obtienen esfuerzos principales de compresión.

En la figura 4.13 (b) se puede observar la distribución de esfuerzo al interior del diente. Se puede observar que en este acceso se produce el mismo efecto que en el acceso tradicional pero aumentado donde las zonas de concentración de esfuerzo de la cúspide se unen completamente con la zona de concentración alrededor del acceso y a la vez se produce el mismo efecto con la zona del acceso lingual.

En la figura 4.14 (a) se observa la distribución de esfuerzo interna entre rodetes marginales. Se puede apreciar que los mayores esfuerzos se observan en el rodete marginal distal alrededor de la zona de carga y en menor medida se aprecian esfuerzos en toda la zona del esmalte mesial posterior al acceso.

En la figura 4.14 (b) se observa la distribución de esfuerzo en la zona apical. Se puede apreciar que en la apertura del conducto radicular se concentran esfuerzos llegando en su zona máxima a aproximadamente 12 MPa.

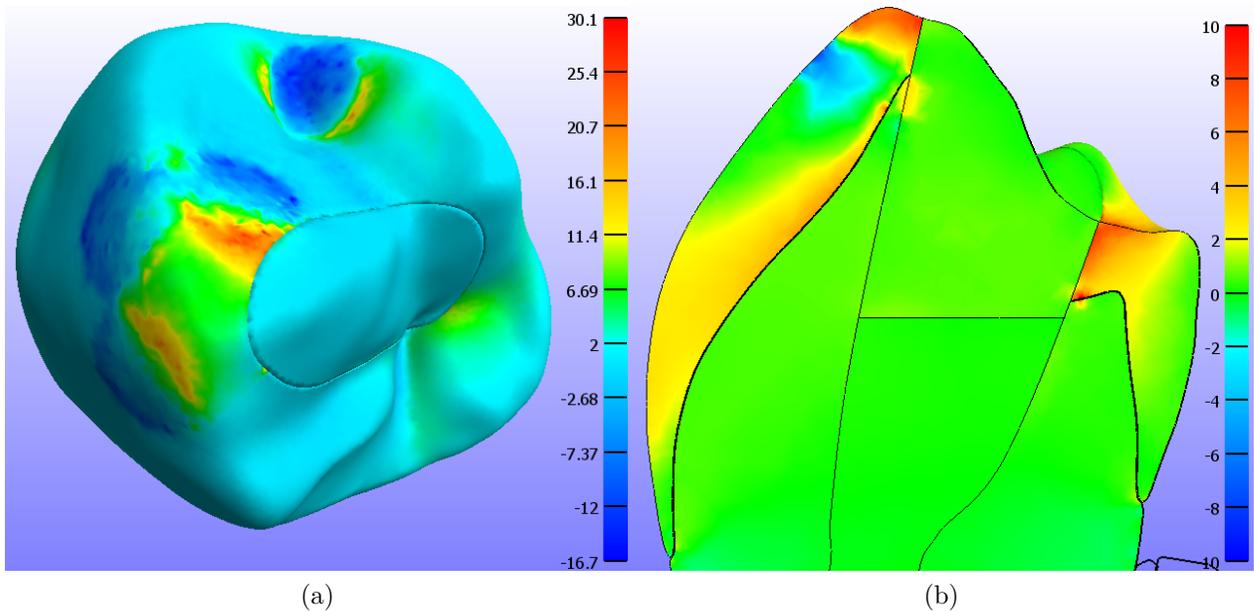


Figura 4.13: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodónico extendido bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.

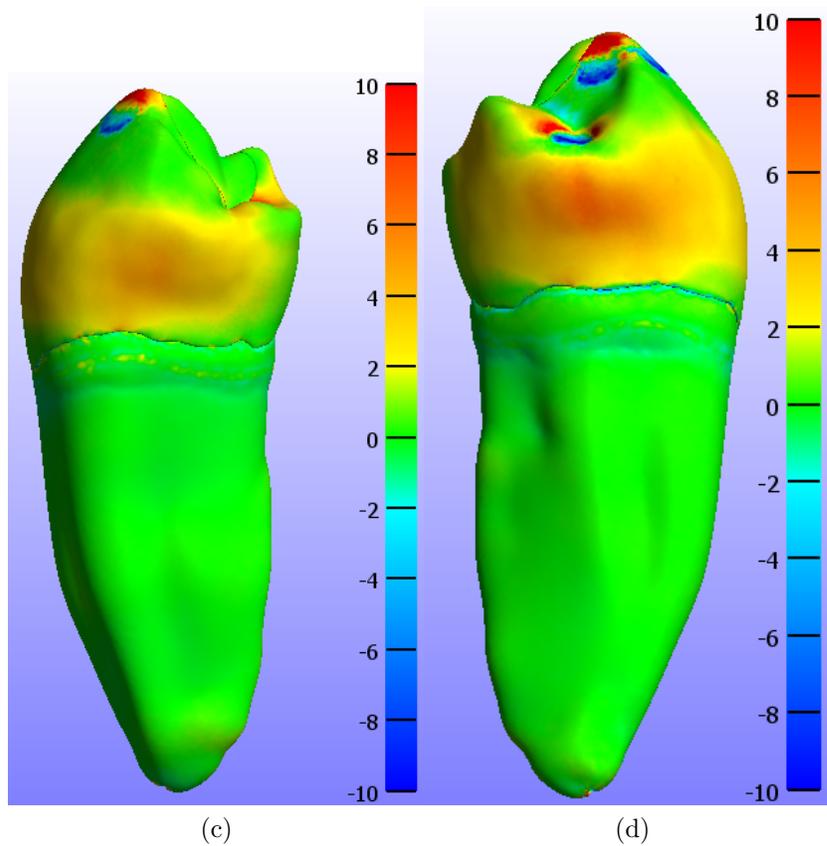
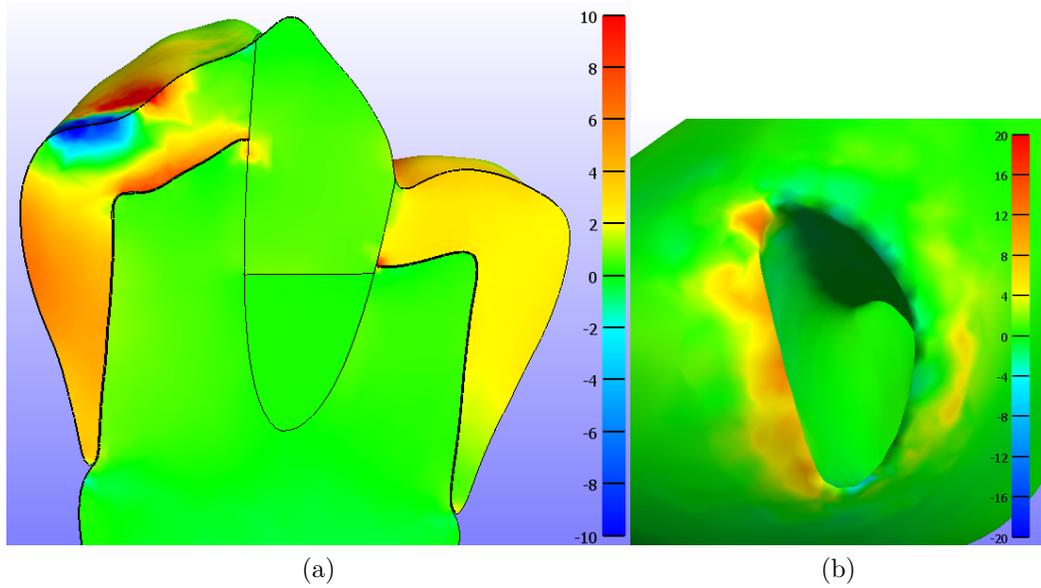


Figura 4.14: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico extendido bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.

En la figura 4.14 (c) y (d) se pueden observar la distribución de esfuerzo en la cara distal y mesial del diente. Se advierte que en la dentina no se observan esfuerzos considerables mientras que en el esmalte cercano a la zona cervical existen esfuerzos principales de tracción alrededor de los 6 MPa.

4.2. Oclusión normal 150 N, modelo ortotrópico

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para los diferentes accesos endodónticos simulados bajo una carga de oclusión normal de 150 N utilizando valores ortotrópicos para el esmalte.

4.2.1. Diente natural

En la figura 4.15 (a) se puede observar que el esfuerzo máximo principal obtenido corresponde a 14.4 MPa. Las zonas de mayor tracción corresponden a la cúspide y en la zona del rodete marginal distal alrededor de la fosa distal. En las zonas de aplicación de carga se obtienen esfuerzos principales de compresión.

En la figura 4.15 (b) se puede observar la distribución de esfuerzo al interior del diente. Se observan que las zonas principales de esfuerzos de tracción son en la cúspide vestibular, en la unión dentina-esmalte vestibular, desde la zona de la cúspide lingual interna de la dentina proyectada hacia el esmalte y en la zona de la dentina próxima al cuerno pulpar.

En la figura 4.15 (a) se observa la distribución de esfuerzo interna entre rodetes marginales. Se puede apreciar que los mayores esfuerzos se observan en el rodete marginal distal alrededor de la zona de carga y en menor medida se aprecian esfuerzos en el rodete marginal mesial.

En la figura 4.16 (b) se observa la distribución de esfuerzo en la zona apical. Se puede apreciar que en la apertura del conducto radicular se concentran esfuerzos llegando aproximadamente a 10 MPa.

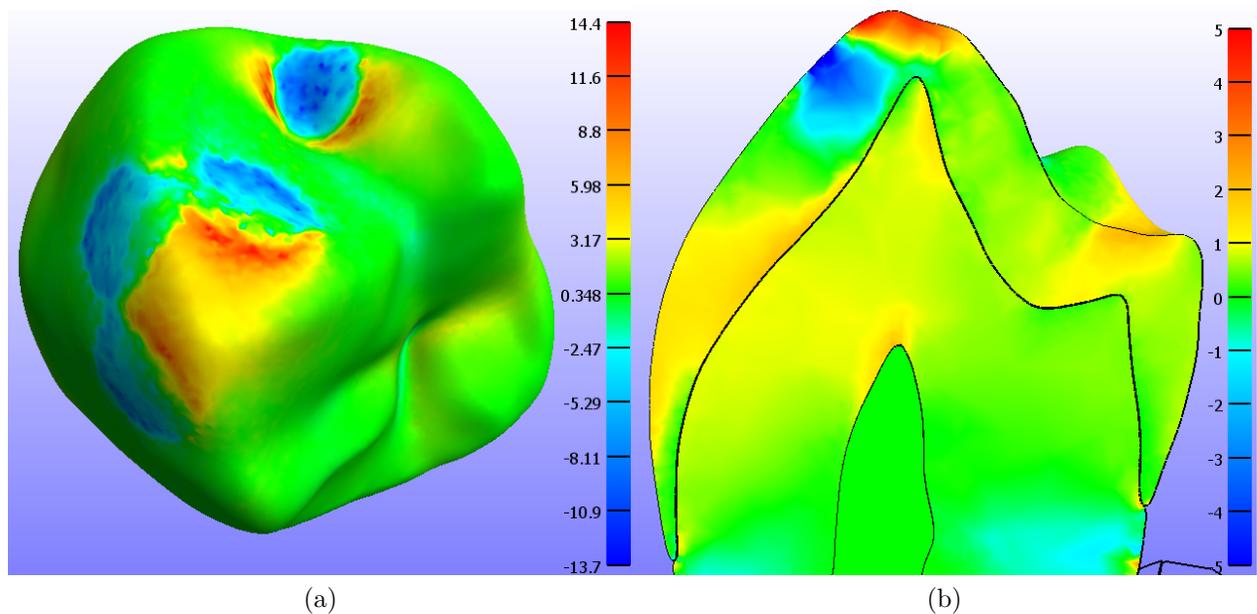


Figura 4.15: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente natural bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.

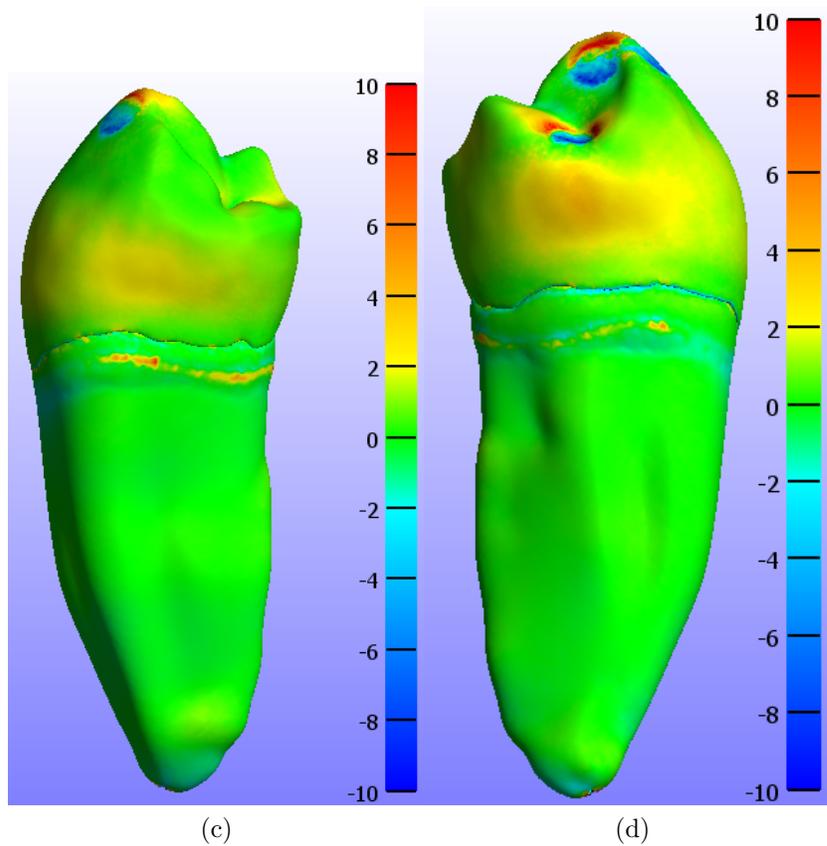
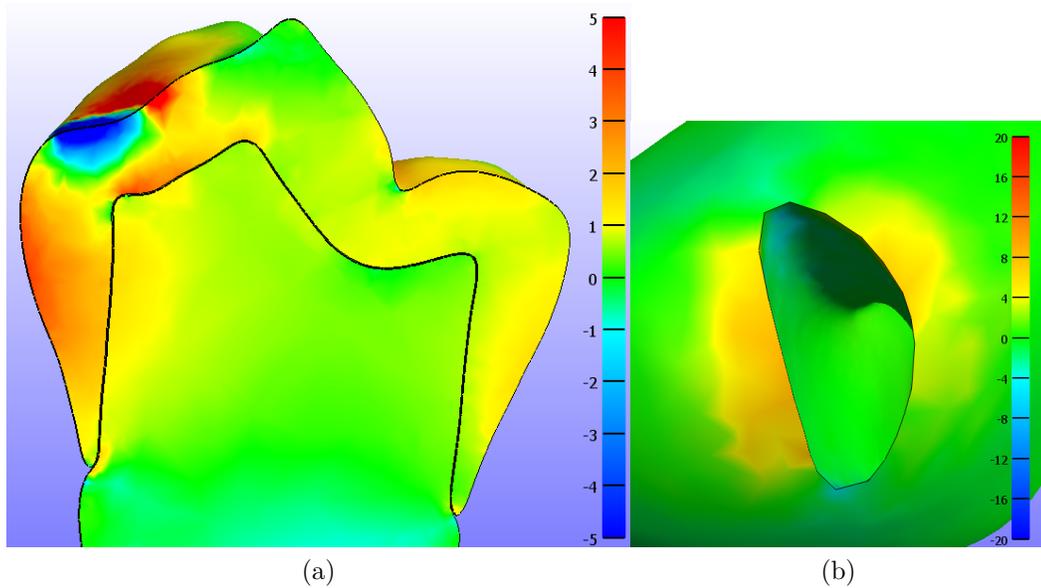


Figura 4.16: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente natural bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.

En la figura 4.16 (c) y (d) se pueden observar la distribución de esfuerzo en la cara distal y mesial del diente. Se advierte que en la dentina existe una concentración de esfuerzo a la altura del ligamento que se atribuye a un valor elevado debido a un error despreciable en las condiciones de contacto, mientras que en el esmalte cercano a la zona cervical existen

esfuerzos principales de tracción alrededor de los 6 MPa.

4.2.2. Diente con acceso endodóntico ultra conservativo

En la figura 4.17 (a) se puede observar que el esfuerzo máximo principal obtenido corresponde a 16.1 MPa. Tal como en el diente natural Las zonas de mayor tracción corresponden a la cúspide y en el rodete marginal distal alrededor de la fosa distal. Además se aprecian levemente en la zona cercana a la cúspide vestibular del acceso una concentración de los esfuerzos de tracción. En las zonas de aplicación de carga se obtienen esfuerzos principales de compresión.

En la figura 4.17 (b) se puede observar la distribución de esfuerzo al interior del diente. Se observan cuatro zonas principales de esfuerzos de tracción, los cuales son en la cúspide vestibular, en la unión dentina-esmalte vestibular, alrededor del acceso endodóntico en el esmalte y desde la zona de la cúspide lingual interna de la dentina proyectada hacia el esmalte.

En la figura 4.17 (a) se observa la distribución de esfuerzo interna entre rodetes marginales. Se puede apreciar que los mayores esfuerzos se observan en el rodete marginal alrededor de la zona de carga y en menor medida se aprecian esfuerzos en toda la zona del esmalte mesial posterior al acceso.

En la figura 4.18 (b) se observa la distribución de esfuerzo en la zona apical. Se puede apreciar que en la apertura del conducto radicular se concentran esfuerzos llegando en su zona máxima a aproximadamente 16 MPa.

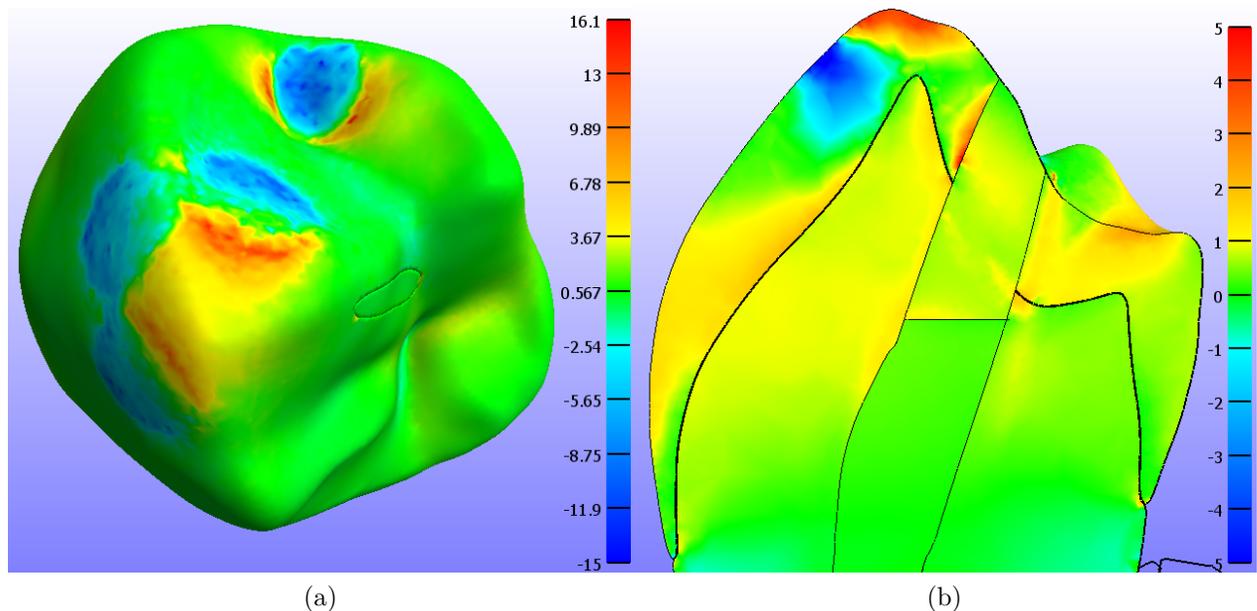


Figura 4.17: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico ultra conservativo bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.

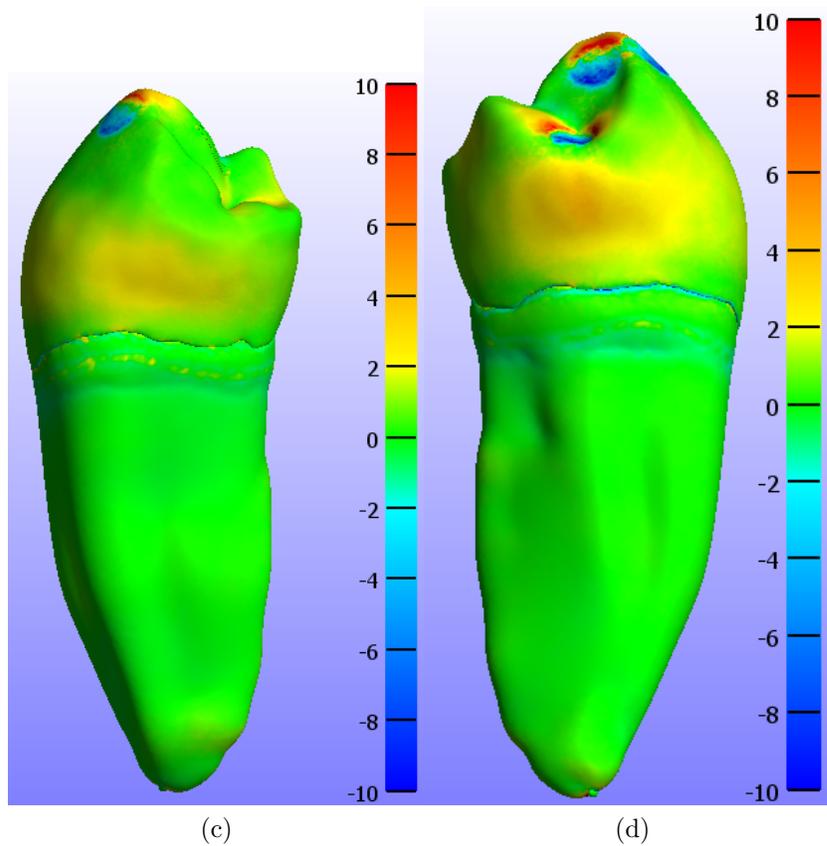
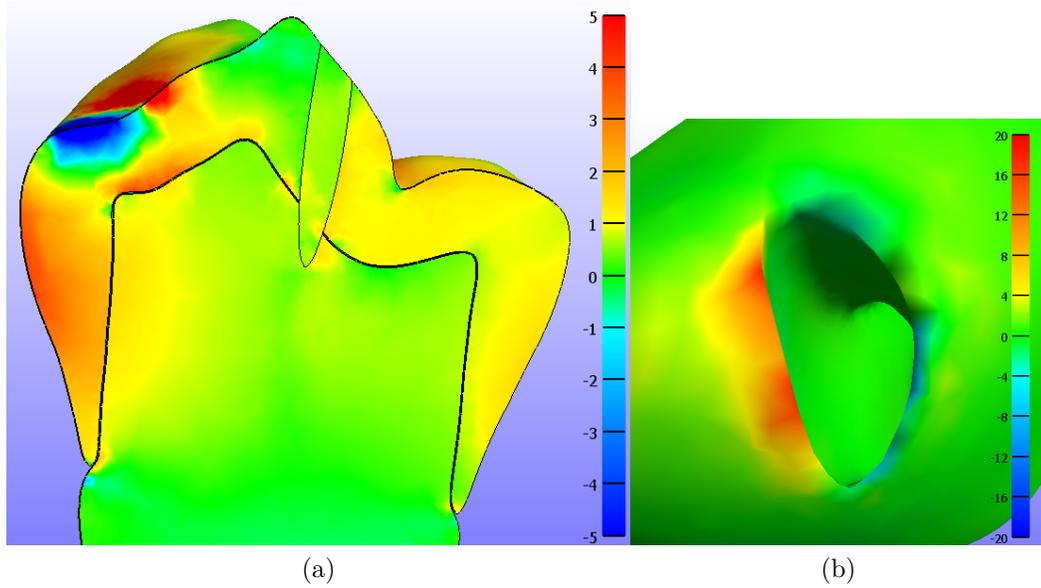


Figura 4.18: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico ultra conservativo bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.

En la figura 4.18 (c) y (d) se pueden observar la distribución de esfuerzo en la cara distal y mesial del diente. Se advierte que en la dentina no se observan esfuerzos considerables mientras que en el esmalte cercano a la zona cervical existen esfuerzos principales de tracción alrededor de los 4 MPa.

4.2.3. Diente con acceso endodóntico conservativo

En la figura 4.19 (a) se puede observar que el esfuerzo máximo principal obtenido corresponde a 17.1 MPa. Tal como en el diente con acceso endodóntico ultra conservativo las zonas de mayor tracción corresponden a la cúspide y en el rodete marginal distal alrededor de la fosa distal. Además se aprecian levemente en la zona cercana a la cúspide vestibular del acceso una concentración de los esfuerzos de tracción. En las zonas de aplicación de carga se obtienen esfuerzos principales de compresión.

En la figura 4.19 (b) se puede observar la distribución de esfuerzo al interior del diente. Se observan cuatro zonas principales de esfuerzos de tracción, los cuales son en la cúspide vestibular, en la unión dentina-esmalte vestibular, alrededor del acceso endodóntico en el esmalte y desde la zona de la cúspide lingual interna de la dentina proyectada hacia el esmalte.

En la figura 4.20 (a) se observa la distribución de esfuerzo interna entre rodetes marginales. Se puede apreciar que los mayores esfuerzos se observan en el rodete marginal distal alrededor de la zona de carga y en menor medida se aprecian esfuerzos en toda la zona del esmalte mesial posterior al acceso.

En la figura 4.20 (b) se observa la distribución de esfuerzo en la zona apical. Se puede apreciar que en la apertura del conducto radicular se concentran esfuerzos llegando en su zona máxima a aproximadamente 12 MPa.

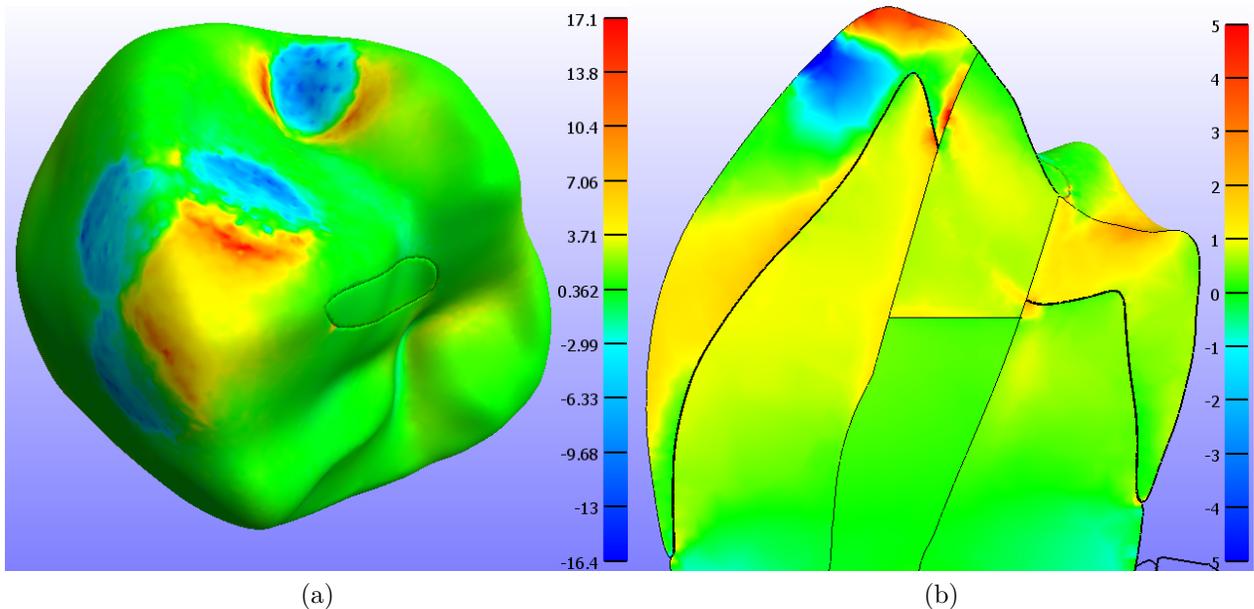


Figura 4.19: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico conservativo bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.

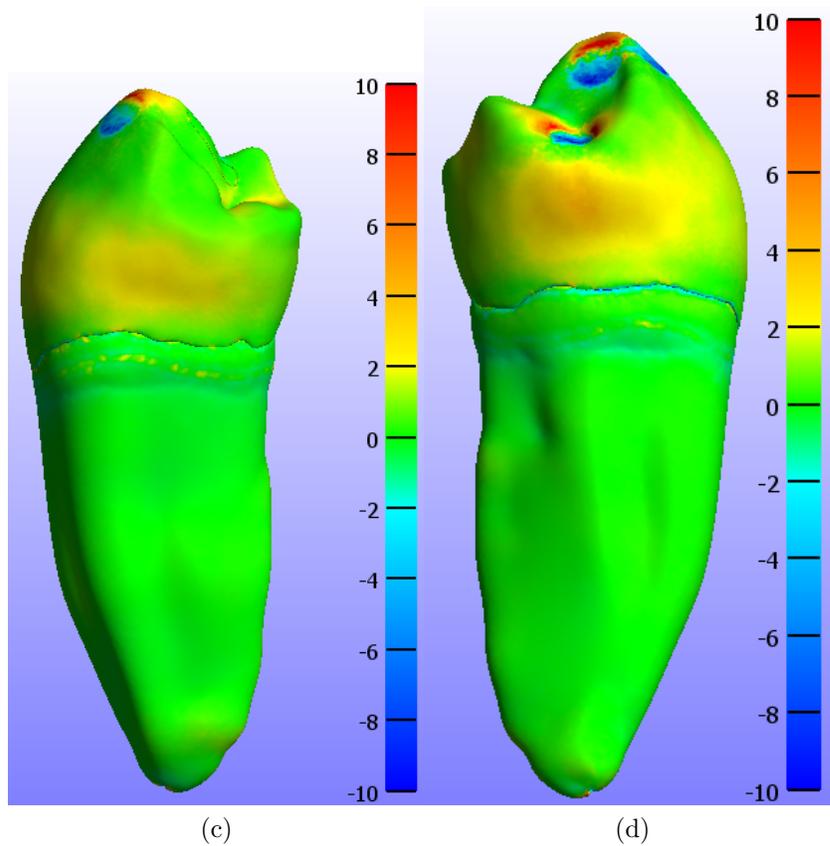
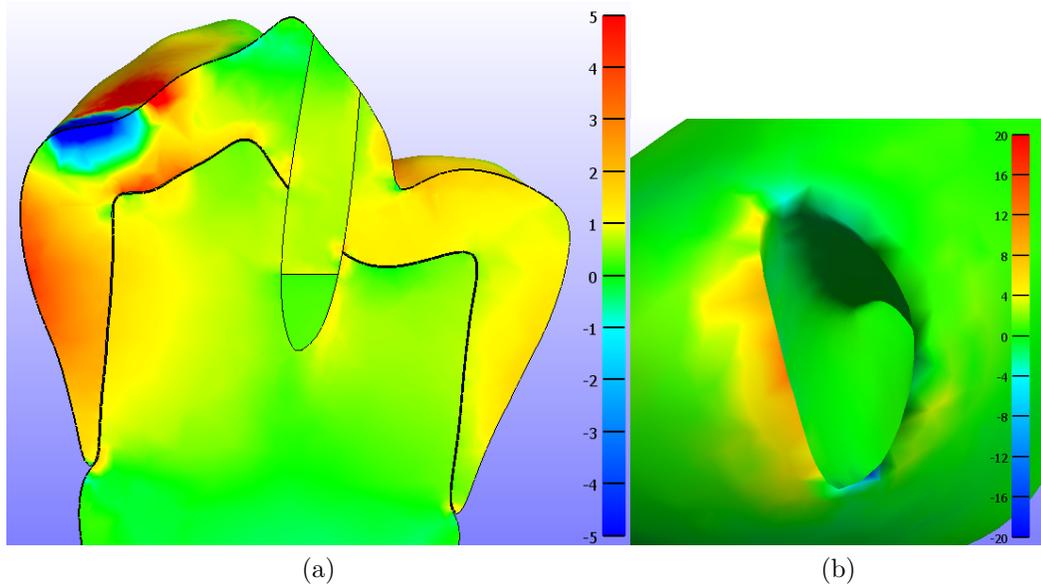


Figura 4.20: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico conservativo bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista en corte entre rodets marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.

En la figura 4.20 (c) y (d) se pueden observar la distribución de esfuerzo en la cara distal y mesial del diente. Se advierte que en la dentina no se observan esfuerzos considerables mientras que en el esmalte cercano a la zona cervical existen esfuerzos principales de tracción alrededor de los 4 MPa.

4.2.4. Diente con acceso endodóntico tradicional

En la figura 4.21 (a) se puede observar que el esfuerzo máximo principal obtenido corresponde a 16.9 MPa. Tal como en el diente con acceso endodóntico conservativo las zonas de mayor tracción corresponden a la cúspide y en el rodete marginal distal alrededor de la fosa distal. Además se aprecian levemente en la zona cercana a la cúspide vestibular del acceso una concentración de los esfuerzos de tracción así como también en la fosa mesial cercano al acceso. En las zonas de aplicación de carga se obtienen esfuerzos principales de compresión.

En la figura 4.21 (b) se puede observar la distribución de esfuerzo al interior del diente. Se pueden observar que las zonas de concentración de esfuerzo corresponden a las mismas mencionadas anteriormente pero en esta ocasión la zona de concentración de la cúspide vestibular se une a las concentraciones alrededor del acceso, este mismo efecto ocurre en la cúspide lingual.

En la figura 4.22 (a) se observa la distribución de esfuerzo interna entre rodetes marginales. Se puede apreciar que los mayores esfuerzos se observan en el rodete marginal distal alrededor de la zona de carga y en menor medida se aprecian esfuerzos en toda la zona del esmalte mesial posterior al acceso.

En la figura 4.22 (b) se observa la distribución de esfuerzo en la zona apical. Se puede apreciar que en la apertura del conducto radicular se concentran esfuerzos llegando en su zona máxima a aproximadamente 12 MPa.

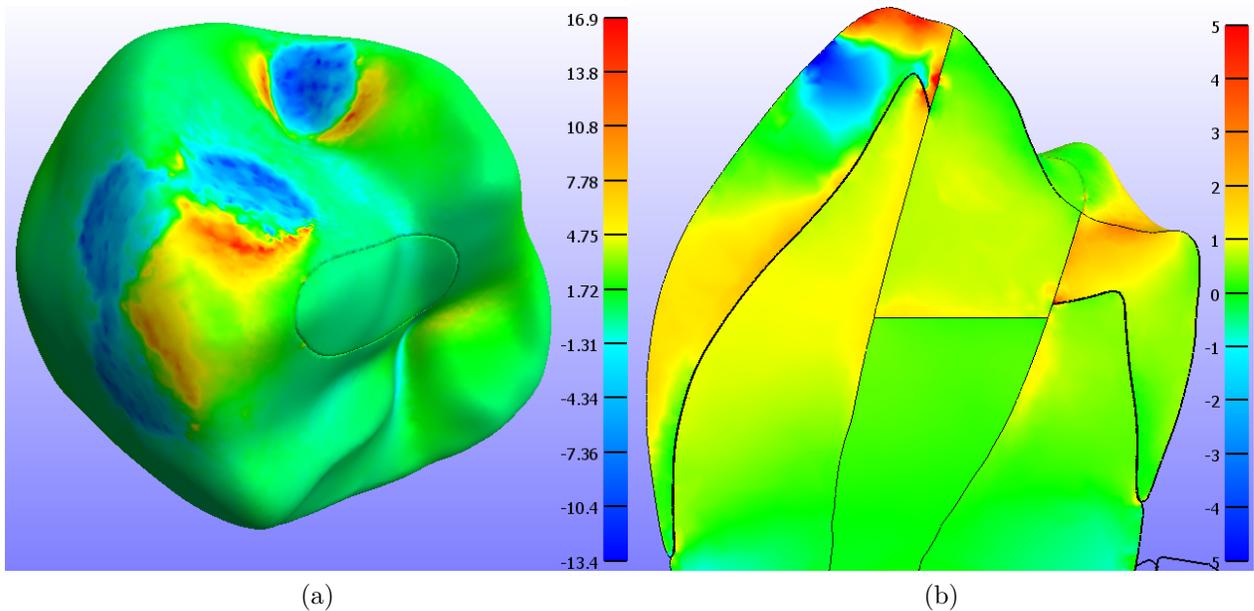


Figura 4.21: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico tradicional bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.

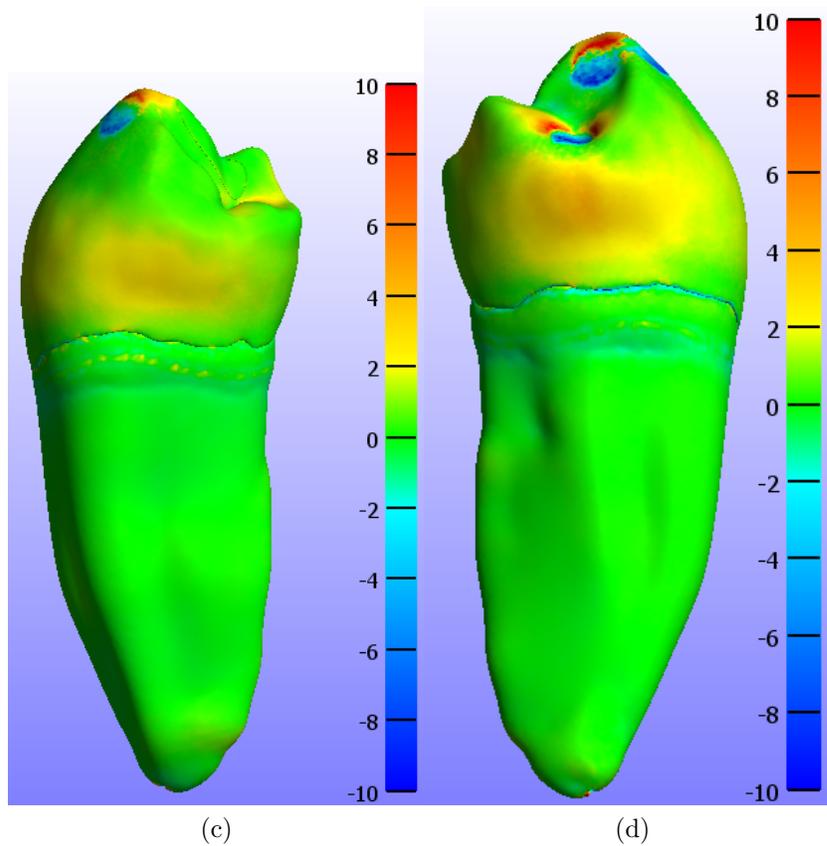
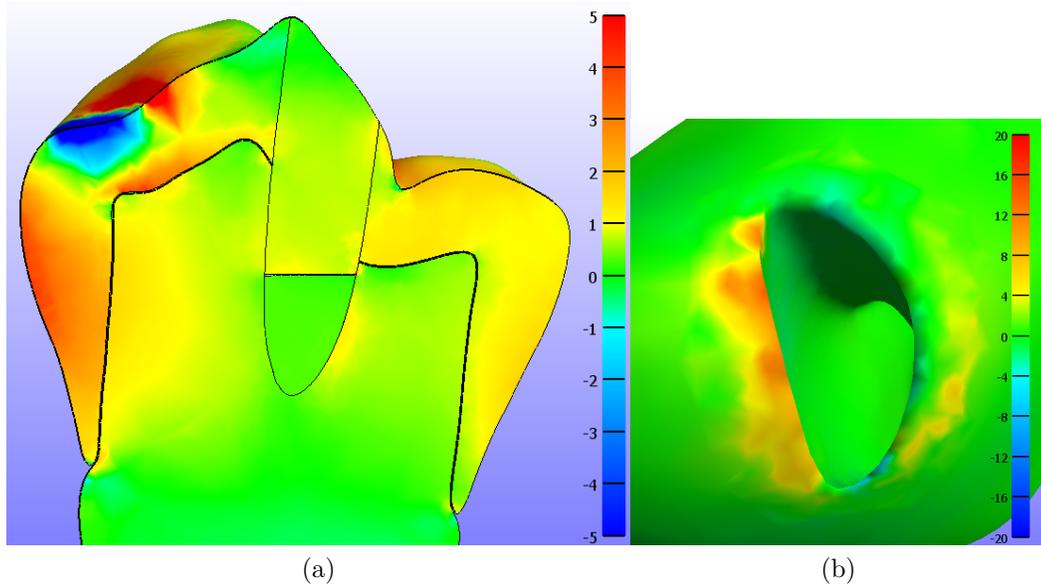


Figura 4.22: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico tradicional bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista en corte entre rodets marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.

En la figura 4.22 (c) y (d) se pueden observar la distribución de esfuerzo en la cara distal y mesial del diente. Se advierte que en la dentina no se observan esfuerzos considerables mientras que en el esmalte cercano a la zona cervical existen esfuerzos principales de tracción alrededor de los 4 MPa.

4.2.5. Diente con acceso endodóntico extendido

En la figura 4.23 (a) se puede observar que el esfuerzo máximo principal obtenido corresponde a 18.1 MPa. Tal como en el diente con acceso endodóntico tradicional las zonas de mayor tracción corresponden a la cúspide y en el rodete marginal distal alrededor de la fosa distal. Se aprecia una concentración de los esfuerzos de tracción en la fosa mesial cercano al acceso. En las zonas de aplicación de carga se obtienen esfuerzos principales de compresión.

En la figura 4.23 (b) se puede observar la distribución de esfuerzo al interior del diente. Se puede observar que en este acceso se produce el mismo efecto que en el acceso tradicional pero aumentado donde las zonas de concentración de esfuerzo de la cúspide se unen con la zona de concentración alrededor del acceso y a la vez se produce el mismo efecto con la zona del acceso lingual.

En la figura 4.24 (a) se observa la distribución de esfuerzo interna entre rodetes marginales. Se puede apreciar que los mayores esfuerzos se observan en el rodete marginal distal alrededor de la zona de carga y en menor medida se aprecian esfuerzos en toda la zona del esmalte mesial posterior al acceso.

En la figura 4.24 (c) se observa la distribución de esfuerzo en la zona apical. Se puede apreciar que en la apertura del conducto radicular se concentran esfuerzos llegando aproximadamente a 42 MPa.

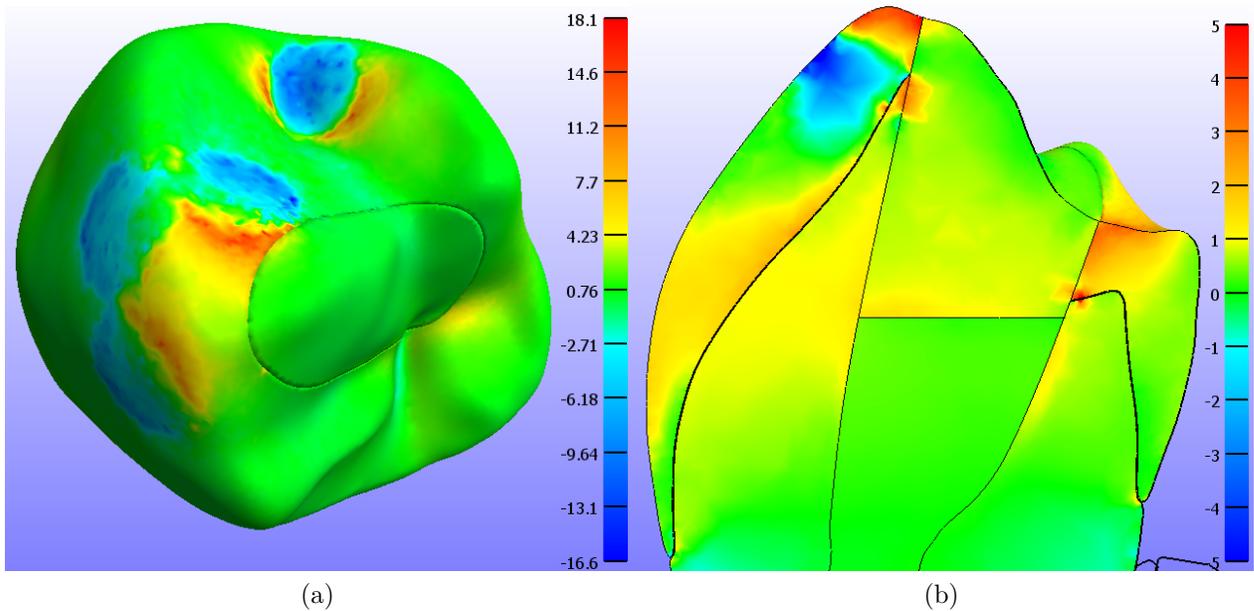


Figura 4.23: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico extendido bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.

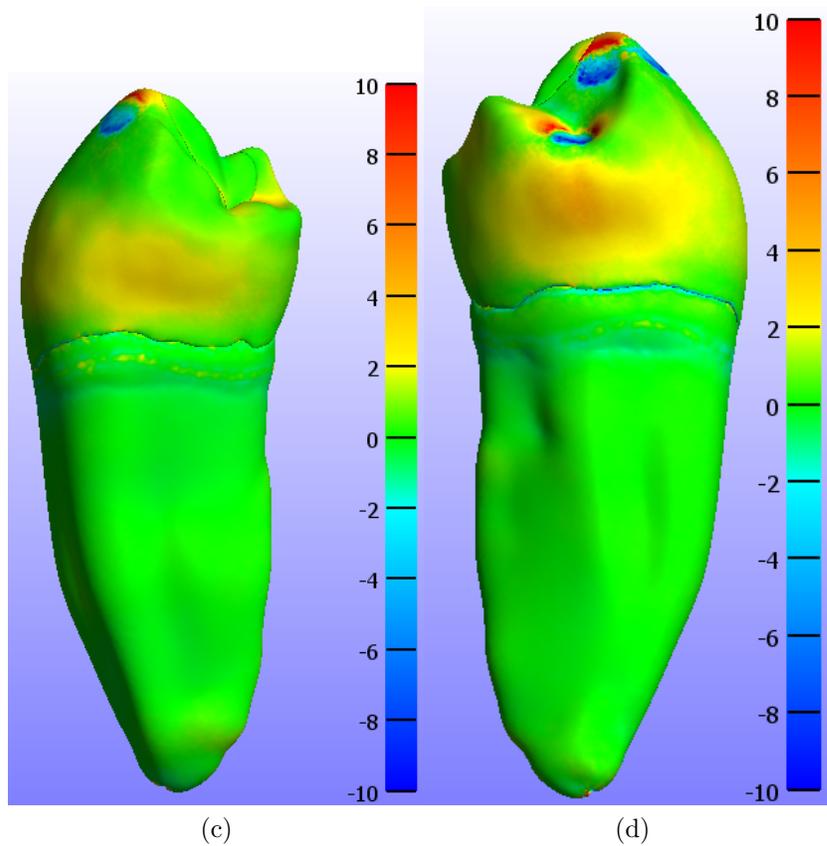
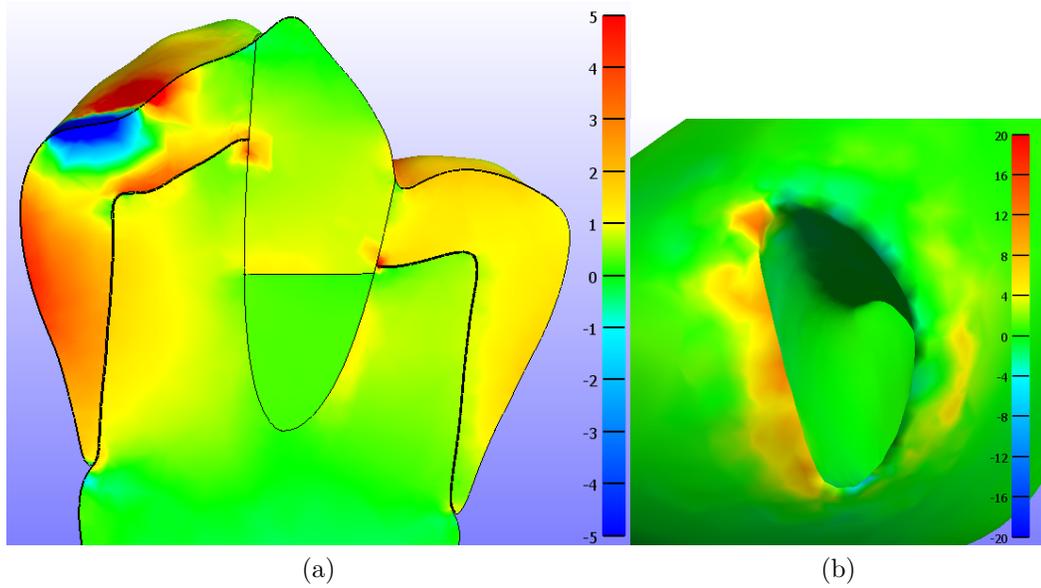


Figura 4.24: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico extendido bajo cargas de oclusión normal. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.

En la figura 4.24 (c) y (d) se pueden observar la distribución de esfuerzo en la cara distal y mesial del diente. Se advierte que en la dentina no se observan esfuerzos considerables mientras que en el esmalte cercano a la zona cervical existen esfuerzos principales de tracción alrededor de los 4 MPa.

4.3. Brúxismo 500 N, modelo isotrópico

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para los diferentes accesos endodónticos simulados bajo una carga de bruxismo de 500 N utilizando valores isotrópicos para el esmalte..

4.3.1. Diente natural

En la figura 4.25 (a) se puede observar que el esfuerzo máximo principal obtenido corresponde a 71.4 MPa. Las zonas de mayor tracción corresponden al igual que en la carga normal a la cúspide y en la zona del rodete marginal distal alrededor de la fosa distal. En las zonas de aplicación de carga se obtienen esfuerzos principales de compresión.

En la figura 4.25 (b) se puede observar la distribución de esfuerzo al interior del diente. Se observan tres zonas principales de esfuerzos de tracción, los cuales son en la cúspide vestibular, en la unión dentina-esmalte vestibular y desde la zona de la cúspide lingual interna de la dentina proyectada hacia el esmalte.

En la figura 4.26 (a) se observa la distribución de esfuerzo interna entre rodetes marginales. Se puede apreciar que los mayores esfuerzos se observan en el rodete marginal distal alrededor de la zona de carga y en menor medida se aprecian esfuerzos en el rodete marginal mesial.

En la figura 4.26 (b) se observa la distribución de esfuerzo en la zona apical. Se puede apreciar que en la apertura del conducto radicular se concentran esfuerzos llegando aproximadamente a 30 MPa.

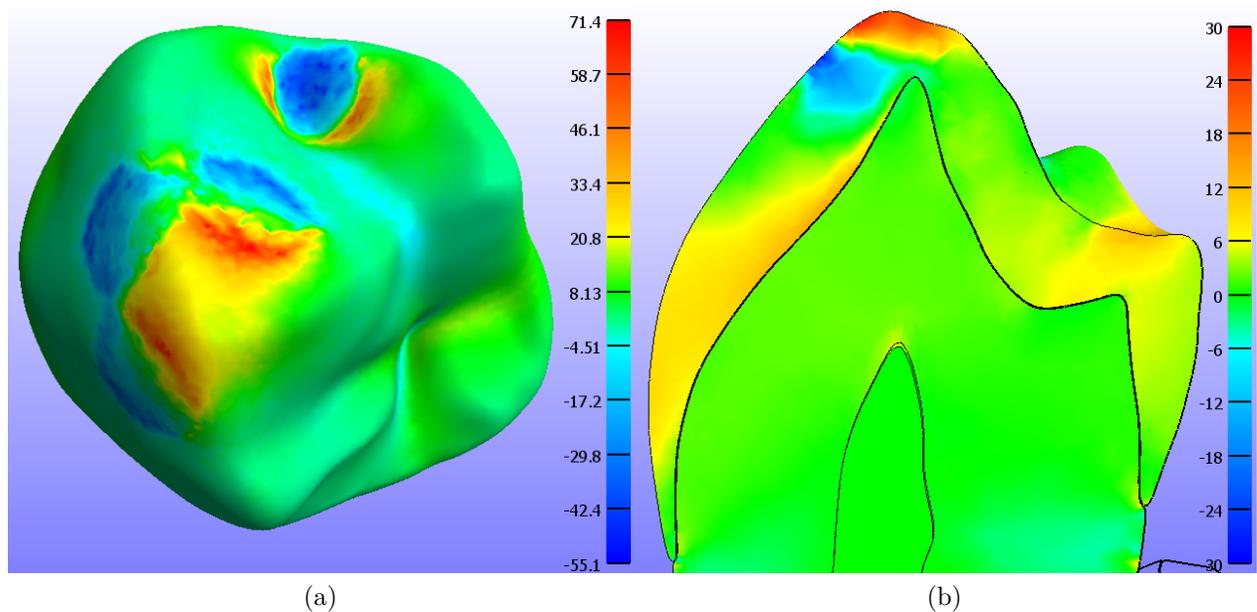


Figura 4.25: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente natural bajo cargas de bruxismo. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.

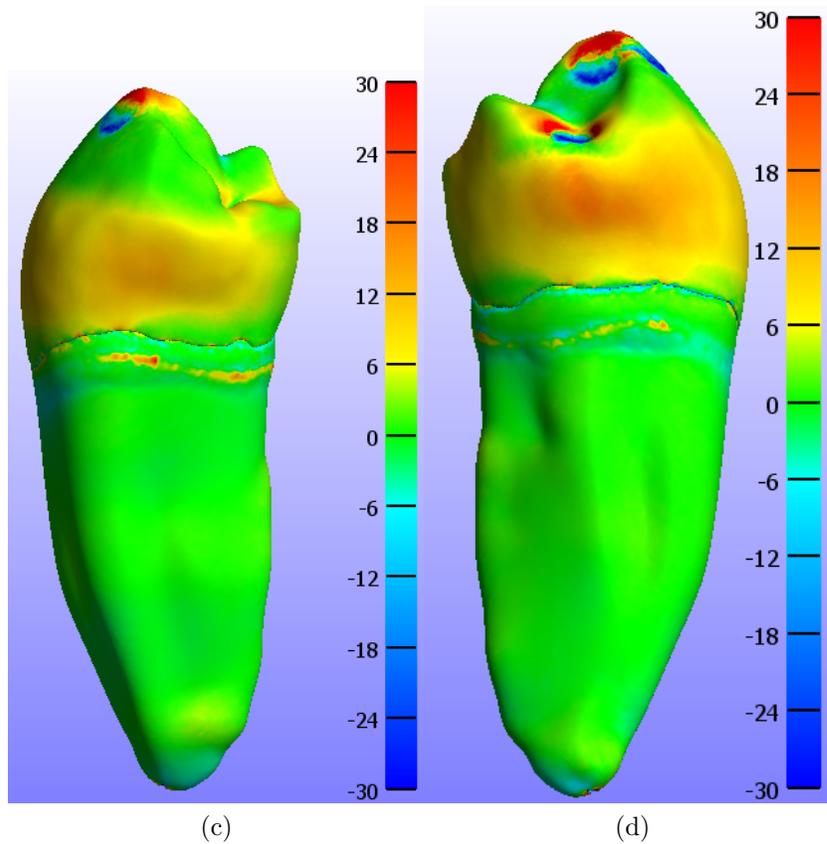
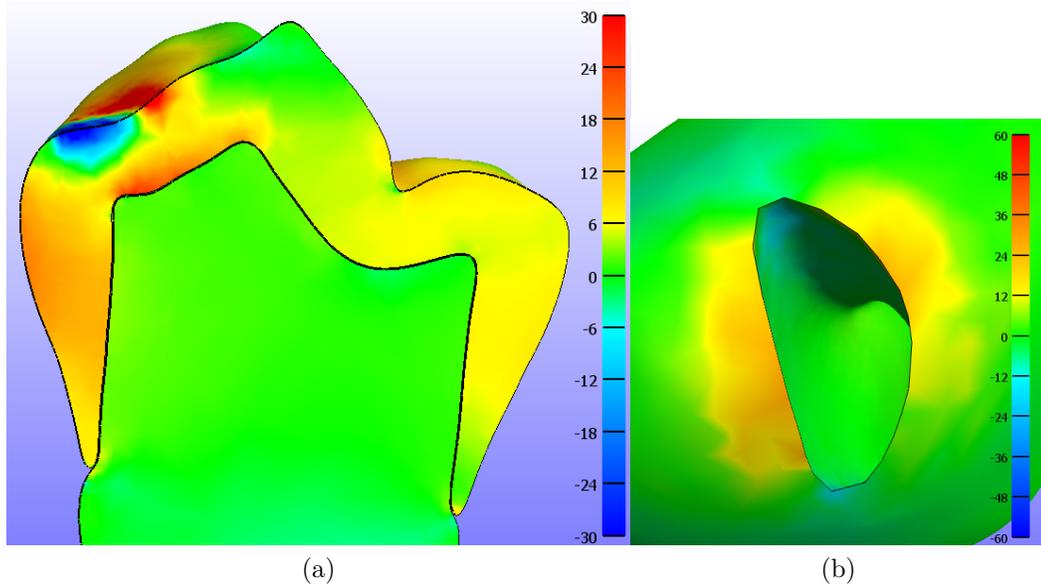


Figura 4.26: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente natural bajo cargas de bruxismo. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.

En la figura 4.26 (c) y (d) se pueden observar la distribución de esfuerzo en la cara distal y mesial del diente. Se advierte que en la dentina existe una concentración de esfuerzo a la altura del ligamento que se atribuye a un valor elevado debido a un error despreciable en las condiciones de contacto, mientras que en el esmalte cercano a la zona cervical existen

esfuerzos principales de tracción alrededor de los 20 MPa.

4.3.2. Diente con acceso endodóntico ultra conservativo

En la figura 4.27 (a) se puede observar que el esfuerzo máximo principal obtenido corresponde a 71.8 MPa. Tal como en el diente natural Las zonas de mayor tracción corresponden a la cúspide y en el rodete marginal distal alrededor de la fosa distal. Además se aprecian levemente en la zona cercana a la cúspide vestibular del acceso una concentración de los esfuerzos de tracción. En las zonas de aplicación de carga se obtienen esfuerzos principales de compresión.

En la figura 4.27 (b) se puede observar la distribución de esfuerzo al interior del diente. Se observan cuatro zonas principales de esfuerzos de tracción, los cuales son en la cúspide vestibular, en la unión dentina-esmalte vestibular, alrededor del acceso endodóntico en el esmalte y desde la zona de la cúspide lingual interna de la dentina proyectada hacia el esmalte.

En la figura 4.28 (a) se observa la distribución de esfuerzo interna entre rodetes marginales. Se puede apreciar que los mayores esfuerzos se observan en el rodete marginal alrededor de la zona de carga y en menor medida se aprecian esfuerzos en toda la zona del esmalte mesial posterior al acceso.

En la figura 4.28 (b) se observa la distribución de esfuerzo en la zona apical. Se puede apreciar que en la apertura del conducto radicular se concentran esfuerzos llegando aproximadamente a 50 MPa.

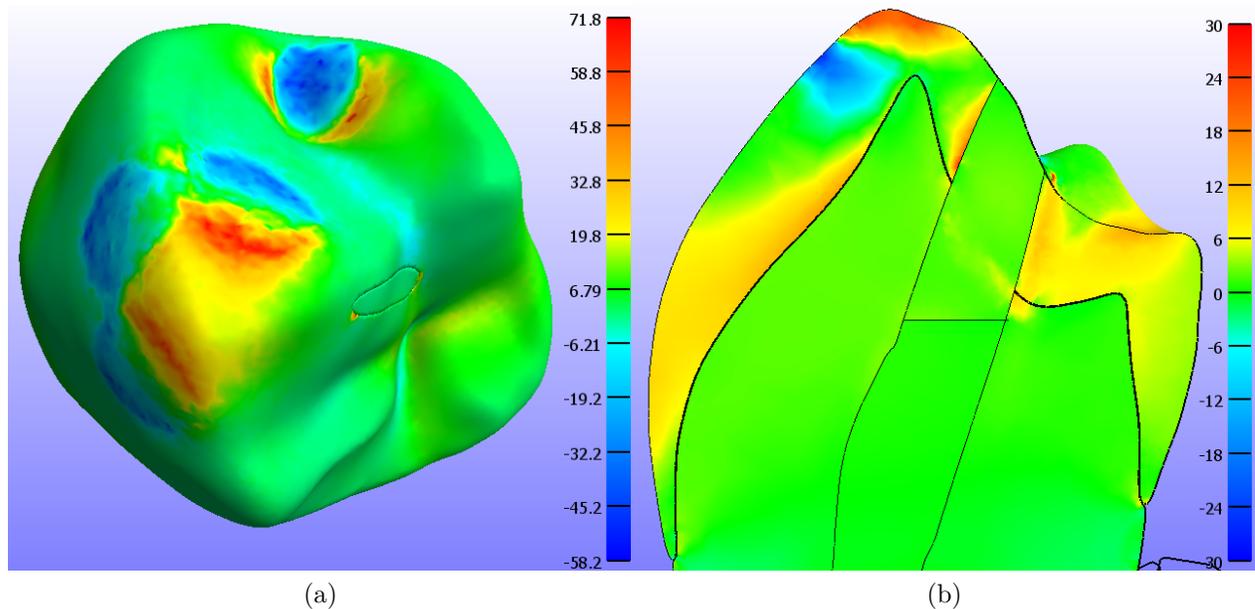


Figura 4.27: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico ultra conservativo bajo cargas de bruxismo. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.

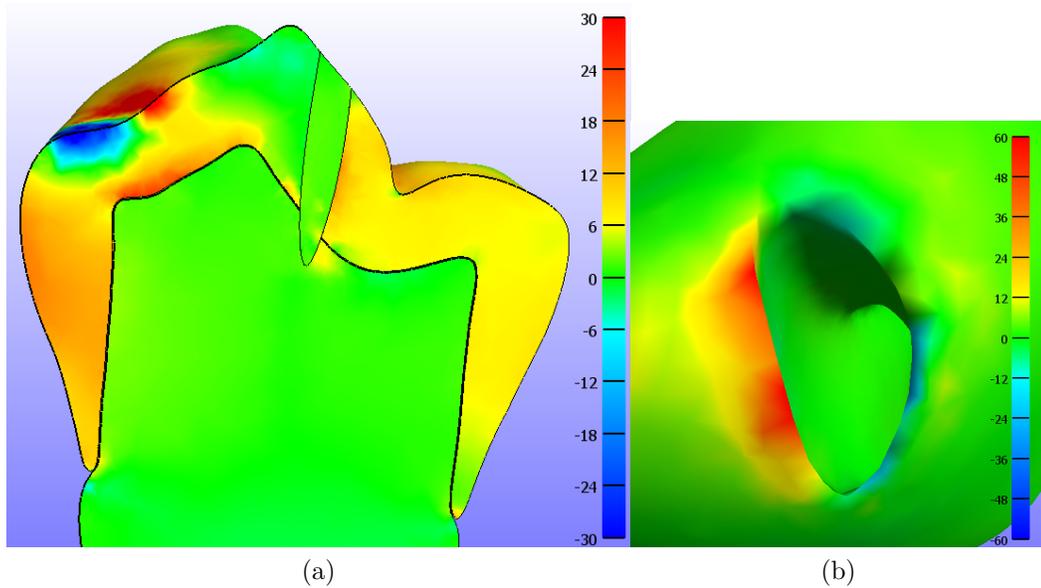


Figura 4.28: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodónico ultra conservativo bajo cargas de bruxismo. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.

En la figura 4.28 (c) y (d) se pueden observar la distribución de esfuerzo en la cara distal y mesial del diente. Se advierte que en la dentina no se observan esfuerzos considerables mientras que en el esmalte cercano a la zona cervical existen esfuerzos principales de tracción alrededor de los 20 MPa.

4.3.3. Diente con acceso endodóntico conservativo

En la figura 4.29 (a) se puede observar que el esfuerzo máximo principal obtenido corresponde a 86.9 MPa. Tal como en el diente natural Las zonas de mayor tracción corresponden a la cúspide y en el rodete marginal distal alrededor de la fosa distal. Además se aprecian levemente en la zona cercana a la cúspide vestibular del acceso una concentración de los esfuerzos de tracción. En las zonas de aplicación de carga se obtienen esfuerzos principales de compresión.

En la figura 4.29 (b) se puede observar la distribución de esfuerzo al interior del diente. Se observan cuatro zonas principales de esfuerzos de tracción, los cuales son en la cúspide vestibular, en la unión dentina-esmalte vestibular, alrededor del acceso endodóntico en el esmalte y desde la zona de la cúspide lingual interna de la dentina proyectada hacia el esmalte.

En la figura 4.30 (a) se observa la distribución de esfuerzo interna entre rodetes marginales. Se puede apreciar que los mayores esfuerzos se observan en el rodete marginal distal alrededor de la zona de carga y en menor medida se aprecian esfuerzos en toda la zona del esmalte mesial posterior al acceso.

En la figura 4.30 (b) se observa la distribución de esfuerzo en la zona apical. Se puede apreciar que en la apertura del conducto radicular se concentran esfuerzos llegando en su zona máxima a aproximadamente 40 MPa.

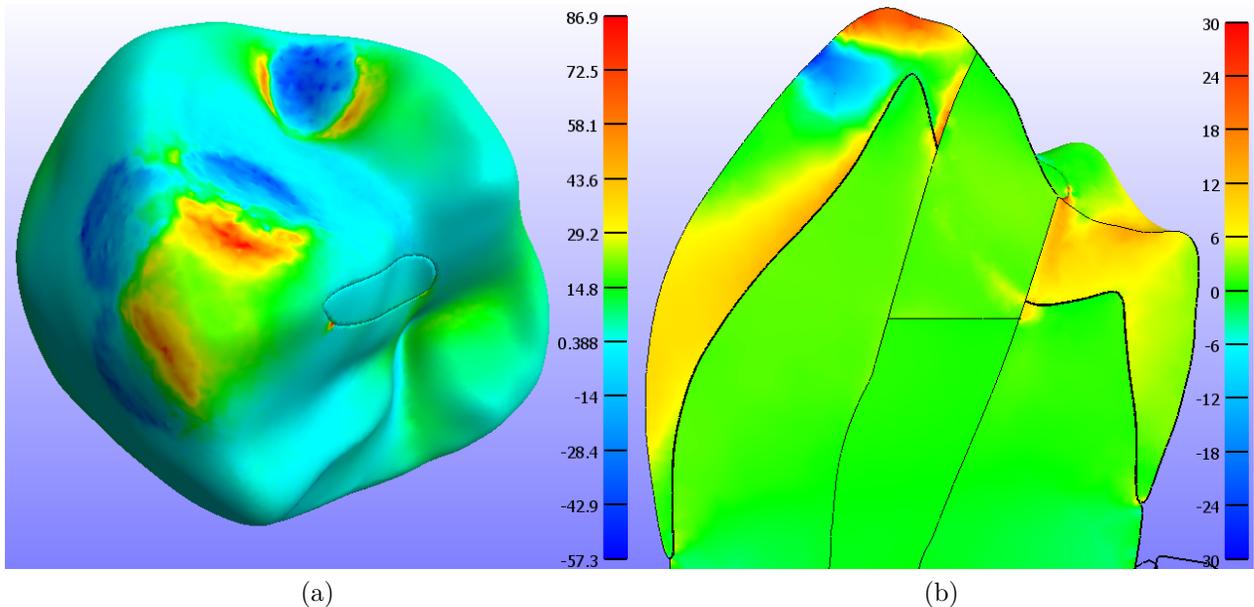


Figura 4.29: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico conservativo bajo cargas de bruxismo. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.

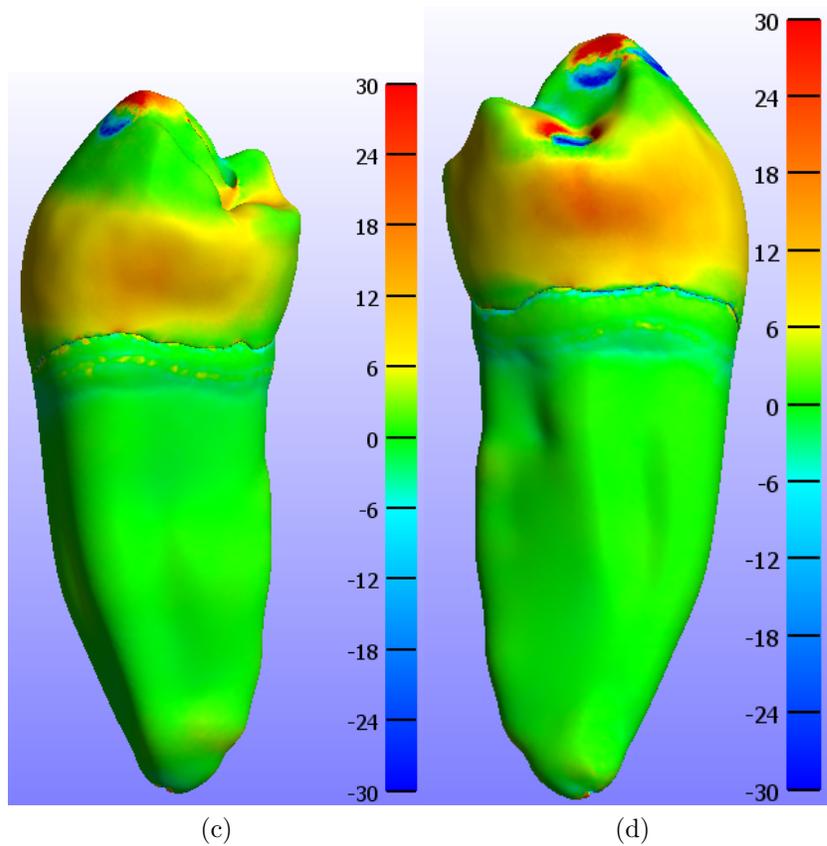
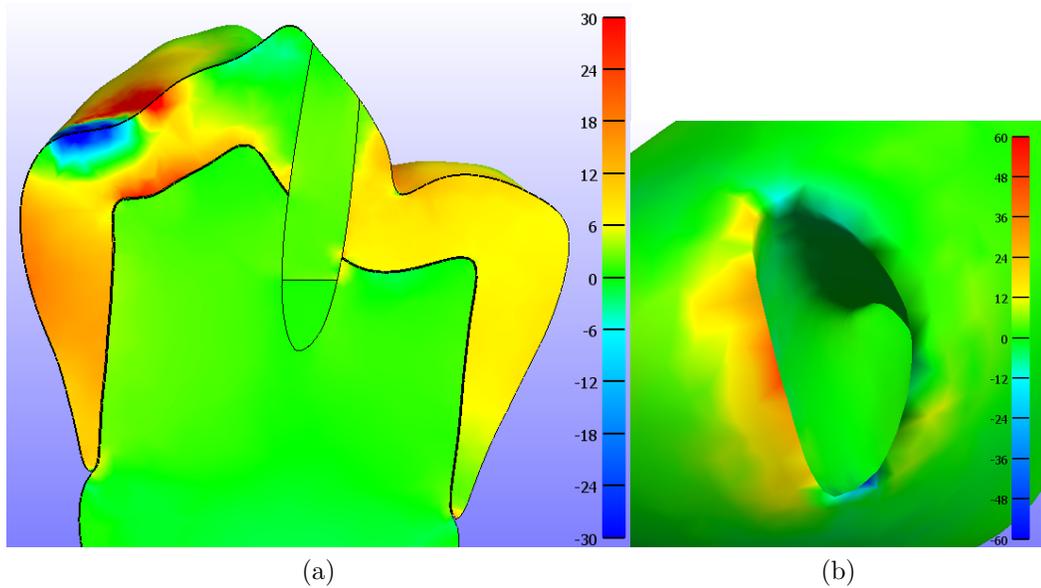


Figura 4.30: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico conservativo bajo cargas de bruxismo. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.

En la figura 4.30 (c) y (d) se pueden observar la distribución de esfuerzo en la cara distal y mesial del diente. Se advierte que en la dentina no se observan esfuerzos considerables mientras que en el esmalte cercano a la zona cervical existen esfuerzos principales de tracción alrededor de los 20 MPa.

4.3.4. Diente con acceso endodóntico tradicional

En la figura 4.31 (a) se puede observar que el esfuerzo máximo principal obtenido corresponde a 87.3 MPa. Tal como en el diente con acceso endodóntico conservativo las zonas de mayor tracción corresponden a la cúspide y en el rodete marginal distal alrededor de la fosa distal. Además se aprecian levemente en la zona cercana a la cúspide vestibular del acceso una concentración de los esfuerzos de tracción así como también en la fosa mesial cercano al acceso. En las zonas de aplicación de carga se obtienen esfuerzos principales de compresión.

En la figura 4.31 (b) se puede observar la distribución de esfuerzo al interior del diente. Se pueden observar que las zonas de concentración de esfuerzo corresponden a las mismas mencionadas anteriormente pero en esta ocasión la zona de concentración de esfuerzos principales de tracción de la cúspide se une con la zona alrededor del acceso endodóntico produciendo un aumento en los valores de los esfuerzos.

En la figura 4.32 (a) se observa la distribución de esfuerzo interna entre rodetes marginales. Se puede apreciar que los mayores esfuerzos se observan en el rodete marginal distal alrededor de la zona de carga y en menor medida se aprecian esfuerzos en toda la zona del esmalte mesial posterior al acceso.

En la figura 4.31 (c) (b) se observa la distribución de esfuerzo en la zona apical. Se puede apreciar que en la apertura del conducto radicular se concentran esfuerzos llegando en su zona máxima a aproximadamente 40MPa.

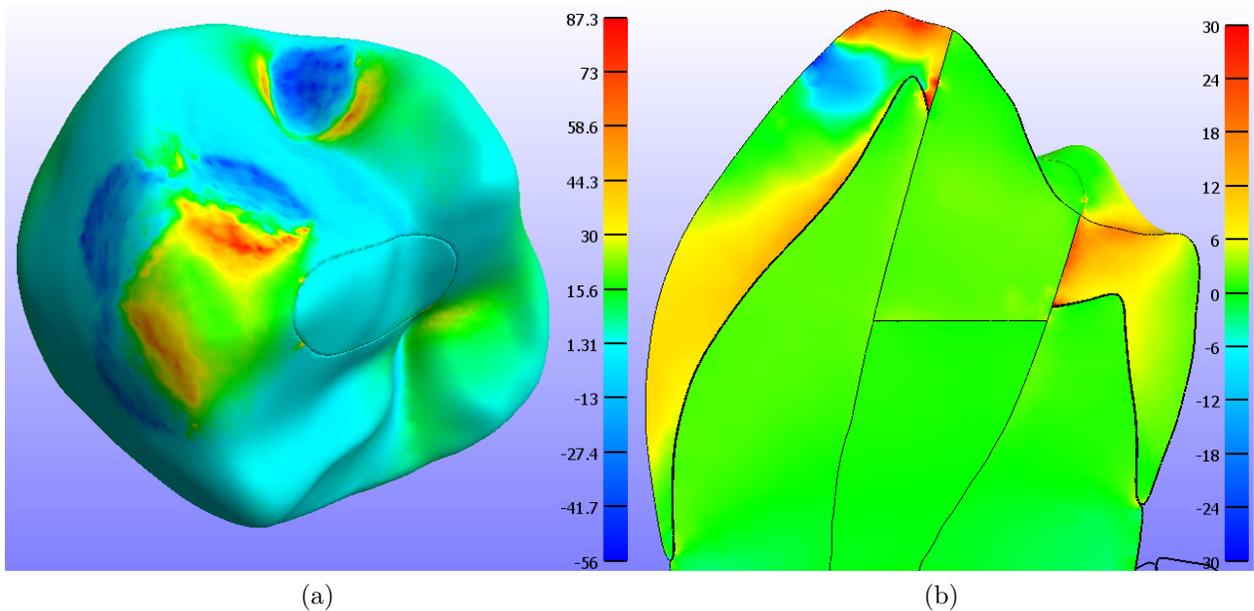


Figura 4.31: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico tradicional bajo cargas de bruxismo. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.

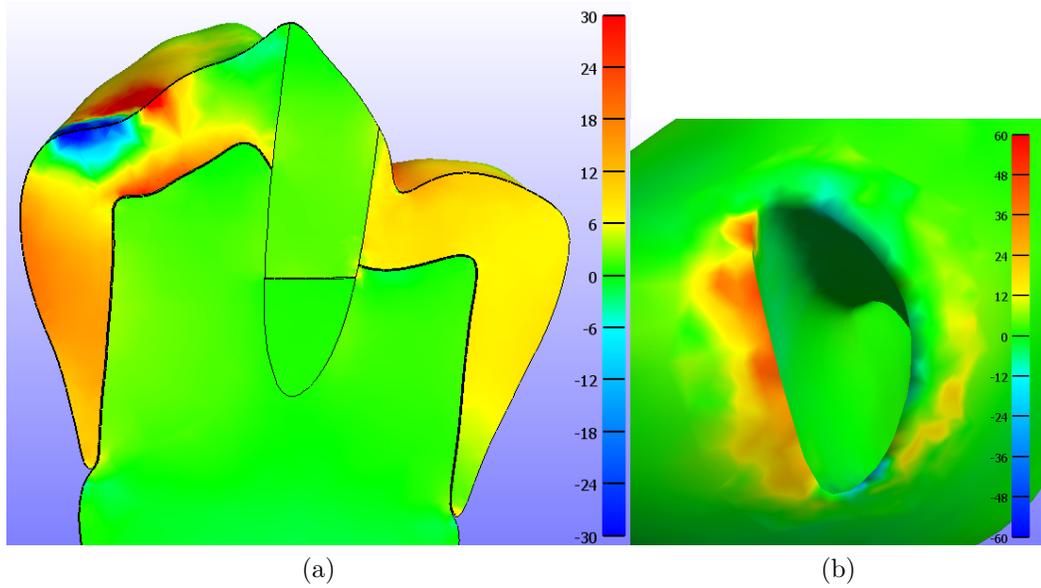


Figura 4.32: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodónico tradicional bajo cargas de bruxismo. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.

En la figura 4.31 (c) y (d) se pueden observar la distribución de esfuerzo en la cara distal y mesial del diente. Se advierte que en la dentina no se observan esfuerzos considerables mientras que en el esmalte cercano a la zona cervical existen esfuerzos principales de tracción alrededor de los 40 MPa.

4.3.5. Diente con acceso endodóntico extendido

En la figura 4.33 (a) se puede observar que el esfuerzo máximo principal obtenido corresponde a 101 MPa. Tal como en el diente con acceso endodóntico tradicional las zonas de mayor tracción corresponden a la cúspide y en el rodete marginal distal alrededor de la fosa distal. Además se aprecian levemente en la zona cercana a la cúspide vestibular del acceso una concentración de los esfuerzos de tracción así como también en la fosa mesial cercano al acceso. En las zonas de aplicación de carga se obtienen esfuerzos principales de compresión.

En la figura 4.33 (b) se puede observar la distribución de esfuerzo al interior del diente. Se puede observar que en este acceso se produce el mismo efecto que en el acceso tradicional pero aumentado donde las zonas de concentración de esfuerzo de la cúspide se unen completamente con la zona de concentración alrededor del acceso y a la vez se produce el mismo efecto con la zona del acceso lingual.

En la figura 4.34 (a) se observa la distribución de esfuerzo interna entre rodetes marginales. Se puede apreciar que los mayores esfuerzos se observan en el rodete marginal distal alrededor de la zona de carga y en menor medida se aprecian esfuerzos en toda la zona del esmalte mesial posterior al acceso con una concentración en la unión del acceso y la dentina.

En la figura 4.34 (b) se observa la distribución de esfuerzo en la zona apical. Se puede apreciar que en la apertura del conducto radicular se concentran esfuerzos llegando en su zona máxima a aproximadamente 40 MPa.

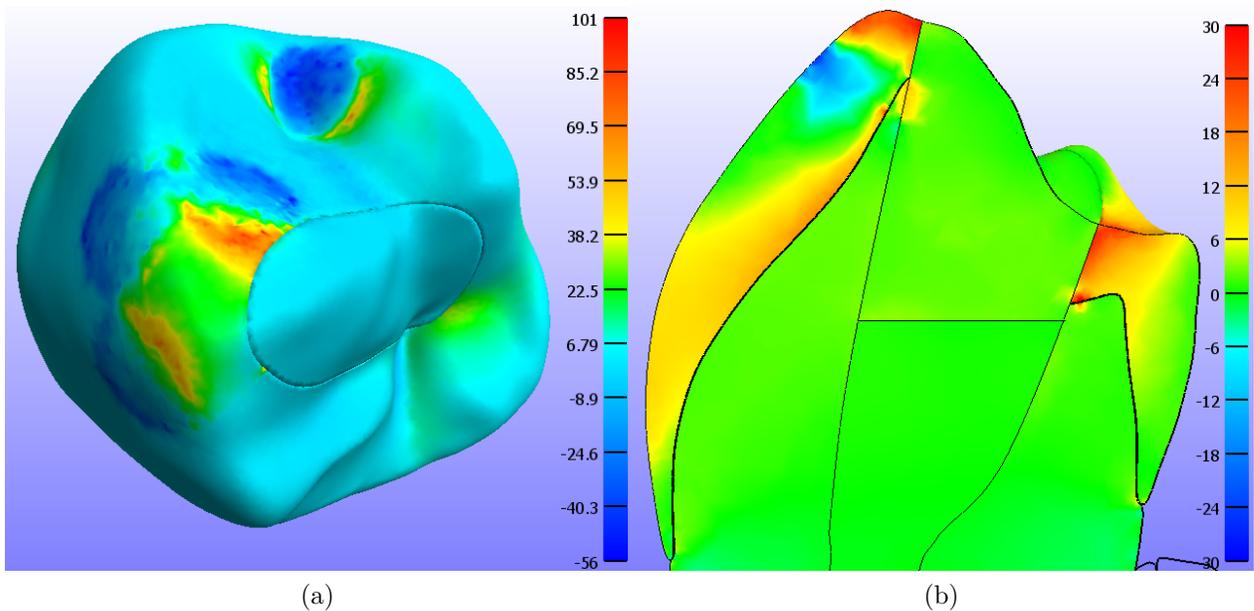


Figura 4.33: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico extendido bajo cargas de bruxismo. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.

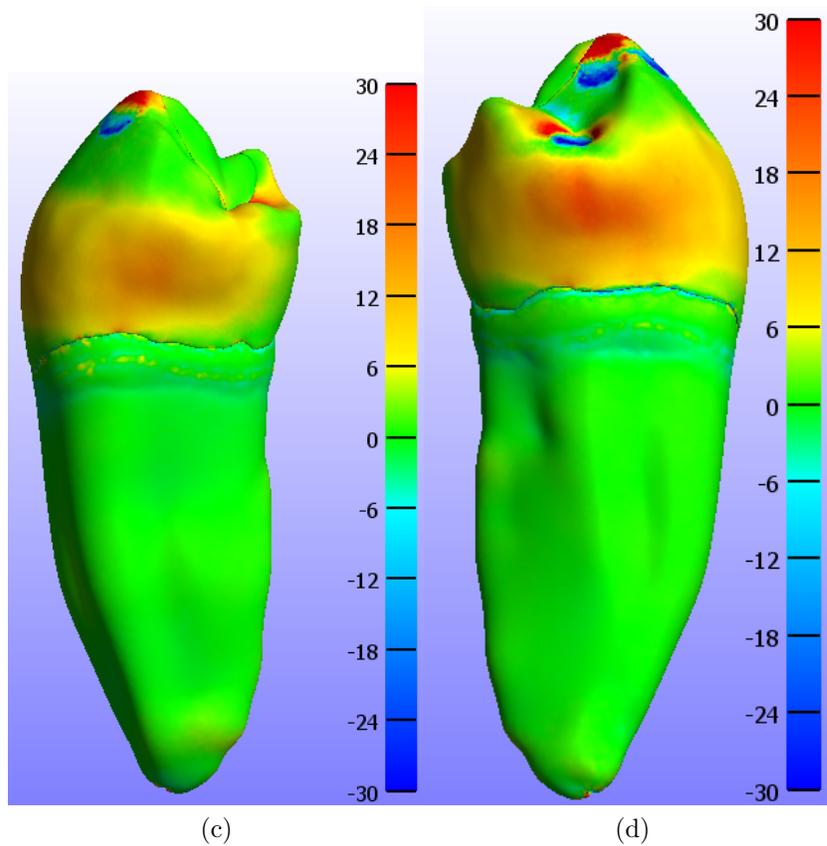
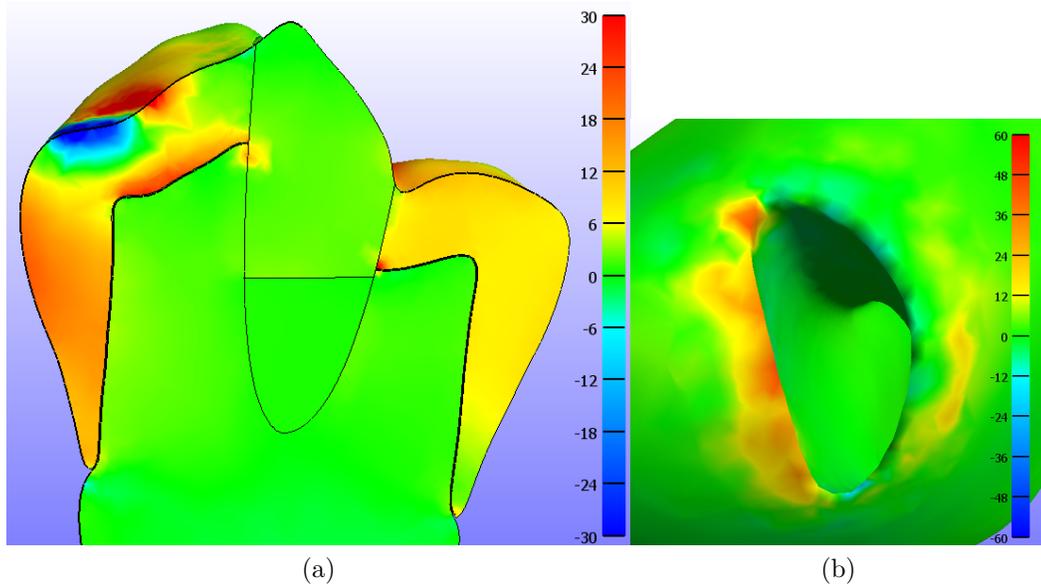


Figura 4.34: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodónico extendido bajo cargas de bruxismo. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.

En la figura 4.34 (c) y (d) se pueden observar la distribución de esfuerzo en la cara distal y mesial del diente. Se advierte que en la dentina no se observan esfuerzos considerables mientras que en el esmalte cercano a la zona cervical existen esfuerzos principales de tracción alrededor de los 20 MPa.

4.4. Brúxismo 500 N, modelo ortotrópico

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para los diferentes accesos endodónticos simulados bajo una carga de bruxismo de 500 N utilizando valores ortotrópicos para el esmalte.

4.4.1. Diente natural

En la figura 4.35 (a) se puede observar que el esfuerzo máximo principal obtenido corresponde a 48.3 MPa. Las zonas de mayor tracción corresponden a la cúspide y en la zona del rodete marginal distal alrededor de la fosa distal. En las zonas de aplicación de carga se obtienen esfuerzos principales de compresión.

En la figura 4.35 (b) se puede observar la distribución de esfuerzo al interior del diente. Se observan que las zonas principales de esfuerzos de tracción son en la cúspide vestibular, en la unión dentina-esmalte vestibular, desde la zona de la cúspide lingual interna de la dentina proyectada hacia el esmalte y en la zona de la dentina próxima al cuerno pulpar.

En la figura 4.36 (a) se observa la distribución de esfuerzo interna entre rodetes marginales. Se puede apreciar que los mayores esfuerzos se observan en el rodete marginal distal alrededor de la zona de carga y en menor medida se aprecian esfuerzos en el rodete marginal mesial.

En la figura 4.36 (b) se observa la distribución de esfuerzo en la zona apical. Se puede apreciar que en la apertura del conducto radicular se concentran esfuerzos llegando aproximadamente a 30 MPa.

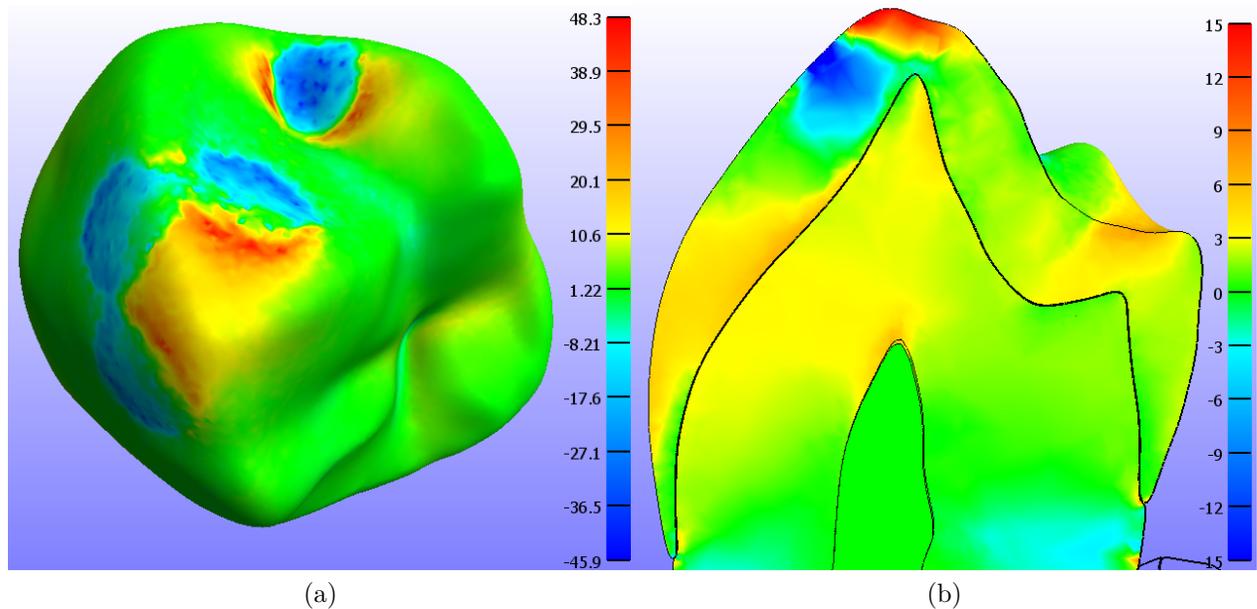


Figura 4.35: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente natural bajo cargas de bruxismo. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.

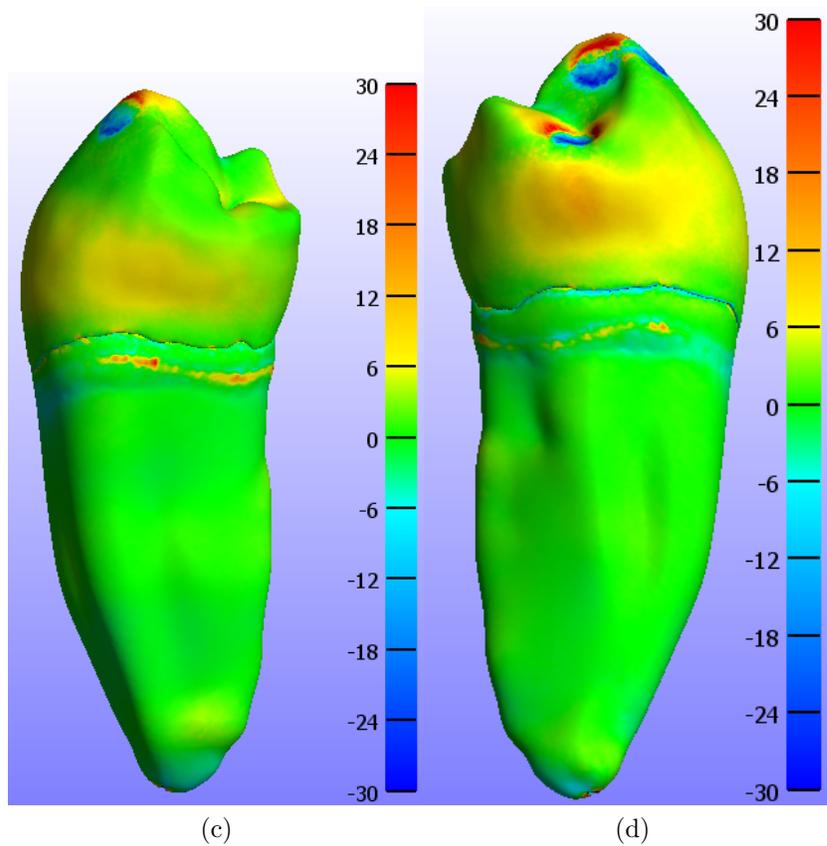
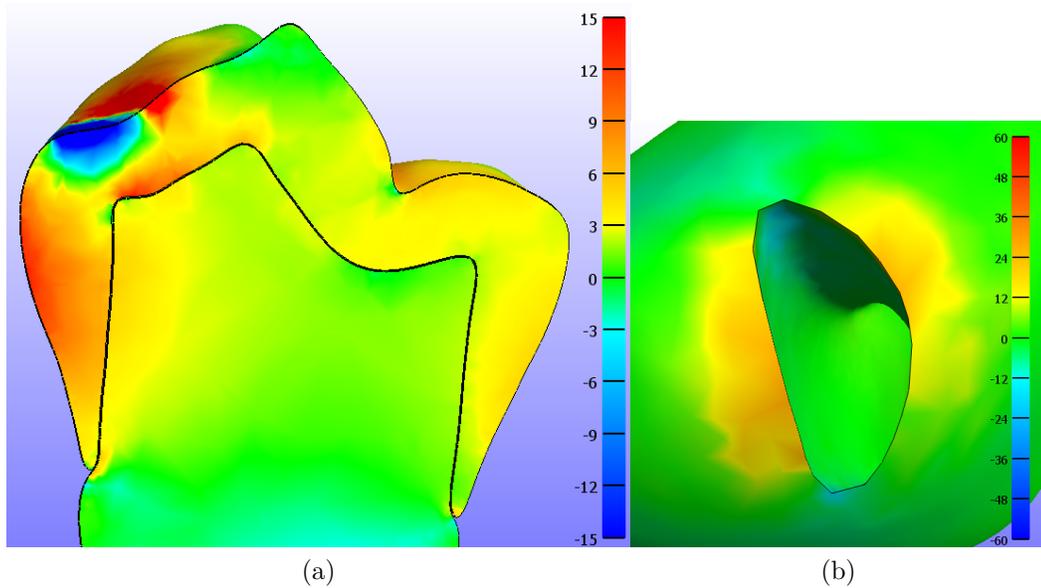


Figura 4.36: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente natural bajo cargas de bruxismo. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.

En la figura 4.36 (c) y (d) se pueden observar la distribución de esfuerzo en la cara distal y mesial del diente. Se advierte que en la dentina existe una concentración de esfuerzo a la altura del ligamento que se atribuye a un valor elevado debido a un error despreciable en las condiciones de contacto, mientras que en el esmalte cercano a la zona cervical existen

esfuerzos principales de tracción alrededor de los 15 MPa.

4.4.2. Diente con acceso endodóntico ultra conservativo

En la figura 4.37 (a) se puede observar que el esfuerzo máximo principal obtenido corresponde a 53.8 MPa. Tal como en el diente natural Las zonas de mayor tracción corresponden a la cúspide y en el rodete marginal distal alrededor de la fosa distal. Además se aprecian levemente en la zona cercana a la cúspide vestibular del acceso una concentración de los esfuerzos de tracción. En las zonas de aplicación de carga se obtienen esfuerzos principales de compresión.

En la figura 4.37 (b) se puede observar la distribución de esfuerzo al interior del diente. Se observan cuatro zonas principales de esfuerzos de tracción, los cuales son en la cúspide vestibular, en la unión dentina-esmalte vestibular, alrededor del acceso endodóntico en el esmalte y desde la zona de la cúspide lingual interna de la dentina proyectada hacia el esmalte.

En la figura 4.38 (a) se observa la distribución de esfuerzo interna entre rodetes marginales. Se puede apreciar que los mayores esfuerzos se observan en el rodete marginal alrededor de la zona de carga y en menor medida se aprecian esfuerzos en toda la zona del esmalte mesial posterior al acceso.

En la figura 4.38 (b) se observa la distribución de esfuerzo en la zona apical. Se puede apreciar que en la apertura del conducto radicular se concentran esfuerzos llegando en su zona máxima a aproximadamente 50 MPa.

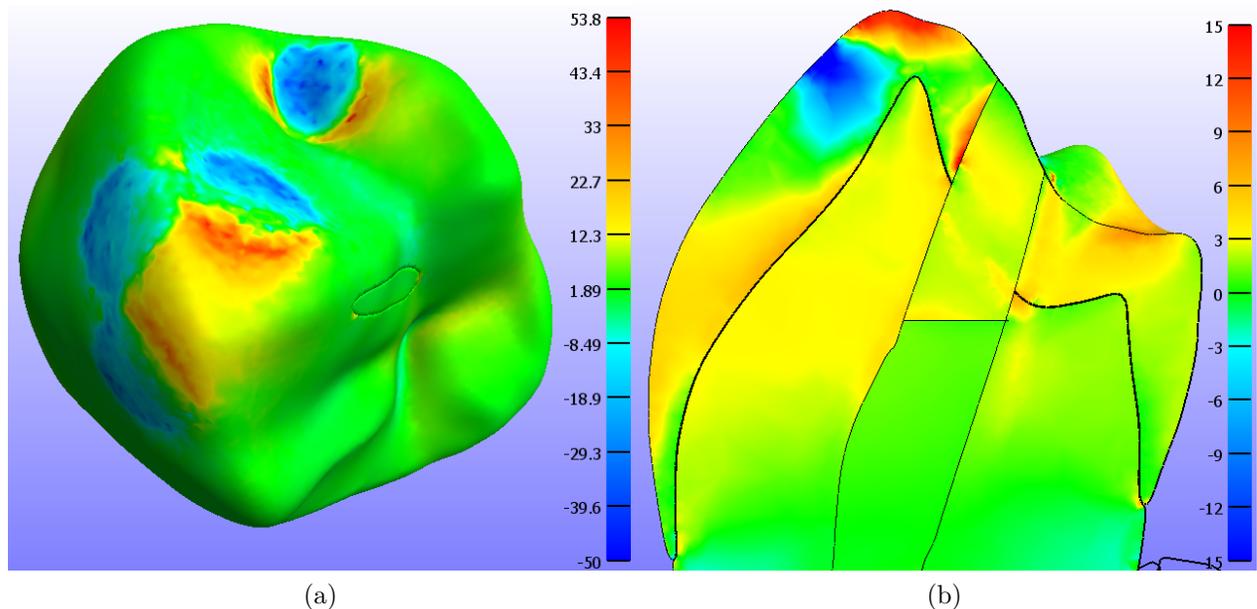


Figura 4.37: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico ultra conservativo bajo cargas de bruxismo. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.

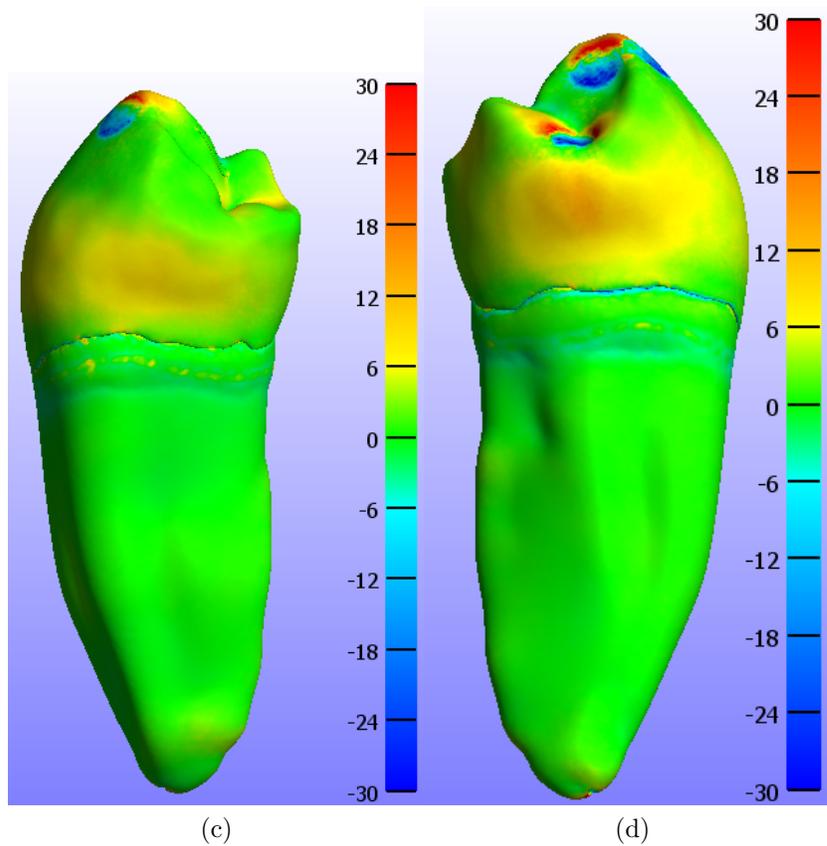
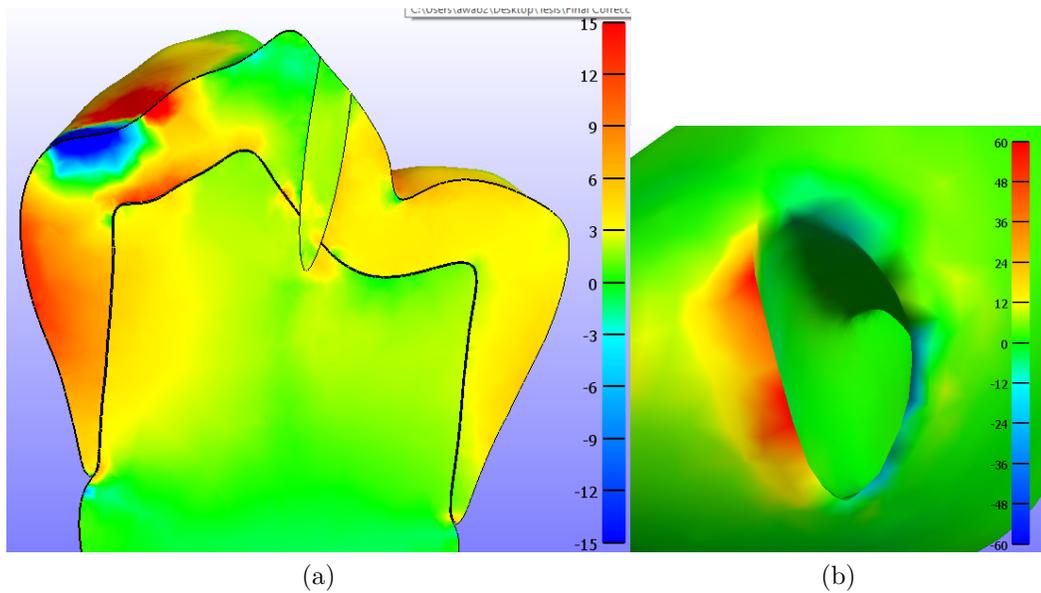


Figura 4.38: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodónico ultra conservativo bajo cargas de bruxismo. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.

En la figura 4.38 (c) y (d) se pueden observar la distribución de esfuerzo en la cara distal y mesial del diente. Se advierte que en la dentina no se observan esfuerzos considerables mientras que en el esmalte cercano a la zona cervical existen esfuerzos principales de tracción alrededor de los 15 MPa.

4.4.3. Diente con acceso endodónico conservativo

En la figura 4.39 (a) se puede observar que el esfuerzo máximo principal obtenido corresponde a 57.4 MPa. Tal como en el diente con acceso endodónico ultra conservativo las zonas de mayor tracción corresponden a la cúspide y en el rodete marginal distal alrededor de la fosa distal. Además se aprecian levemente en la zona cercana a la cúspide vestibular del acceso una concentración de los esfuerzos de tracción. En las zonas de aplicación de carga se obtienen esfuerzos principales de compresión.

En la figura 4.39 (b) se puede observar la distribución de esfuerzo al interior del diente. Se observan cuatro zonas principales de esfuerzos de tracción, los cuales son en la cúspide vestibular, en la unión dentina-esmalte vestibular, alrededor del acceso endodónico en el esmalte y desde la zona de la cúspide lingual interna de la dentina proyectada hacia el esmalte.

En la figura 4.40 (a) se observa la distribución de esfuerzo interna entre rodetes marginales. Se puede apreciar que los mayores esfuerzos se observan en el rodete marginal distal alrededor de la zona de carga y en menor medida se aprecian esfuerzos en toda la zona del esmalte mesial posterior al acceso.

En la figura 4.40 (b) se observa la distribución de esfuerzo en la zona apical. Se puede apreciar que en la apertura del conducto radicular se concentran esfuerzos llegando en su zona máxima a aproximadamente 40 MPa.

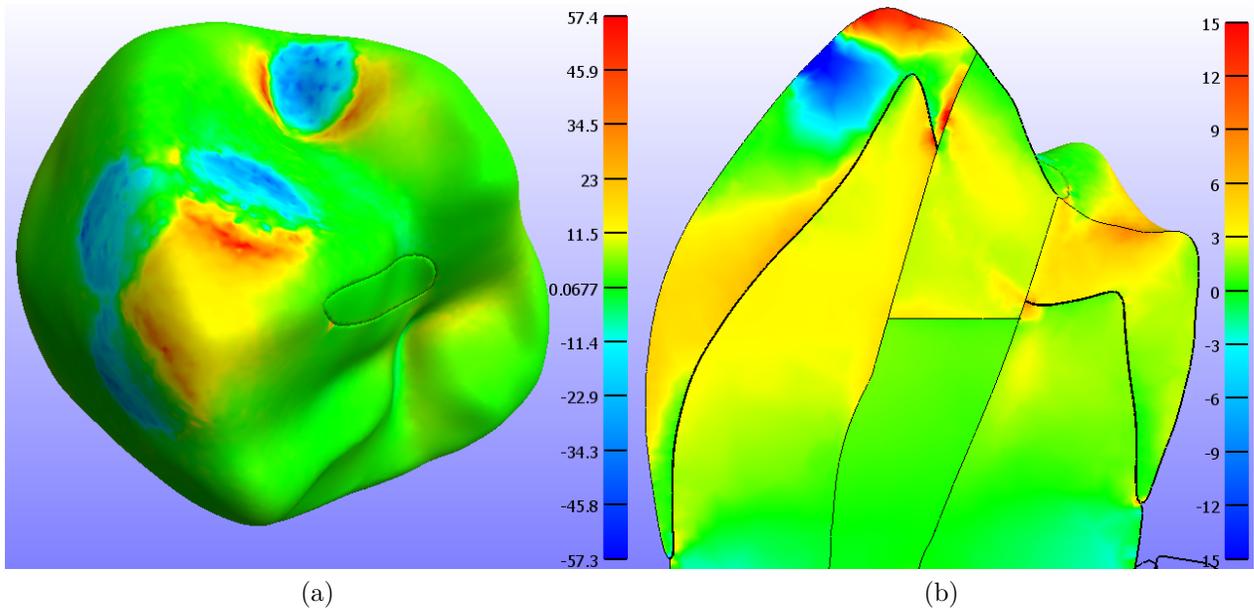


Figura 4.39: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodónico conservativo bajo cargas de bruxismo. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.

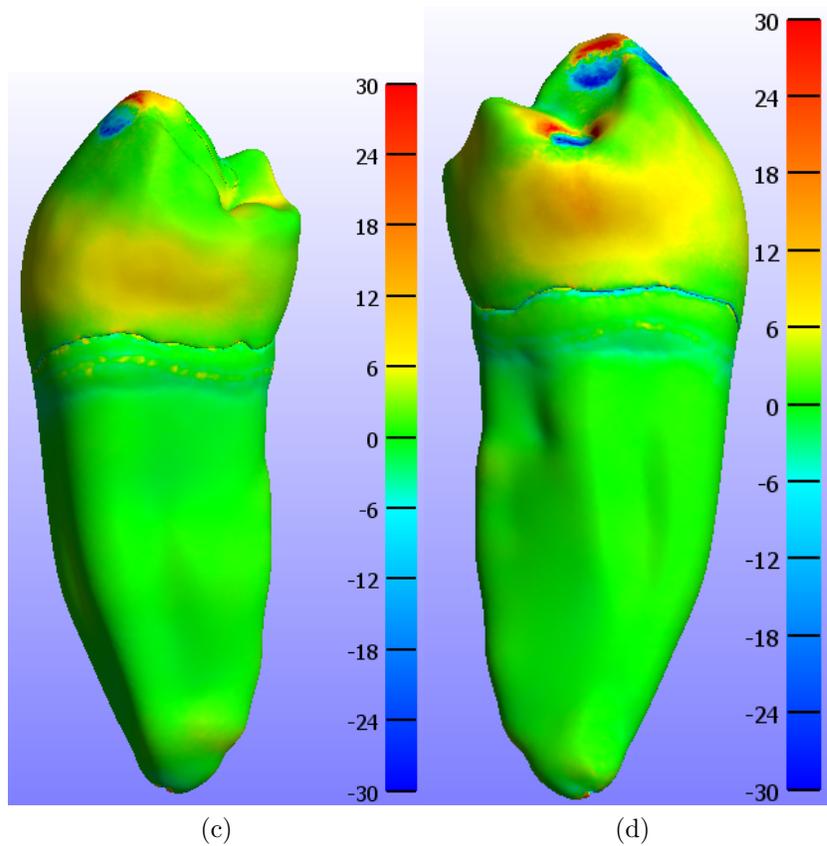
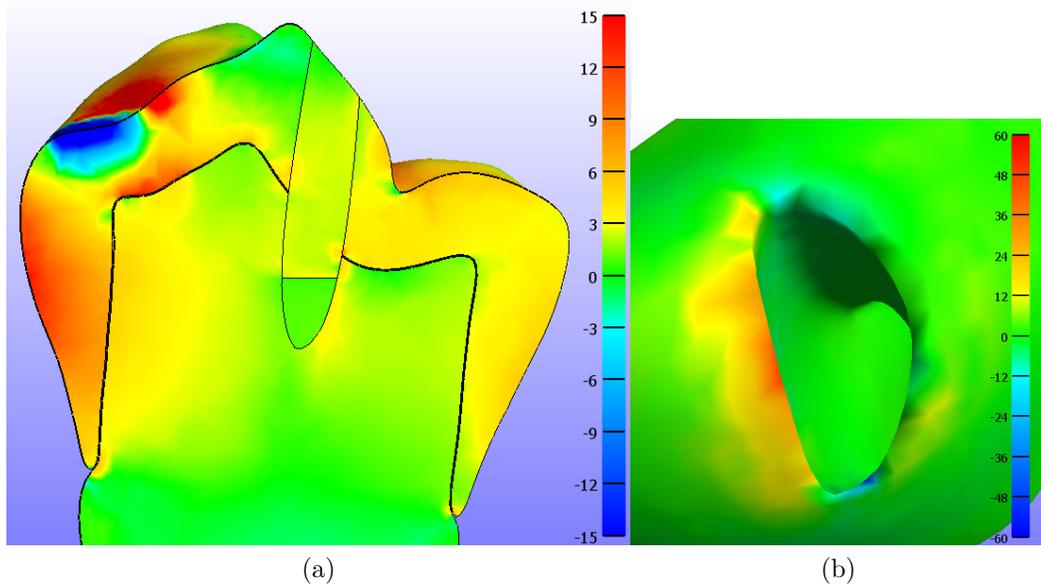


Figura 4.40: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodónico conservativo bajo cargas de bruxismo. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.

En la figura 4.40 (c) y (d) se pueden observar la distribución de esfuerzo en la cara distal y mesial del diente. Se advierte que en la dentina no se observan esfuerzos considerables mientras que en el esmalte cercano a la zona cervical existen esfuerzos principales de tracción alrededor de los 15 MPa.

4.4.4. Diente con acceso endodóntico tradicional

En la figura 4.41 (a) se puede observar que el esfuerzo máximo principal obtenido corresponde a 56.5 MPa. Tal como en el diente con acceso endodóntico conservativo las zonas de mayor tracción corresponden a la cúspide y en el rodete marginal distal alrededor de la fosa distal. Además se aprecian levemente en la zona cercana a la cúspide vestibular del acceso una concentración de los esfuerzos de tracción así como también en la fosa mesial cercano al acceso. En las zonas de aplicación de carga se obtienen esfuerzos principales de compresión.

En la figura 4.41 (b) se puede observar la distribución de esfuerzo al interior del diente. Se pueden observar que las zonas de concentración de esfuerzo corresponden a las mismas mencionadas anteriormente pero en esta ocasión la zona de concentración de la cúspide vestibular se une a las concentraciones alrededor del acceso, este mismo efecto ocurre en la cúspide lingual.

En la figura 4.42 (a) se observa la distribución de esfuerzo interna entre rodetes marginales. Se puede apreciar que los mayores esfuerzos se observan en el rodete marginal distal alrededor de la zona de carga y en menor medida se aprecian esfuerzos en toda la zona del esmalte mesial posterior al acceso.

En la figura 4.41 ((b) se observa la distribución de esfuerzo en la zona apical. Se puede apreciar que en la apertura del conducto radicular se concentran esfuerzos llegando en su zona máxima a aproximadamente 40 MPa.

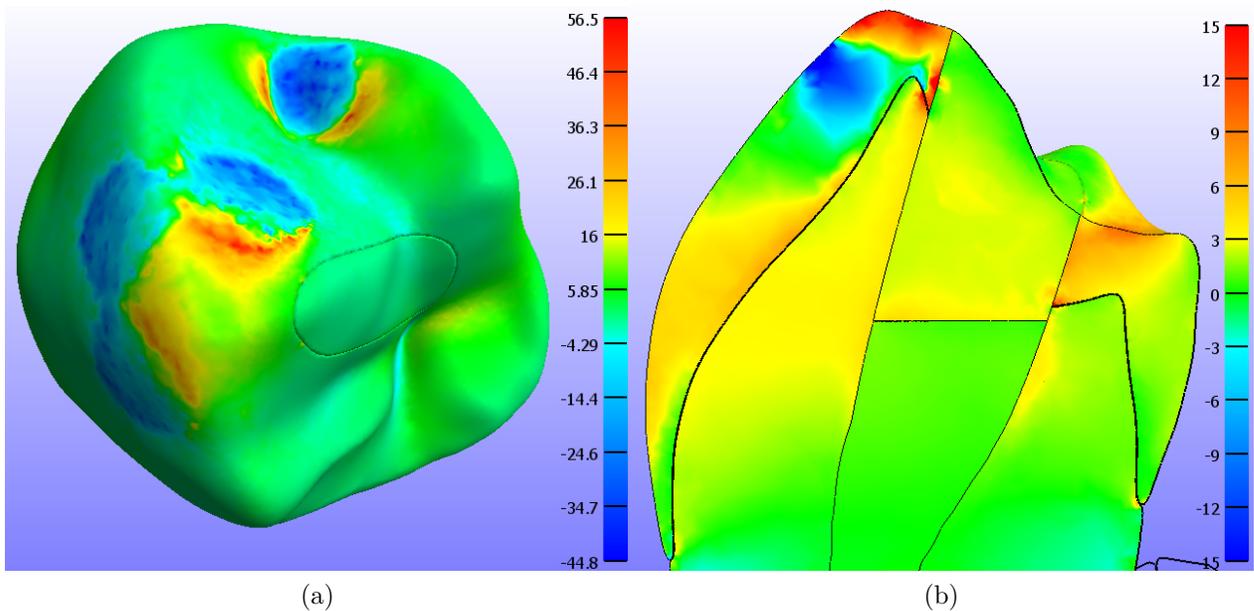


Figura 4.41: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico tradicional bajo cargas de bruxismo. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.

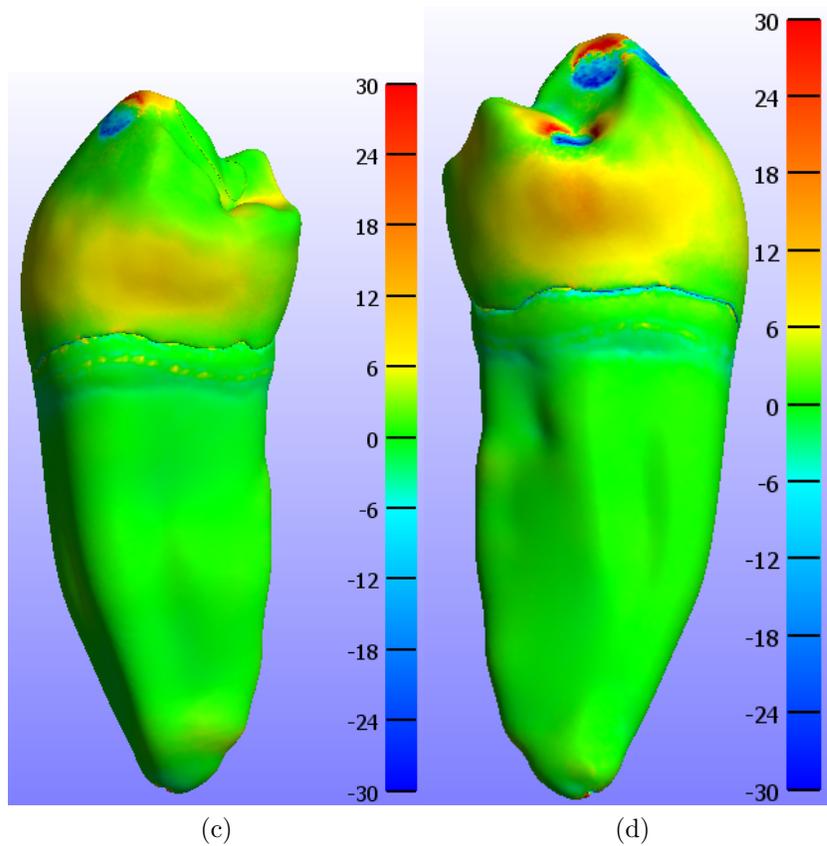
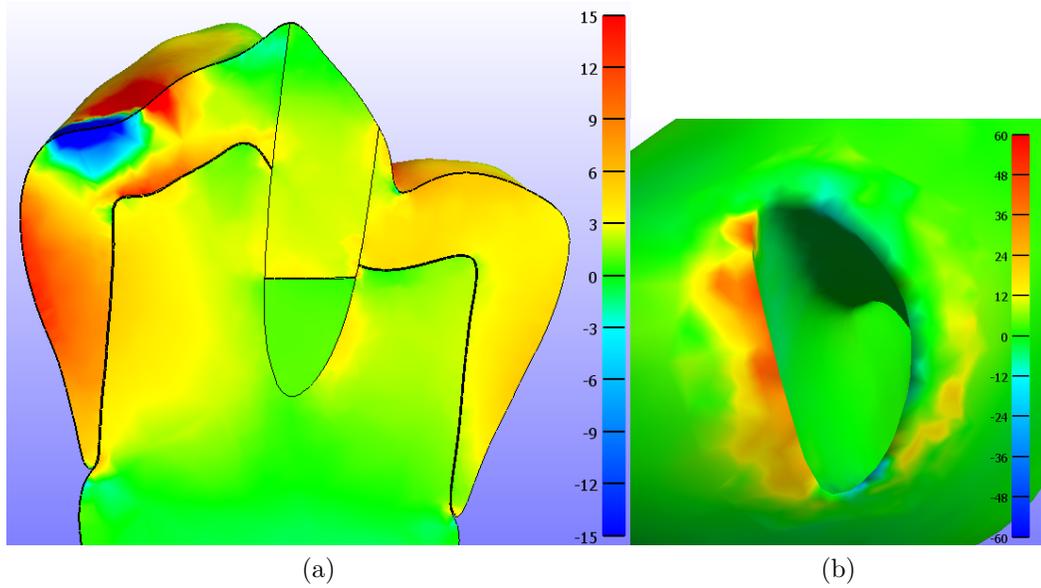


Figura 4.42: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico tradicional bajo cargas de bruxismo. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.

En la figura 4.41 (c) y (d) se pueden observar la distribución de esfuerzo en la cara distal y mesial del diente. Se advierte que en la dentina no se observan esfuerzos considerables mientras que en el esmalte cercano a la zona cervical existen esfuerzos principales de tracción alrededor de los 15 MPa.

4.4.5. Diente con acceso endodónico extendido

En la figura 4.43 (a) se puede observar que el esfuerzo máximo principal obtenido corresponde a 60.9 MPa. Tal como en el diente con acceso endodónico tradicional las zonas de mayor tracción corresponden a la cúspide y en el rodete marginal distal alrededor de la fosa distal. Se aprecia una concentración de los esfuerzos de tracción en la fosa mesial cercano al acceso. En las zonas de aplicación de carga se obtienen esfuerzos principales de compresión.

En la figura 4.43 (b) se puede observar la distribución de esfuerzo al interior del diente. Se puede observar que en este acceso se produce el mismo efecto que en el acceso tradicional pero aumentado donde las zonas de concentración de esfuerzo de la cúspide se unen con la zona de concentración alrededor del acceso y a la vez se produce el mismo efecto con la zona del acceso lingual.

En la figura 4.44 (a) se observa la distribución de esfuerzo interna entre rodetes marginales. Se puede apreciar que los mayores esfuerzos se observan en el rodete marginal distal alrededor de la zona de carga y en menor medida se aprecian esfuerzos en toda la zona del esmalte mesial posterior al acceso.

En la figura 4.44 (c) se observa la distribución de esfuerzo en la zona apical. Se puede apreciar que en la apertura del conducto radicular se concentran esfuerzos llegando aproximadamente a 50 MPa.

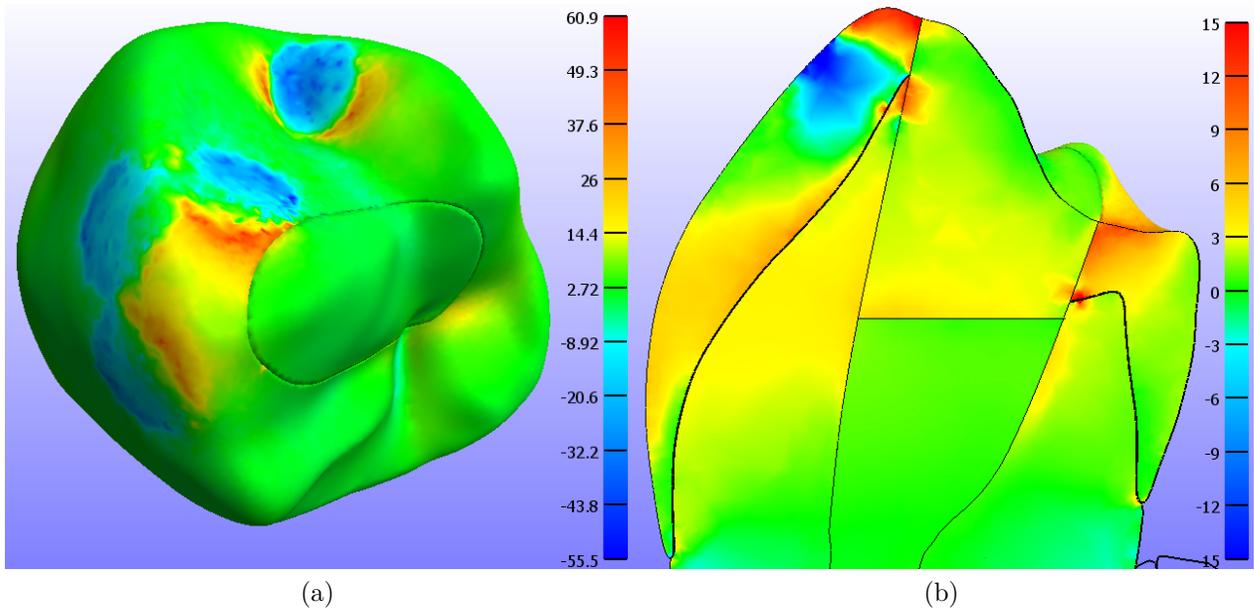


Figura 4.43: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodónico extendido bajo cargas de bruxismo. (a) Vista oclusal. (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular.

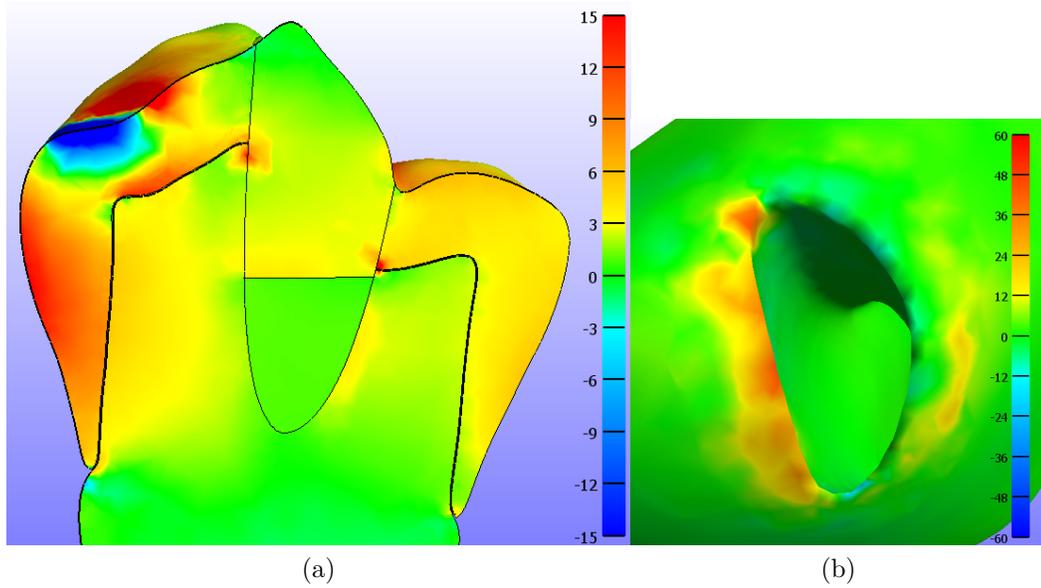


Figura 4.44: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodónico extendido bajo cargas de bruxismo. (a) Vista en corte entre rodetes marginales. (b) Vista apical. (c) Vista mesial. (d) Vista distal.

En la figura 4.26 (c) y (d) se pueden observar la distribución de esfuerzo en la cara distal y mesial del diente. Se advierte que en la dentina no se observan esfuerzos considerables mientras que en el esmalte cercano a la zona cervical existen esfuerzos principales de tracción alrededor de los 15 MPa.

4.5. Oclusión normal 150 N en diente con acceso endodóntico tradicional con diferentes materiales de restauración, modelo ortotrópico

4.5.1. Restauración con resina fluida y resina compuesta.

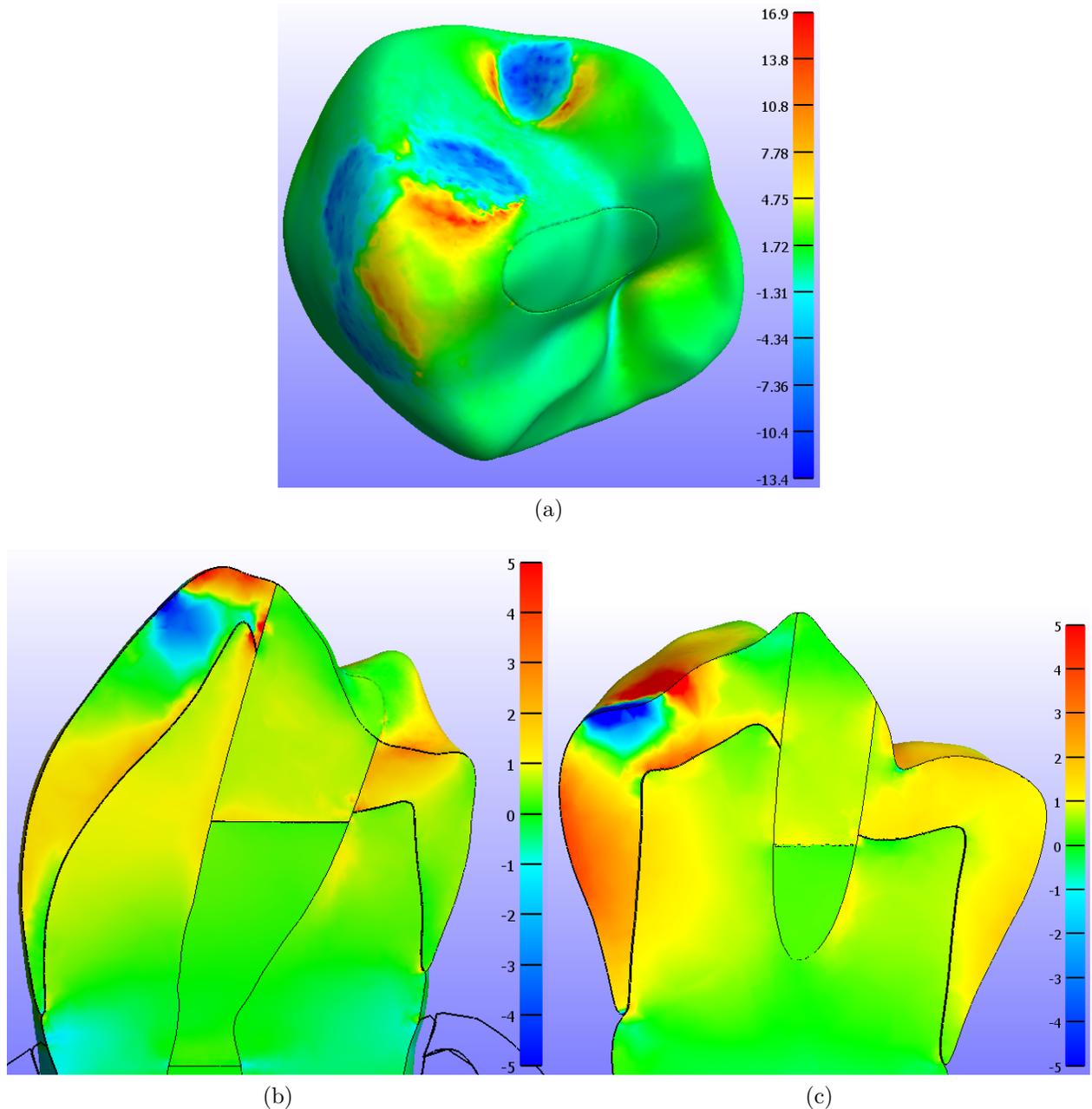


Figura 4.45: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico tradicional bajo cargas de oclusión normal restaurado con vidrio ionomero y resina compuesta. (a) Vista oclusal (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular. (c) Vista en corte entre rodetes marginales.

4.5.2. Restauración solo con vidrio ionomero y resina compuesta.

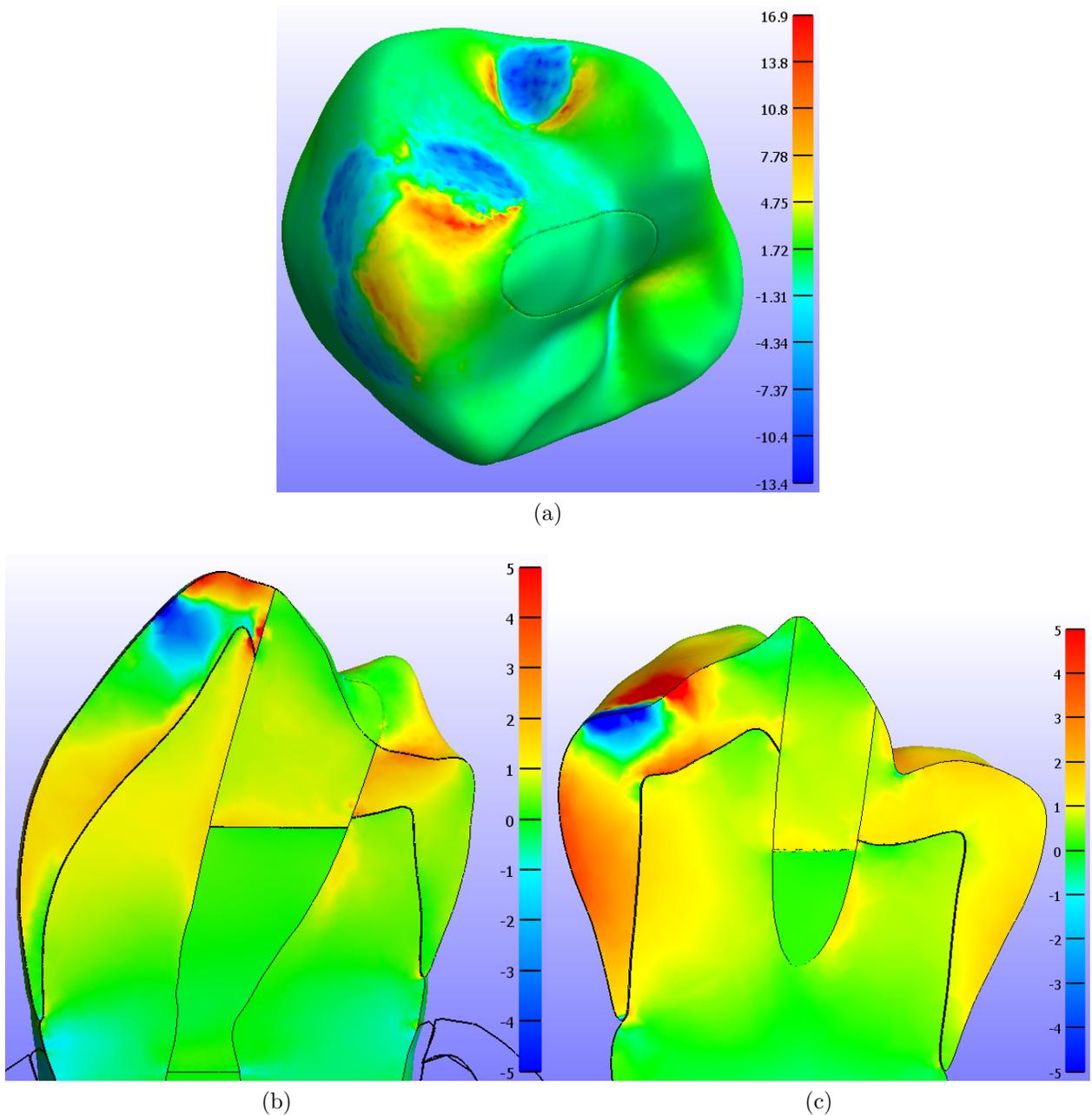


Figura 4.46: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico tradicional bajo cargas de oclusión normal restaurado con vidrio ionomero y resina compuesta. (a) Vista oclusal (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular. (c) Vista en corte entre rodetes marginales.

4.5.3. Restauración solo con vidrio ionomero.

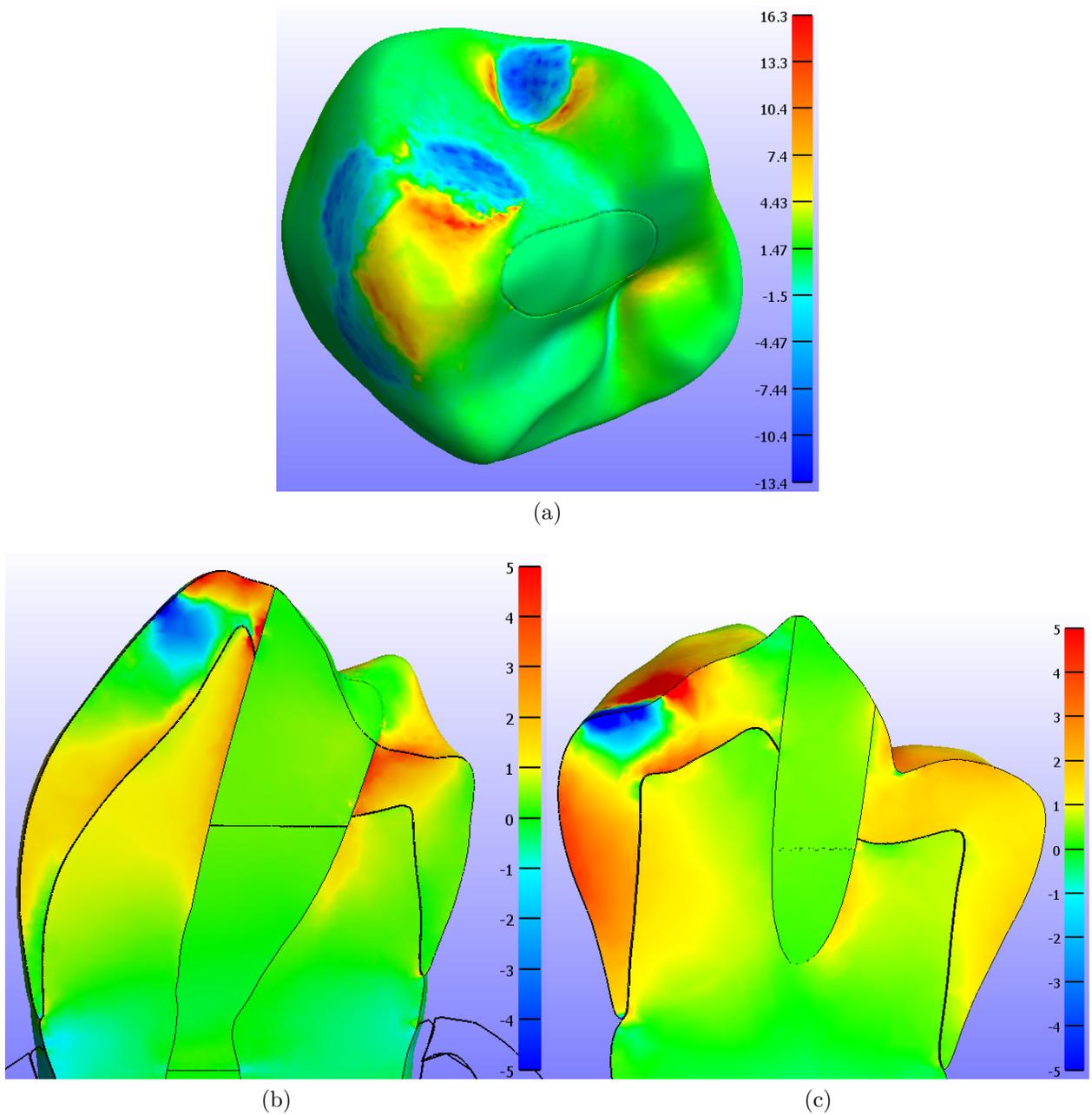


Figura 4.47: Esfuerzo máximo principal [MPa] diente con acceso endodóntico tradicional bajo cargas de oclusión normal restaurado con vidrio ionomero. (a) Vista oclusal (b) Vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular. (c) Vista en corte entre rodetes marginales.

4.6. Oclusión normal 150 N en diente con acceso endodónico tradicional ubicado en diferentes posiciones, modelo ortotrópico

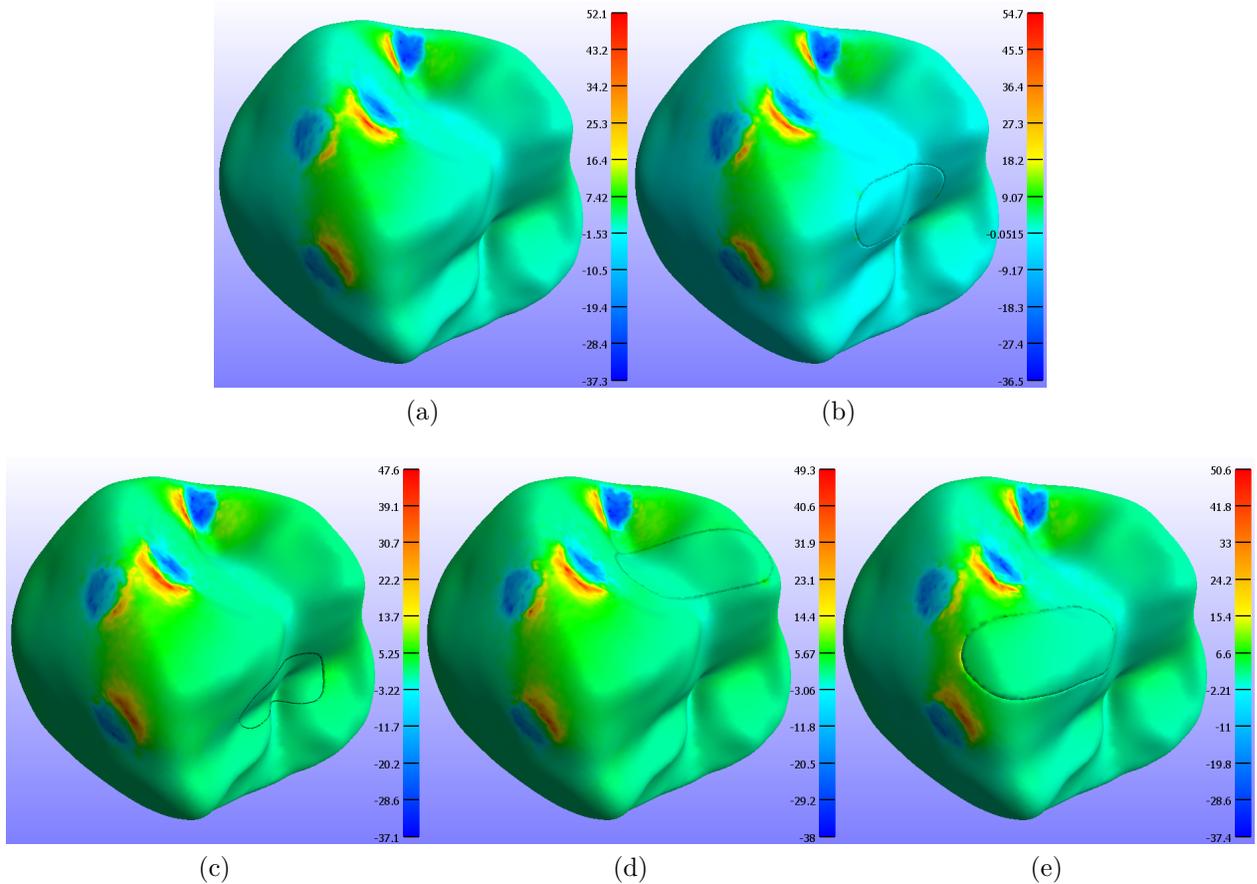


Figura 4.48: Comparación esfuerzo máximo principal [MPa], vista oclusal, diente con acceso endodónico tradicional en distintas posiciones bajo cargas de oclusión normal. (a) Diente Natural (b) Posición tradicional. (c) Posición hacia la zona mesial. (d) Posición hacia la zona distal. (e) Posición hacia la zona de la cúspide.

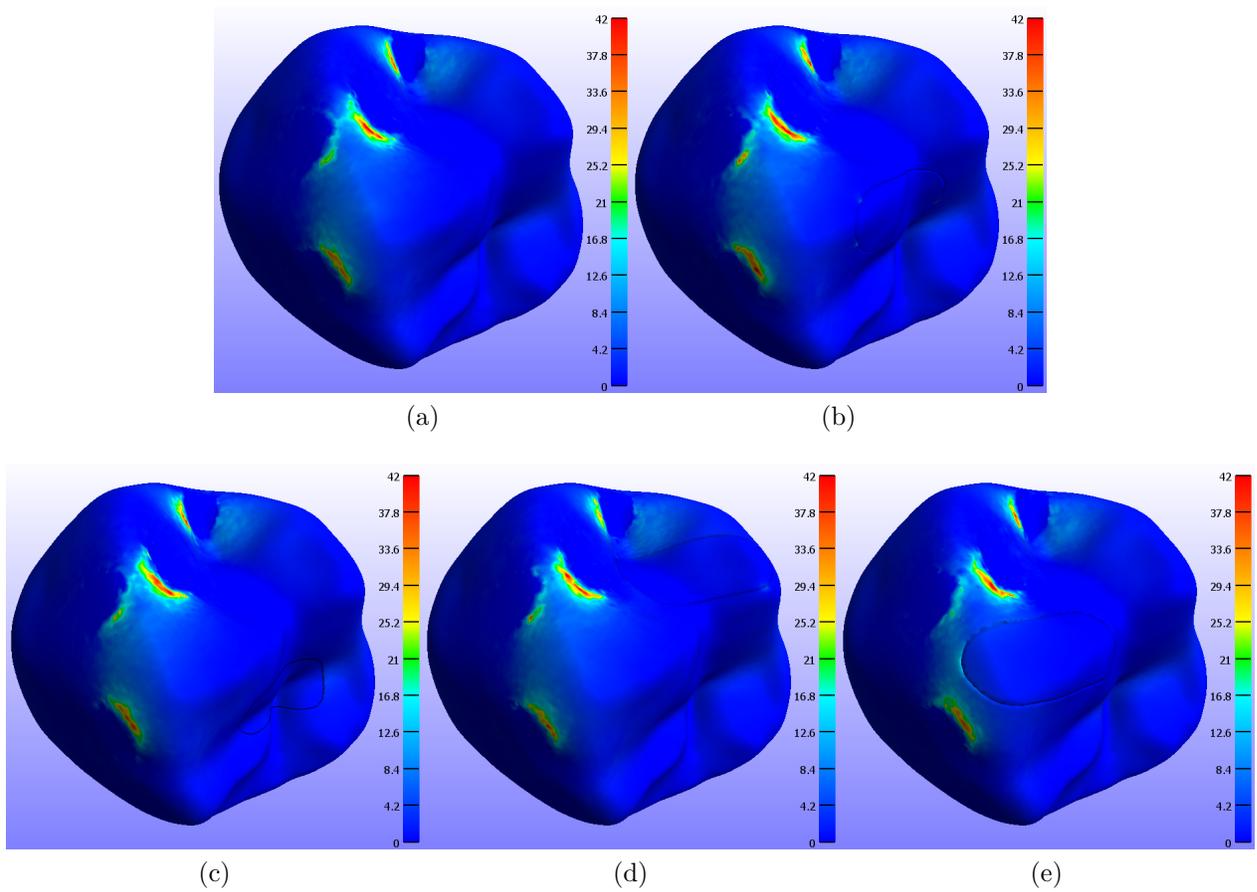


Figura 4.49: Comparación esfuerzo máximo principal [MPa], escala normalizada, vista oclusal, diente con acceso endodóntico tradicional en distintas posiciones bajo cargas de oclusión normal. (a) Diente Natural (b) Posición tradicional. (c) Posición hacia la zona mesial. (d) Posición hacia la zona distal. (e) Posición hacia la zona de la cúspide.

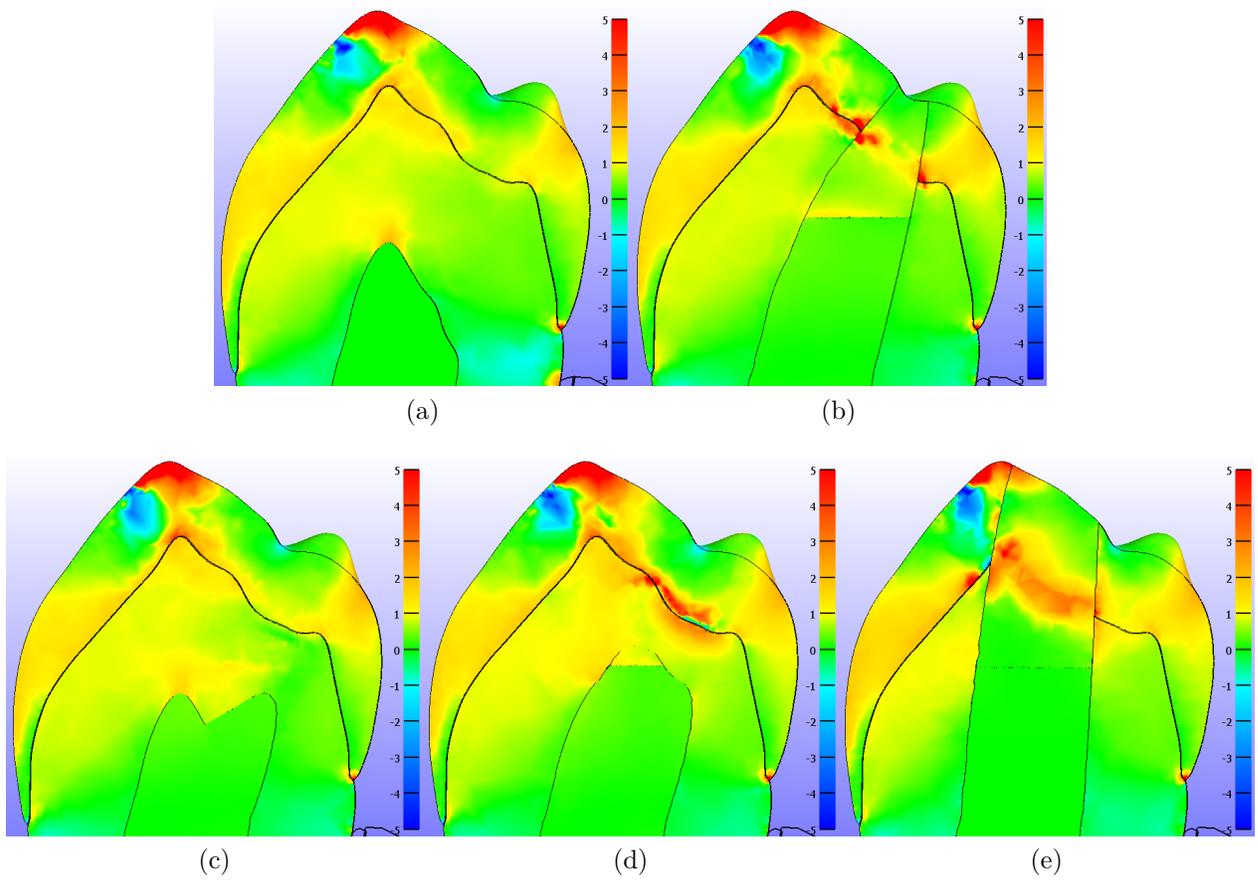


Figura 4.50: Comparación esfuerzo máximo principal [MPa], escala normalizada, vista en corte del plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular en un diente con acceso endodóntico tradicional en distintas posiciones bajo cargas de oclusión normal. (a) Diente Natural (b) Posición tradicional. (c) Posición hacia la zona mesial. (d) Posición hacia la zona distal. (e) Posición hacia la zona de la cúspide.

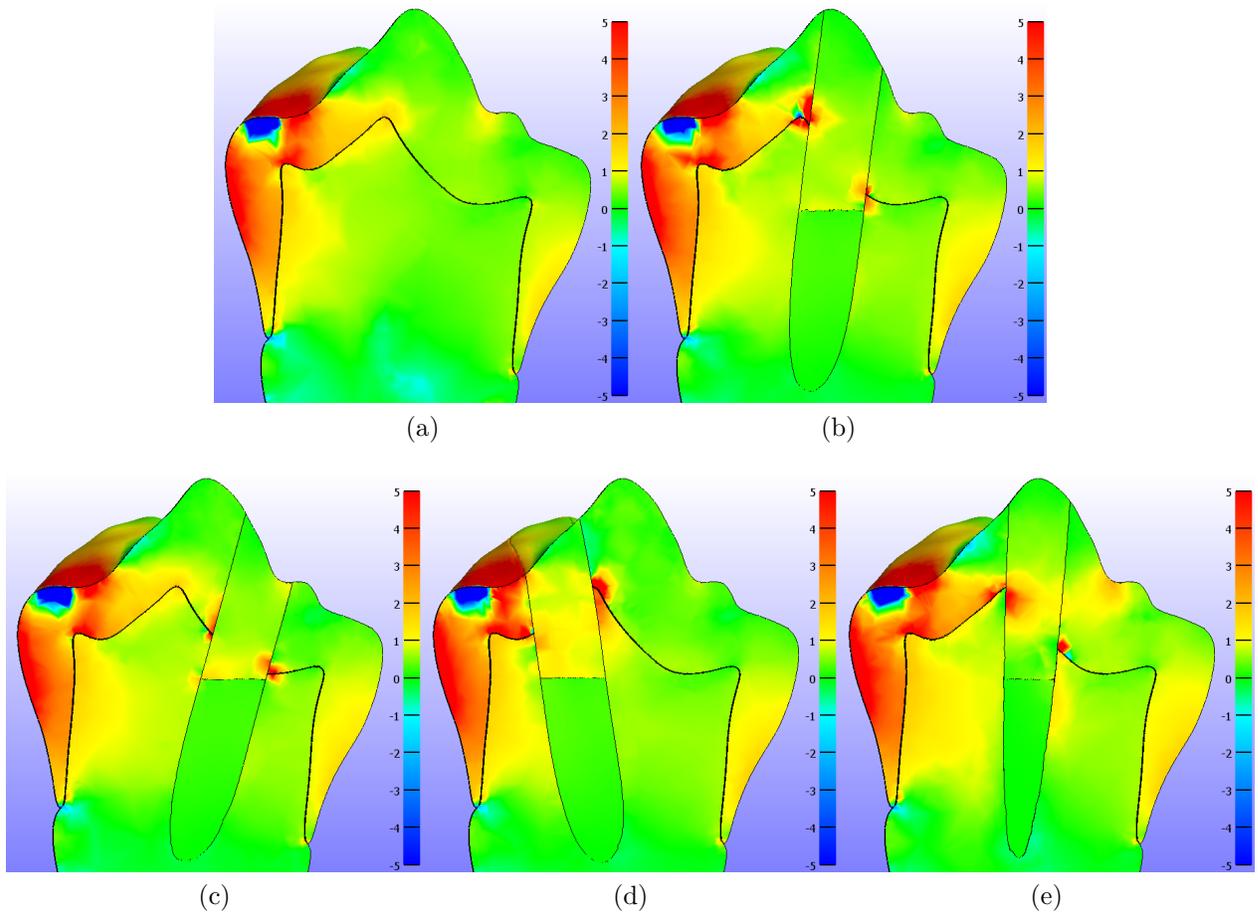


Figura 4.51: Comparación esfuerzo máximo principal [MPa], escala normalizada, vista en corte entre rodetes en un diente con acceso endodóntico tradicional en distintas posiciones bajo cargas de oclusión normal. (a) Diente Natural (b) Posición tradicional. (c) Posición hacia la zona mesial. (d) Posición hacia la zona distal. (e) Posición hacia la zona de la cúspide.

4.7. Análisis

Al comparar los resultados obtenemos la siguiente tabla 4.1 resumen de esfuerzo máximo principal para el modelo isotrópico y ortotrópico bajo condiciones de carga de 156 N y 500N.

Tabla 4.1: Esfuerzo máximo principal para los diferentes modelos.

Esfuerzo máximo Principal (MPa)	Modelo isotrópico		Modelo ortotrópico	
	Carga de 150 N	Carga de 500 N	Carga de 150 N	Carga de 500 N
NT	21.3	71.4	14.4	48.3
UCEC	21.5	71.8	16.1	53.8
CEC	26	86.9	17.1	57.4
TEC	26.1	87.3	16.9	56.5
EEC	30.1	101	18.1	60.9

Podemos observar que para los modelos ortotrópicos se obtienen reducciones de los esfuerzos de hasta un 47%, estos resultados además se comportan de mejor manera al compararlos con los valores experimentales de la literatura y de otros estudios [12] [18] [36] [37], debido a esto se utilizan estos modelos para realizar los análisis.

Tabla 4.2: Esfuerzo principal máximo modelo isotrópico

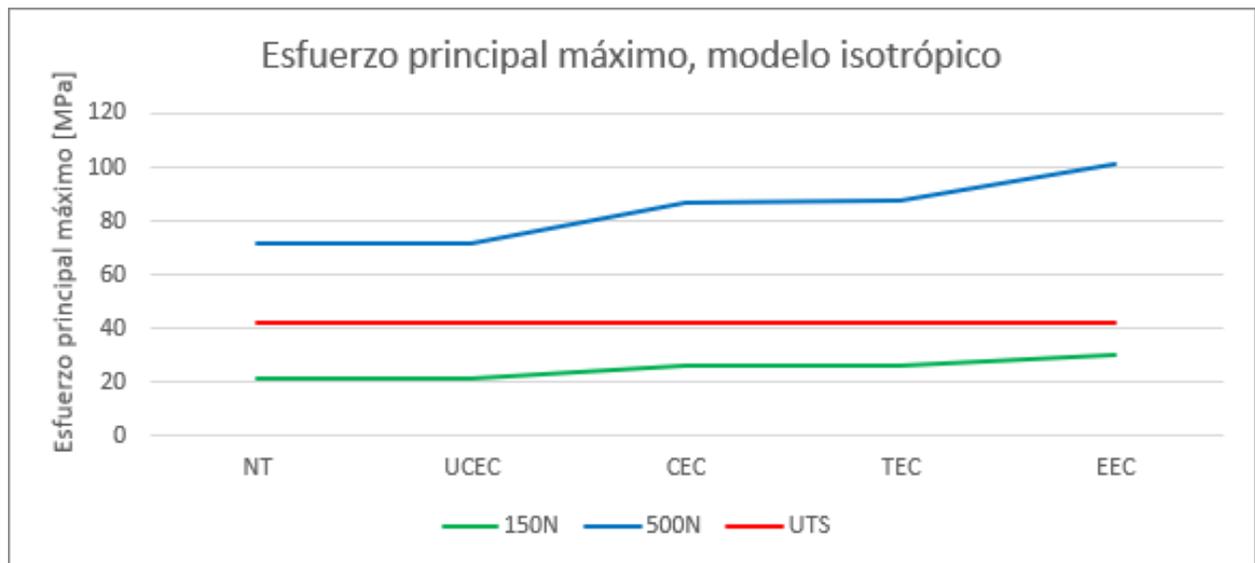


Tabla 4.3: Esfuerzo principal máximo modelo ortotrópico

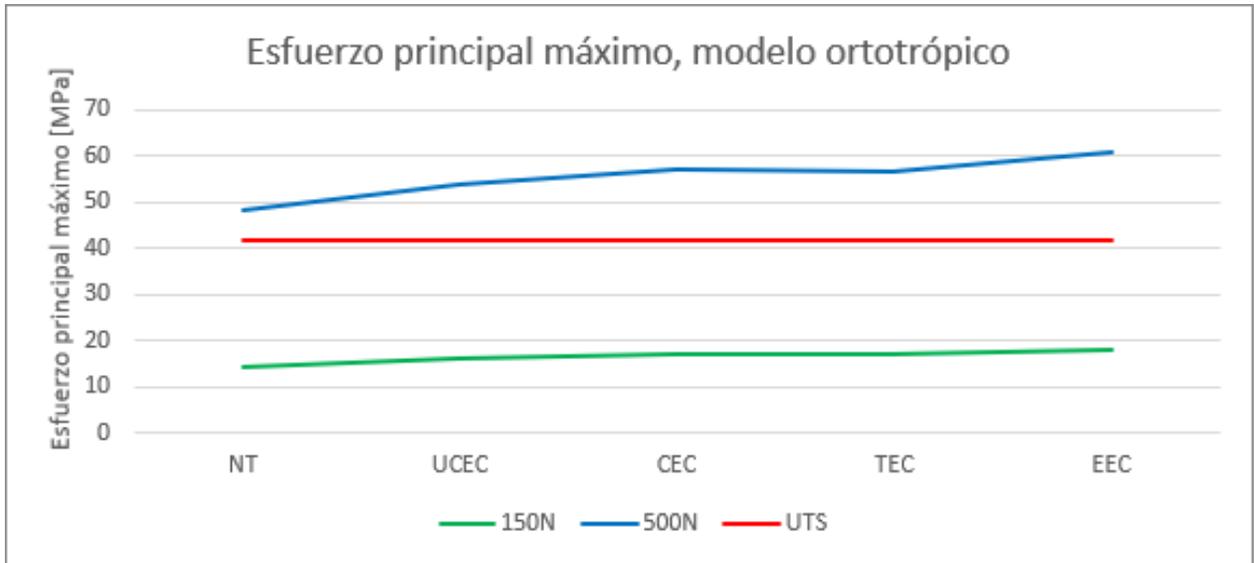
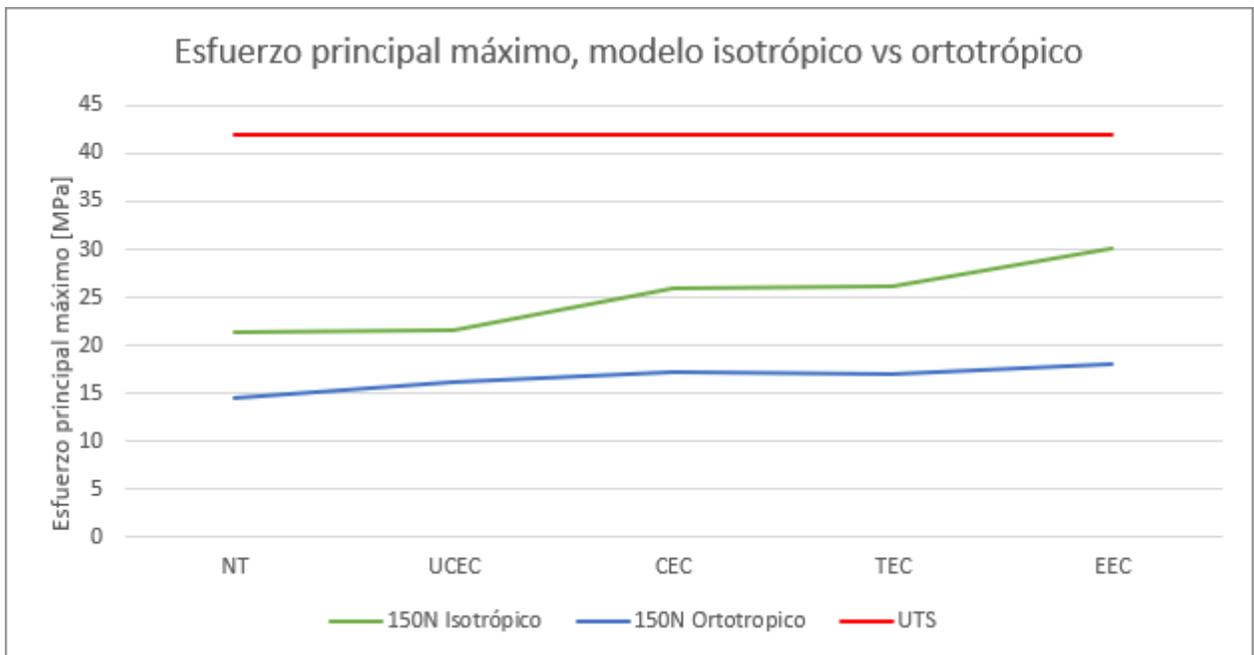


Tabla 4.4: Esfuerzo principal máximo modelo isotrópico vs ortotrópico



Para comparar de mejor manera se normaliza la escala de esfuerzo desde 0 ya que nos interesa principalmente los esfuerzos de tracción hasta 42 MPa el cual corresponde a la última tensión de rotura del esmalte.

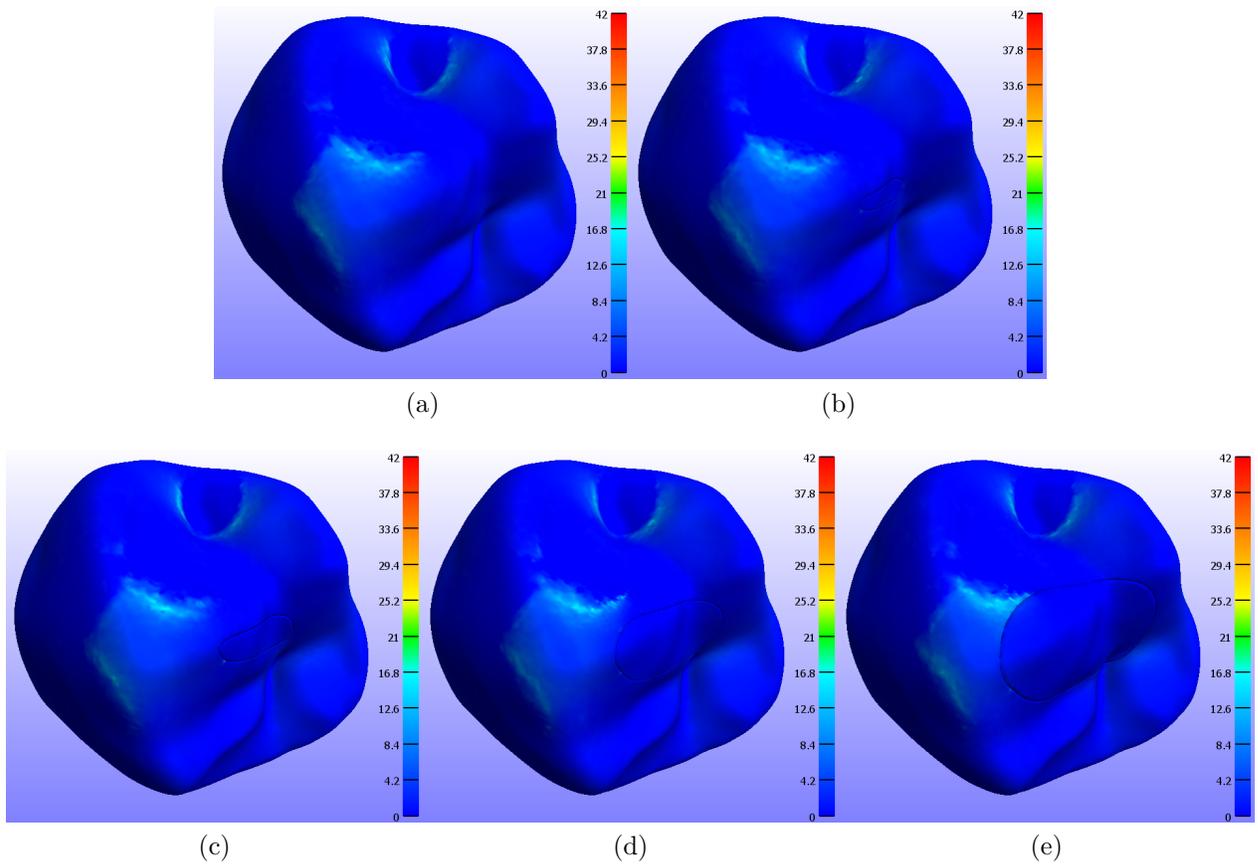


Figura 4.52: Comparación de esfuerzos principales [MPa] para carga de oclusión normal, vista oclusal, modelo ortotrópico. (a) Diente natural. (b) Diente con acceso endodóntico ultra conservativo. (c) Diente con acceso endodóntico conservativo. (d) Diente con acceso endodóntico tradicional. (e) Diente con acceso endodóntico extendido.

Se observa en la figura 4.52 y en la tabla 4.1 las distribuciones de esfuerzo en la vista oclusal son muy similares no obstante los valores máximos obtenidos van aumentando a medida que el tamaño del acceso aumenta a excepción de los modelos CEC y TEC los cuales poseen esfuerzos muy similares con una leve disminución de los valores del TEC. Se aprecia que los accesos endodónticos solo varían los esfuerzos superficiales del esmalte en las zonas cercanas a este, especialmente en la zona próxima a la cúspide vestibular y la fosa mesial. Si bien ninguno de los modelos llega a acercarse a los valores de tensión de rotura, fracturas debido a grietas y fatiga podrían llegar a ocurrir a largo plazo. [23] [26] [30] [38]

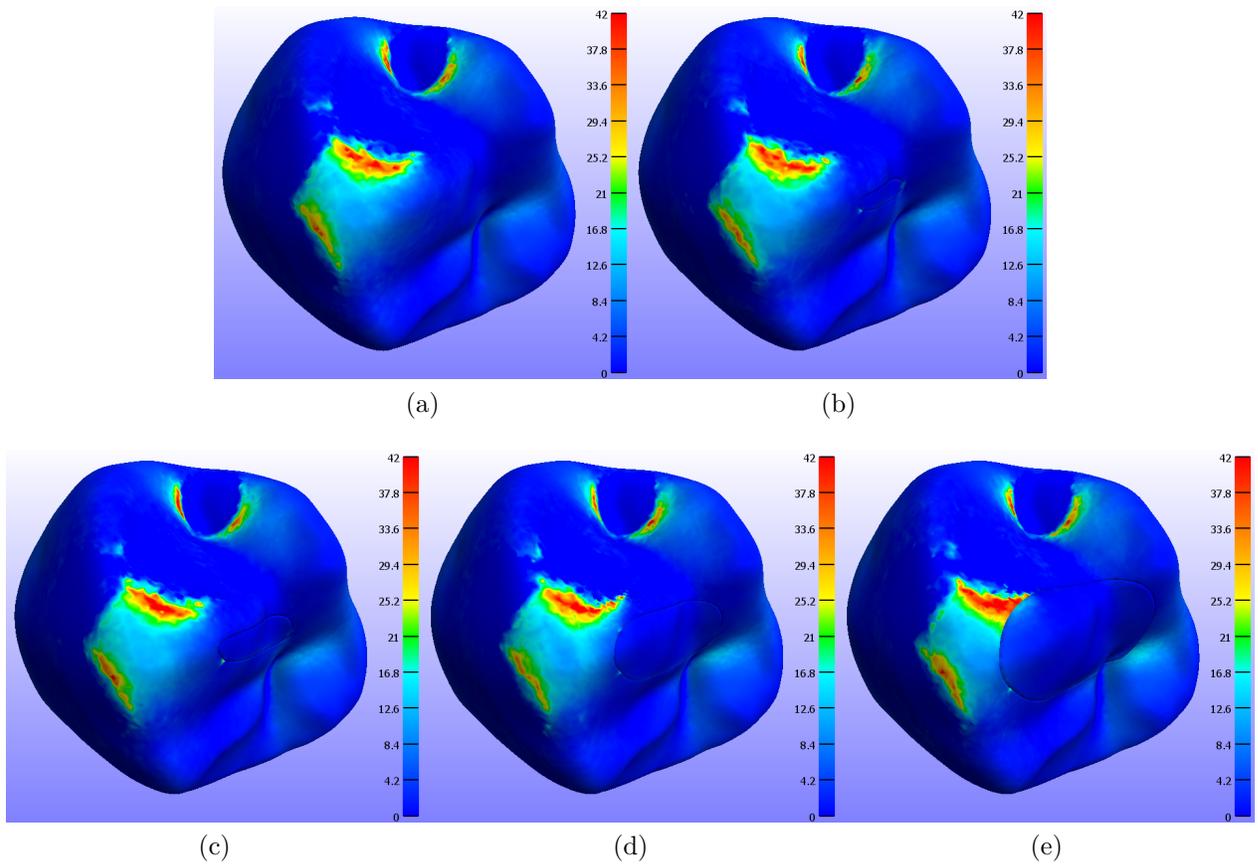


Figura 4.53: Comparación de esfuerzos principales [MPa] para carga de bruxismo, vista oclusal, modelo ortotrópico. (a) Diente natural. (b) Diente con acceso endodóntico ultra conservativo. (c) Diente con acceso endodóntico conservativo. (d) Diente con acceso endodóntico tradicional. (e) Diente con acceso endodóntico extendido.

Se observa en la figura 4.53 que bajo cargas de bruxismo todos los modelos poseen cargas superiores a la tensión de rotura del esmalte, por lo que están en claro riesgo de fracturarse, no obstante se observan patrones de distribución de esfuerzo equivalentes a las obtenidas para cargas de 150N.

Tabla 4.5: Tabla esfuerzo máximo principal en comparación con el volumen del tejido dental removido. Modelo isotrópico.

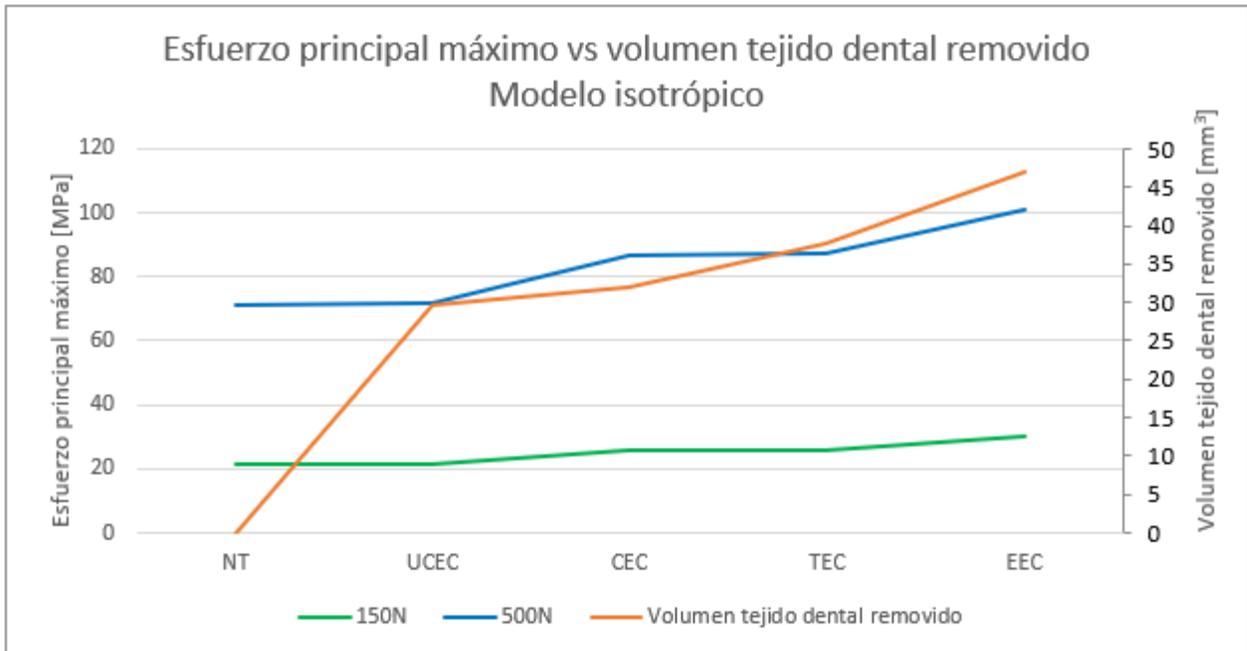
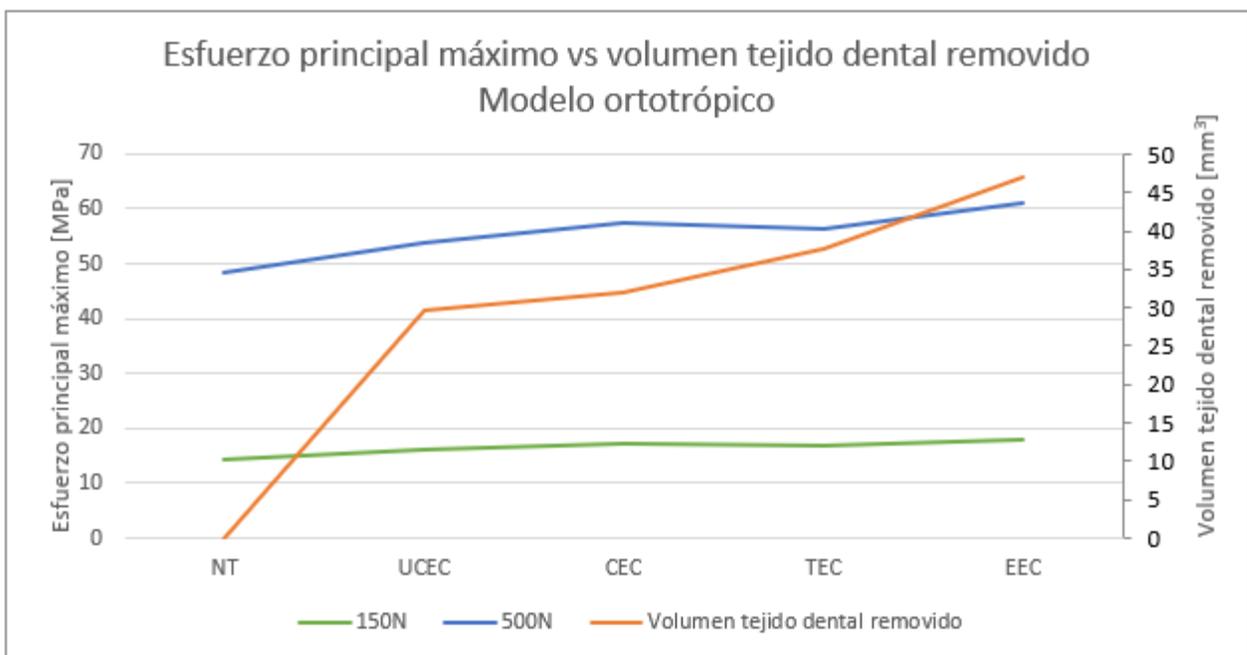


Tabla 4.6: Tabla esfuerzo máximo principal en comparación con el volumen del tejido dental removido. Modelo ortotrópico.



En la tabla 4.6 se puede apreciar que tanto para las cargas de 150 N como las cargas de 500 N el diente con menor esfuerzo principal máximo corresponde al diente natural, luego a medida que aumenta el volumen removido aumenta el esfuerzo máximo a excepción en el caso del acceso endodóntico tradicional. Si bien se puede ver que el esfuerzo máximo principal aumenta con la remoción de tejido dental no se observa una relación estrictamente directa

por lo que puede darse a entender que la remoción de tejido dental es solamente uno de los factores del aumento de esfuerzo principal máximo.

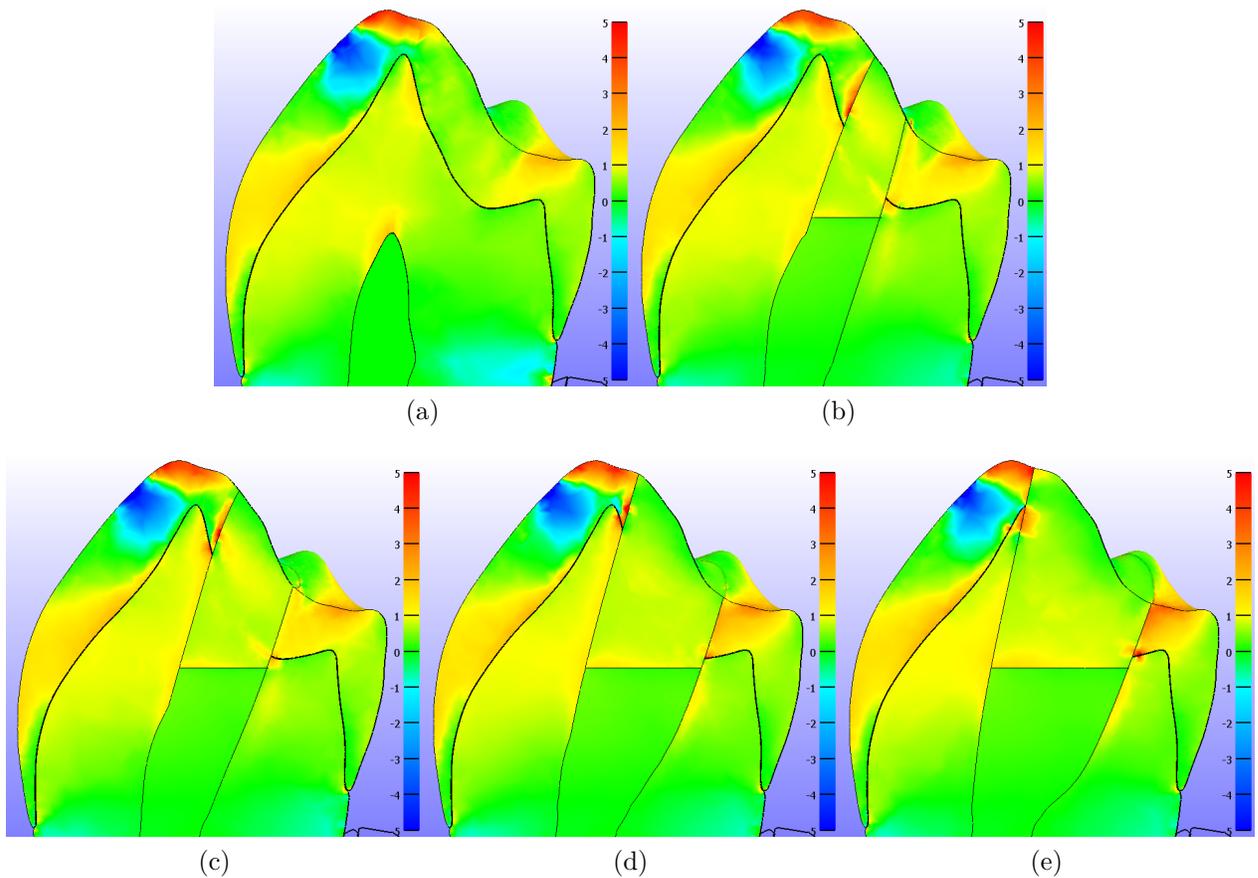


Figura 4.54: Comparación vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular y al centro del acceso endodóntico, oclusión normal. (a) Diente natural. (b) Diente con acceso endodóntico ultra conservativo. (c) Diente con acceso endodóntico conservativo. (d) Diente con acceso endodóntico tradicional.

De la figura 4.54 se puede apreciar que los accesos endodónticos producen una zona de concentración de esfuerzo alrededor de estos y a medida que estos aumentan de tamaño las zonas de concentración de esfuerzo se reducen en tamaño provocando un aumento de los esfuerzos máximos encontrados en la misma zona.

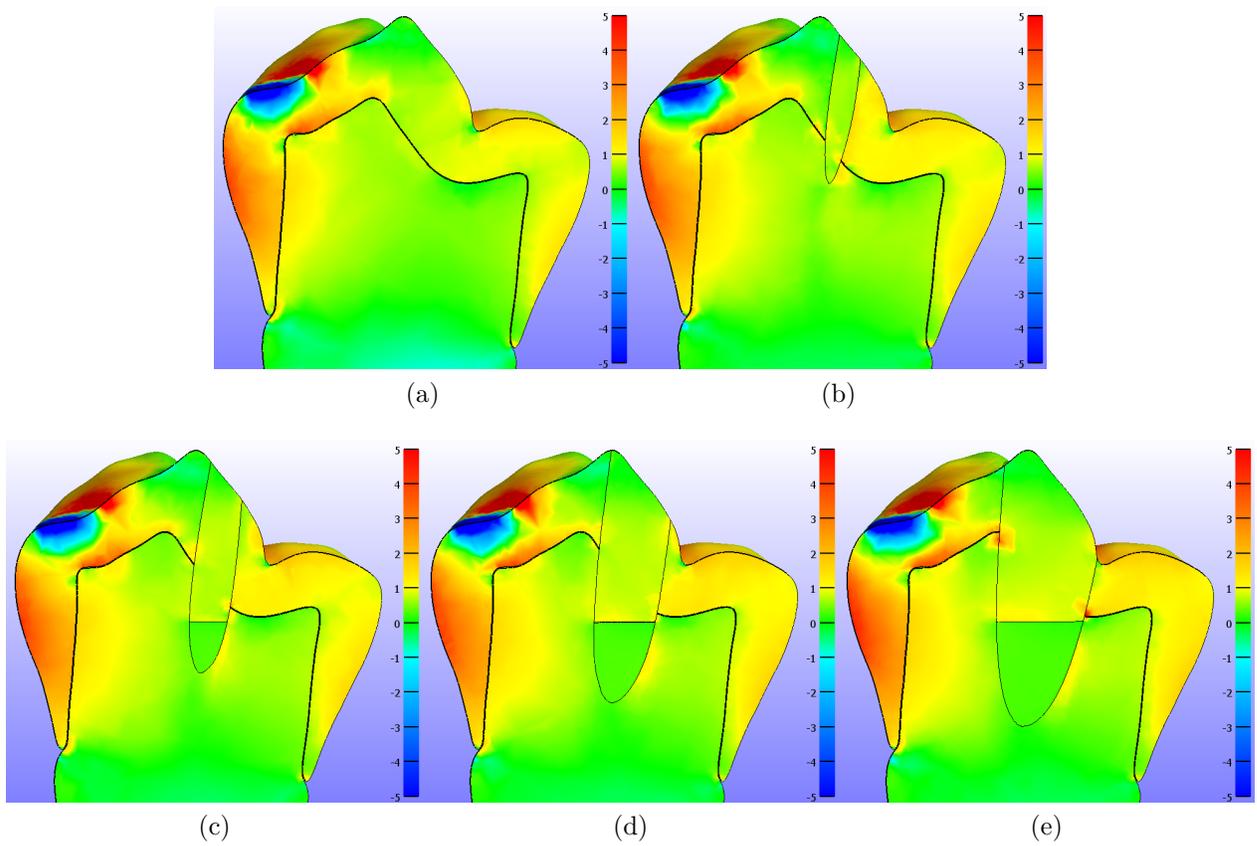


Figura 4.55: Comparación vista en corte entre rodetes marginales, oclusión normal. (a) Diente natural. (b) Diente con acceso endodóntico ultra conservativo. (c) Diente con acceso endodóntico conservativo. (d) Diente con acceso endodóntico tradicional.

De igual manera que en la vista entre cúspides, se puede apreciar en la figura 4.55 que los accesos endodónticos producen una zona de concentración de esfuerzo alrededor de estos no obstante el tamaño de estos no parece tener un efecto significativo en el plano de corte entre rodetes marginales.

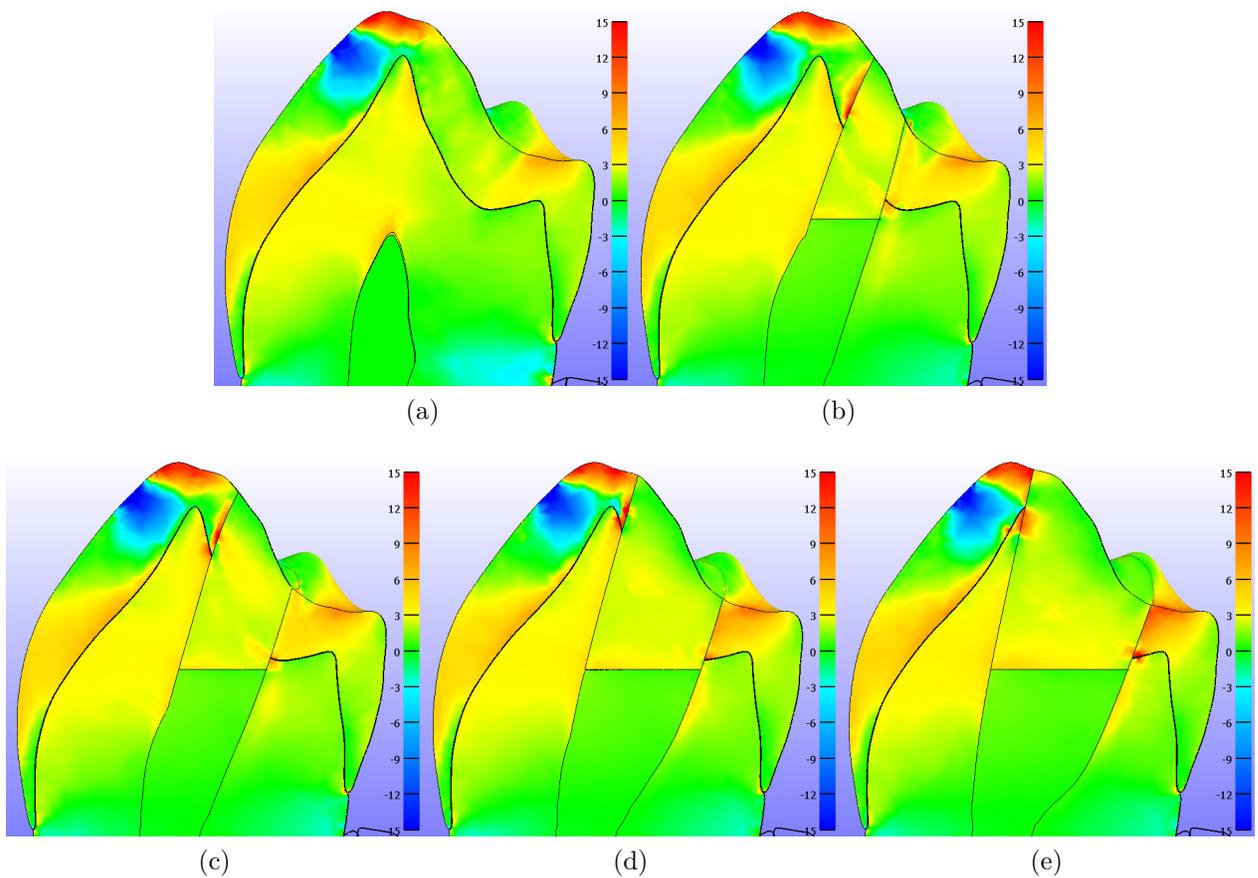


Figura 4.56: Comparación vista en corte, plano vestibular-lingual que pasa sobre la cúspide vestibular y al centro del acceso endodóntico, bruxismo. (a) Diente natural. (b) Diente con acceso endodóntico ultra conservativo. (c) Diente con acceso endodóntico conservativo. (d) Diente con acceso endodóntico tradicional.

De la figura 4.56 tal como en el caso anterior de oclusión normal se puede apreciar que los accesos endodónticos producen una zona de concentración de esfuerzo alrededor de estos y a medida que estos aumentan de tamaño las zonas de concentración de esfuerzo se reducen en tamaño provocando un aumento de los esfuerzos máximos encontrados en la misma zona. Solo que al tratarse de cargas mayores, podemos apreciar mayores esfuerzos.

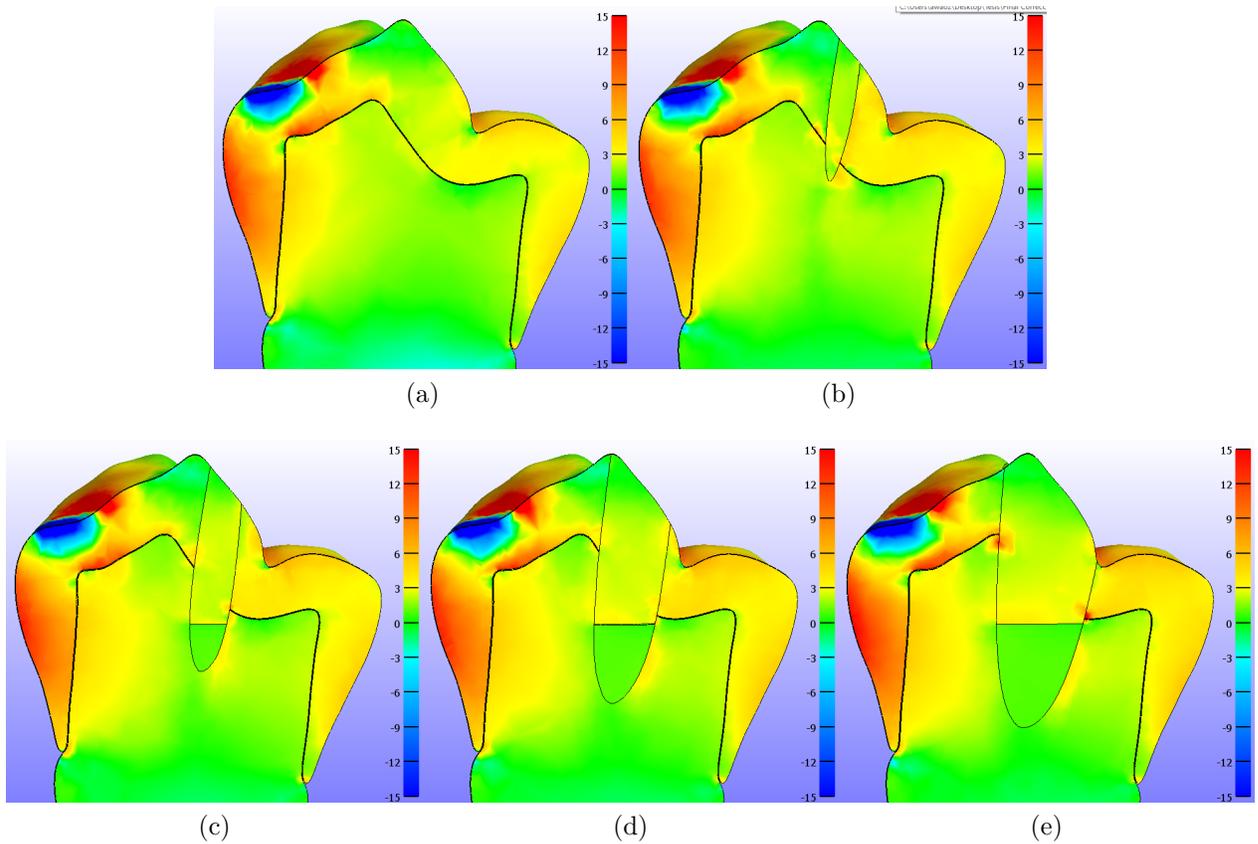


Figura 4.57: Comparación vista en corte entre rodetes marginales, bruxismo.
 (a) Diente natural. (b) Diente con acceso endodóntico ultra conservativo.
 (c) Diente con acceso endodóntico conservativo. (d) Diente con acceso endodóntico tradicional.

De igual manera que en la vista entre cúspides, se puede apreciar en la figura 4.55 que los accesos endodónticos producen una zona de concentración de esfuerzo alrededor de estos no obstante el tamaño de estos no parece tener un efecto significativo en el plano de corte entre rodetes marginales.

De todos los resultados se puede apreciar que los accesos endodónticos no afectan en gran manera la distribución de esfuerzo en la superficie oclusal del esmalte, no obstante sí se observan aumentos en los valores de estos esfuerzos en la zona de la cúspide vestibular. Se puede apreciar que los accesos afectan a la distribución de esfuerzos internos en el plano de corte entre cúspides, y que a medida que aumenta el volumen del tejido removido se generan zonas de concentración de esfuerzo de menor tamaño aumentando los valores de los esfuerzos.

De las figuras 4.45, 4.46 y 4.47 podemos observar que entre las restauraciones con resina fluida y resina compuesta comparada a la de vidrio ionomero y resina compuesta se aprecian resultados casi idénticos no obstante al compararlas con la restauración solo con vidrio ionomero, esta última posee una leve disminución en el esfuerzo máximo, no obstante los esfuerzos internos tanto en el plano entre cúspides como el plano entre rodetes marginales aumenta significativamente.

De las figuras 4.48, 4.49, 4.50 y 4.51 podemos observar que al variar las posiciones del acceso endodóntico tradicional los valores máximos en la superficie oclusal varían levemente no obstante sus distribuciones de esfuerzo son idénticas. Por otra parte en la distribución de esfuerzos internos en el plano entre cúspides si podemos observar diferencias, aunque manteniendo la misma dinámica vista en que los accesos afectan principalmente los esfuerzos alrededor de estos mismos.

Capítulo 5

Conclusiones

Luego de simular los casos de oclusión normal y bruxismo para los dientes sin acceso endodóntico y con los diferentes accesos endodónticos. Se puede concluir que el mejor acceso posible teniendo en consideración solo el esfuerzo principal máximo corresponde al acceso ultra conservativo ya que este presenta valores casi idénticos a los de un diente sin acceso. Sin embargo hay que considerar las complicaciones y la dificultad que existen al realizar este tipo de acceso por lo que no siempre podrá ser una alternativa viable. Además de los antecedentes se entiende que el análisis de elementos finitos solo considera las variables de los esfuerzos, pero no tiene en consideración otros factores igual de importantes que son las grietas producidas al aplicar tratamientos de endodoncia ni las fallas por cohesión que existen en los materiales de restauración. Para lograr el mejor tratamiento posible hay que tener en consideración todos estos factores y tener especial cuidado de realizar un tratamiento pulcro que dañe lo menor posible al diente ya sea removiendo menor tejido dentario así como también en evitar generar microgrietas que reducirán la vida de estos. Así se entiende que debido a la infinita variabilidad existente en el mundo biomecánico este estudio sirve como una aproximación de la realidad que deja diversos factores sin consideración.

Observando la tabla 4.6 se concluye que existe una relación entre el volumen de tejido dental removido y el esfuerzo máximo principal, pero por la manera en que se comportan las rectas al no observarse una relación directa se puede evidenciar que existen otros factores probablemente igual de importantes que afectan a los esfuerzos máximos tal como se observó al variar la posición de los accesos endodónticos.

De los resultados y principalmente de las figuras 4.54 y 4.56. Se puede observar que el acceso endodóntico produce concentraciones de esfuerzo alrededor de este y a medida que aumenta el tamaño del acceso y estas concentraciones se aproximan a las ya existentes en el diente natural, se produce un aumento de la concentración de esfuerzos.

Por otro lado se logro determinar que modelar el esmalte anisotrópicamente, en este caso de manera ortotrópica reduce considerablemente los esfuerzos máximos obtenidos no obstante las distribuciones de esfuerzo no varían en gran medida.

Trabajo propuesto

En este trabajo surgen diversos temas e ideas en los que se puede profundizar e innovar en una siguiente investigación.

- A través de micro-ct generar un mapa de densidades el cual permita modelar heterogéneamente al diente tal como se realizó en el estudio referenciado [14]. Y de esta manera luego modelar los accesos endodónticos para observar cómo afecta la heterogeneidad.
- En vez de aplicar cargas directamente al modelo se pueden modelar las geometrías de contacto de los dientes maxilares y que estos a su vez generen la fuerza sobre un objeto simulando un alimento generando una oclusión mucho más real. Esto debido a que pequeñas diferencias de las zonas de contacto producen variaciones significativas en los resultados.

Bibliografía

- [1] Alvarez Rodríguez, J. (2016). COMPENDIO DE ENDODONCIA. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1772.5041>
- [2] Rivera Velásquez, C. A. (2012). Comportamiento mecánico del esmalte dental [Info:eu-repo/semantics/masterThesis, Universidad EAFIT]. <http://repository.eafit.edu.co/handle/10784/698>
- [3] Cuy, J. L., Mann, A. B., Livi, K. J., Teaford, M. F., & Weihs, T. P. (2002). Nanoindentation mapping of the mechanical properties of human molar tooth enamel. *Archives of Oral Biology*, 47(4), 281-291. [https://doi.org/10.1016/S0003-9969\(02\)00006-7](https://doi.org/10.1016/S0003-9969(02)00006-7)
- [4] Huo, B. (2005). An inhomogeneous and anisotropic constitutive model of human dentin. *Journal of Biomechanics*, 38(3), 587-594. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.03.028>
- [5] Nagaş, I. Ç., Eğılmez, F., & Kivanç, B. H. (2018). The Permanent Maxillary and Mandibular Premolar Teeth. En *Dental Anatomy*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79464>
- [6] Benazzi, S., Grosse, I. R., Gruppioni, G., Weber, G. W., & Kullmer, O. (2014). Comparison of occlusal loading conditions in a lower second premolar using three-dimensional finite element analysis. *Clinical Oral Investigations*, 18(2), 369-375. <https://doi.org/10.1007/s00784-013-0973-8>
- [7] CHAPTER 5—Dental anatomy | Elsevier Enhanced Reader. (s. f.). <https://doi.org/10.1016/B978-0-7020-2980-6.00005-2>
- [8] Liem, T. (2004). Chapter 12—The orofacial structures, pterygopalatine ganglion and pharynx. En T. Liem (Ed.), *Cranial Osteopathy (Second Edition)* (pp. 437-484). Churchill Livingstone. <https://doi.org/10.1016/B978-044307499-8.50019-3>
- [9] Silva, E. j. n. l., Pinto, K. p., Ferreira, C. m., Belladonna, F. g., De-Deus, G., Dummer, P. m. h., & Versiani, M. a. (2020). Current status on minimal access cavity preparations: A critical analysis and a proposal for a universal nomenclature. *International Endodontic Journal*, 53(12), 1618-1635. <https://doi.org/10.1111/iej.13391>
- [10] Plotino, G., Grande, N. M., Isufi, A., Ioppolo, P., Pedullà, E., Bedini, R., Gambarini, G., & Testarelli, L. (2017). Fracture Strength of Endodontically Treated Teeth with Different Access Cavity Designs. *Journal of Endodontics*, 43(6), 995-1000. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2017.01.022>
- [11] Jiang, Q., Huang, Y., Tu, X., Li, Z., He, Y., & Yang, X. (2018). Biomechanical Properties of First Maxillary Molars with Different Endodontic Cavities: A Finite Element Analysis. *Journal of Endodontics*, 44(8), 1283-1288. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2018.04.004>

- [12] Munari, L. S., Cornacchia, T. P. M., Moreira, A. N., Gonçalves, J. B., De Las Casas, E. B., & Magalhães, C. S. (2015). Stress distribution in a premolar 3D model with anisotropic and isotropic enamel. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 53(8), 751-758. <https://doi.org/10.1007/s11517-015-1289-4>
- [13] Roperto, R., Sousa, Y., Dias, T., Machado, R., Perreira, R., Leoni, G., Palma-Dibb, R., Rodrigues, M., Soares, C., Teich, S., & Sousa-Neto, M. (2019). Biomechanical behavior of maxillary premolars with conservative and traditional endodontic cavities. *Quintessence international* (Berlin, Germany: 1985), 50, 350-356. <https://doi.org/10.3290/j.qi.a42369>
- [14] Chen, G., Fan, W., Mishra, S., El-Atem, A., Schuetz, M. A., & Xiao, Y. (2012). Tooth fracture risk analysis based on a new finite element dental structure models using micro-CT data. *Computers in Biology and Medicine*, 42(10), 957-963. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2012.07.006>
- [15] Yuan, K., Niu, C., Xie, Q., Jiang, W., Gao, L., Huang, Z., & Ma, R. (2016). Comparative evaluation of the impact of minimally invasive preparation vs. conventional straight-line preparation on tooth biomechanics: A finite element analysis. *European Journal of Oral Sciences*, 124(6), 591-596. <https://doi.org/10.1111/eos.12303>
- [16] Kishen, A. (2015). Biomechanics of fractures in endodontically treated teeth. *Endodontic Topics*, 33(1), 3-13. <https://doi.org/10.1111/etp.12089>
- [17] Söderholm, K.-J. (2012). Fracture of Dental Materials. En *Applied Fracture Mechanics*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/48354>
- [18] Soares, P. V., Santos-Filho, P. C. F., Queiroz, E. C., Araújo, T. C., Campos, R. E., Araújo, C. A., & Soares, C. J. (2008). Fracture resistance and stress distribution in endodontically treated maxillary premolars restored with composite resin. *Journal of Prosthodontics: Official Journal of the American College of Prosthodontists*, 17(2), 114-119. <https://doi.org/10.1111/j.1532-849X.2007.00258.x>
- [19] Taha, N., Palamara, J., Messer, H. (2011). Fracture strength and fracture patterns of root filled teeth restored with direct resin restorations. *Journal of dentistry*, 39, 527-535. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2011.05.003>
- [20] Visser, H. J., Brandt, P. D., & de Wet, F. A. (2015). Fracture behaviour patterns of cusp-replacing fibre strengthened composite restorations. *South African Dental Journal*, 70(9), 390-395.
- [21] Forster, A., Sáry, T., Braunitzer, G., & Frater, M. (2016). In vitro fracture resistance of endodontically treated premolar teeth restored with a direct layered fiber-reinforced composite post and core. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 1-13. <https://doi.org/10.1080/01694243.2016.1259758>
- [22] Garlapati, T. G., Krithikadatta, J., & Natanasabapathy, V. (2017). Fracture resistance of endodontically treated teeth restored with short fiber composite used as a core material—An in vitro study. *Journal of Prosthodontic Research*, 61(4), 464-470. <https://doi.org/10.1016/j.jpor.2017.02.001>
- [23] Bajaj, D., & Arola, D. (2009). Role of prism decussation on fatigue crack growth and fracture of human enamel. *Acta Biomaterialia*, 5(8), 3045-3056. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.04.013>

- [24] Lin, C.-L., Chang, Y.-H., & Pa, C.-A. (2009). Estimation of the risk of failure for an endodontically treated maxillary premolar with MODP preparation and CAD/CAM ceramic restorations. *Journal of Endodontics*, 35(10), 1391-1395. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2009.06.020>
- [25] Lauridsen, E., Hermann, N. V., Gerds, T. A., Kreiborg, S., & Andreasen, J. O. (2012). Pattern of traumatic dental injuries in the permanent dentition among children, adolescents, and adults. *Dental Traumatology: Official Publication of International Association for Dental Traumatology*, 28(5), 358-363. <https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.2012.01133.x>
- [26] Yahyazadehfar, M., Ivancik, J., Majd, H., An, B., Zhang, D., & Arola, D. (2014). On the Mechanics of Fatigue and Fracture in Teeth. *Applied Mechanics Reviews*, 66(3), 0308031-3080319. <https://doi.org/10.1115/1.4027431>
- [27] Barani Lonbani, A. (2013). The damage tolerance of teeth: Modelling the growth of cracks and prediction of bite load capacity [Doctoral Thesis].
- [28] Bechtle, S., Habelitz, S., Klocke, A., Fett, T., & Schneider, G. A. (2010). The fracture behaviour of dental enamel. *Biomaterials*, 31(2), 375-384. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.09.050>
- [29] Barani, A., Keown, A., Bush, M., Lee, J., Lawn, B. (2012). Role of tooth elongation in promoting fracture resistance. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 8, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2011.11.014>
- [30] Bajaj, D., Nazari, A., Eidelman, N., Arola, D. (2008). A Comparison of Fatigue Crack Growth in Human Enamel and Hydroxyapatite. *Biomaterials*, 29(36), 4847-4854. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2008.08.019>
- [31] Yahyazadehfar, M., Bajaj, D., & Arola, D. D. (2013). Hidden contributions of the enamel rods on the fracture resistance of human teeth. *Acta biomaterialia*, 9(1), 4806-4814. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2012.09.020>
- [32] Yilmaz, E. D., Schneider, G. A., & Swain, M. V. (2015). Influence of structural hierarchy on the fracture behaviour of tooth enamel. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 373(2038), 20140130. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0130>
- [33] Wan, B., Shahmoradi, M., Zhang, Z., Shibata, Y., Sarrafpour, B., Swain, M., Li, Q. (2019). Modelling of stress distribution and fracture in dental occlusal fissures. *Scientific Reports*, 9(1), 4682. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41304-z>
- [34] Li, L., Wang, Z.-Y., Bai, Z., Mao, Y., Gao, B., Xin, H., Zhou, B., Zhang, Y., & Liu, B. (2006). Three-dimensional finite element analysis of weakened roots restored with different cements in combination with titanium alloy posts. *Chinese medical journal*, 119, 305-311. <https://doi.org/10.1097/00029330-200602020-00007>
- [35] Summerscales, J. (2000). Bulk modulus of carbon fibers. *Journal of Materials Science Letters*, 19, 15-16. <https://doi.org/10.1023/A:1006731210592>
- [36] Saberi, E. A., Pirhaji, A., & Zabetiyan, F. (2020). Effects of Endodontic Access Cavity Design and Thermocycling on Fracture Strength of Endodontically Treated Teeth. *Clinical, Cosmetic and Investigational Dentistry*, 12, 149-156. <https://doi.org/10.2147/CCIDE>

- [37] ElAyouti, A., Serry, M. I., Geis-Gerstorfer, J., & Löst, C. (2011). Influence of cusp coverage on the fracture resistance of premolars with endodontic access cavities. *International Endodontic Journal*, 44(6), 543-549. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2011.01859.x>
- [38] Chai, H., Lee, J. J.-W., Kwon, J.-Y., Lucas, P. W., & Lawn, B. R. (2009). A simple model for enamel fracture from margin cracks. *Acta Biomaterialia*, 5(5), 1663-1667. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2008.11.007>