



UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA

“EVALUACIÓN DEL TORQUE Y
ESTRÉS DEL LIGAMENTO
PERIODONTAL SEGÚN EL ÁNGULO
CORONO RADICULAR DEL INCISIVO
CENTRAL SUPERIOR Y
POSICIONAMIENTO VERTICAL DE
BRACKET LINGUAL: MÉTODO DE
ELEMENTOS FINITOS”

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAESTRO EN ORTODONCIA

JULES MUNAYLLA AYALA

LIMA – PERÚ

2020

ASESOR

Mg. Esp. Orlando Tuesta Da Cruz

CO ASESOR

Mg. Esp. Carlos Liñán Durán

JURADO DE TESIS

MG. JOSE ANTONIO VIDALON CASTILLA

PRESIDENTE

MG. ADOLFO CARLO MAGNO CASTILLO MEZA

VOCAL

Mg. MARCO ANTONIO ALARCON PALACIOS

SECRETARIO

DEDICATORIA

A mi padre Máximo por todo su sacrificio para la educación de sus hijos, siempre estarás en mi corazón.

A mi madre Maurina por todo su amor y apoyo incondicional.

A mi hermano Geraldес por ser el ejemplo de superación.

A mi esposa Judith por su apoyo permanente y a mis hijos Giácomo y Josué

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Ing. Jorge Alencastre Miranda, profesor de la Sección de Ingeniería Mecánica – Área de diseño de la Pontificia Universidad Católica del Perú, por su interés en procesar y analizar esta investigación

Al Ing. Ernesto Verástegui Ñahuiz, por su dedicación en la elaboración y análisis mediante elementos finitos

A mis asesores, el Dr. Orlando Tuesta Da Cruz, Carlos Liñán Durán y a la Dra. Diana Becerra, por su apoyo continuo en el desarrollo de esta investigación

FUENTES DE FINANCIAMIENTO.

Tesis Autofinanciada

EVALUACIÓN DEL TORQUE Y ESTRÉS DEL LIGAMENTO PERIODONTAL SEGÚN EL ÁNGULO CORONO RADICULAR DEL INCISIVO CENTRAL SUPERIOR Y POSICIONAMIENTO VERTICAL DE BRACKET LINGUAL: MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	www.jco-ios.com Fuente de Internet	1%
2	www.acarindex.com Fuente de Internet	<1%
3	Submitted to University of Central Lancashire Trabajo del estudiante	<1%
4	Bhadrinath Srinivasan, Vignesh Kailasam, Arun Chitharanjan, Arthi Ramalingam. "Relationship between crown-root angulation (collum angle) of maxillary central incisors in Class II, division 2 malocclusion and lower lip line", Orthodontics The Art and Practice of Dentofacial Enhancement, 2013 Publicación	<1%
5	Qiannan Sun, Wenhsuan Lu, Yunfan Zhang, Liying Peng, Si Chen, Bing Han. "Morphological changes of the anterior	<1%

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN

ABSTRACT

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN	1
II. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	2
II.1. Planteamiento del problema	2
II.2. Justificación	3
III. MARCO TEÓRICO	4
III.1. Morfología del incisivo central superior	4
III.2. Torque y estrés del ligamento periodontal	7
III.3. Ortodoncia Lingual - Brackets Linguales	8
III.4. Método de elementos finitos	11
IV. OBJETIVOS	15
IV.1. Objetivo general	15
IV.2. Objetivos específicos	15
V. HIPÓTESIS	16
VI. MATERIALES Y MÉTODOS	17
VI.1. Diseño del estudio	17
VI.2. Unidad del estudio	17
VI.3. Variables	18
VI.4. Técnicas y procedimientos	19
VI.5. Plan de análisis	21

VI.6. Consideraciones éticas	21
VII. RESULTADOS	22
VIII. DISCUSIÓN	25
IX. CONCLUSIONES	30
X. REFERENCIAS	31
ANEXOS	

LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

MEF	:	Método de elementos finitos.
AEF	:	Análisis de elementos finitos.
LP	:	Ligamento periodontal.
CT	:	Tomografía computarizada de rayo cónico.
ACR	:	Ángulo corono radicular.
STB	:	Bracket Scuzzo Takemoto.
CRES	:	centro de resistencia
F	:	Fuerza
N	:	Newton
Mo	:	Momento
Mpa	:	Mega pascal
mm	:	Milímetro
JPEG	:	Compresión y codificación de archivos e imágenes fijas
DICOM	:	Imagen digital y comunicación en medicina
STL	:	Formato de archivo informático de diseño asistido por computadora

RESUMEN

Objetivo: Evaluar el torque y estrés del ligamento periodontal según el ángulo corono radicular del incisivo central superior y posicionamiento vertical de brackets lingual

Material y métodos: Se utilizó el FEM para el modelamiento del incisivo central superior derecho, ligamento periodontal, hueso esponjoso, hueso cortical y brackets lingual de marca STB. Se generaron 3 modelos matemáticos de incisivos con ángulo corono radicular de 160° , 170° , 180° , y posicionamiento de brackets lingual (STB) a nivel incisal, medio y cervical. Se utilizó el software Ansys 18.2 para analizar el torque y la distribución del estrés del ligamento periodontal.

Resultados: El torque mayor se halló en el incisivo con ángulo corono radicular de 180° y posicionamiento de brackets lingual a nivel incisal; mientras, el incisivo con ángulo corono radicular de 160° y posición de brackets lingual hacia incisal generó mayor estrés en el ligamento periodontal.

El posicionamiento de brackets lingual a nivel cervical genera menos estrés del ligamento periodontal, en los incisivos con ángulo corono radiculares de 160° , 170° , 180°

Conclusión: La variación de posicionamiento vertical de brackets linguales y la variación del ángulo corono radicular afecta el torque y estrés del ligamento periodontal

Palabras claves: ortodoncia, torque, método de elementos finitos.

ABSTRACT

Objective: To evaluate the torque and stress of the periodontal ligament according to the crown root angle of the upper central incisor and vertical positioning of the lingual brackets

Material and methods: The FEM was used to model the upper right central incisor, periodontal ligament, alveolar bone, cortical bone and STB brand lingual brackets. Three mathematical models of incisors with crown root angle of 160 °, 170 °, 180 °, and lingual bracket (STB) positioning at the incisal, medium and cervical levels were generated. Ansys 18.2 software was used to analyze the displacement and stress distribution of the periodontal ligament.

Results: The highest torque was found in the incisor with 180 ° crown root angle and lingual bracket positioning at the incisal level; mean while, the incisor with a 160 ° crown root angle and lingual bracket position towards the incisal generated greater stress in the periodontal ligament.

The positioning of the lingual bracket at the cervical level generates less stress of the periodontal ligament, in the incisors with a crown root angle difference

Conclusion: The variation of vertical positioning of lingual brackets and the variation of the crown root angle affects the torque and stress of the periodontal ligament

Keywords: orthodontics, torque, finite element method.

I. INTRODUCCIÓN

El tratamiento de ortodoncia consiste en corregir las irregularidades y defectos de los dientes y huesos (maloclusión). Generalmente, se utilizan brackets metálicos en la superficie vestibular de los dientes para corregir estas maloclusiones. La ubicación de los brackets en la superficie vestibular se considera antiestética para la mayoría de los pacientes.^{2,3}

En la década de 1978, surgió la ortodoncia lingual como una técnica completamente invisible, ya que los brackets se colocan en la superficie lingual de los dientes.^{4,6} En la actualidad, existe una creciente preocupación de los pacientes por su apariencia externa, y la ortodoncia lingual es una técnica invisible solicitada por estos pacientes.⁶ Sin embargo, la ortodoncia lingual presenta muchas dificultades en su manejo. Los incisivos superiores requieren un torque adecuado para establecer una oclusión correcta y una relación estética entre el labio y los dientes.³⁻⁶ Los incisivos centrales presentan diferencias en su forma corono-radicular según la maloclusión;⁹ este cambio en la forma corono-radicular de los incisivos requiere diferentes posiciones de brackets en sentido vertical, distintos grados de fuerza y diferentes torques en el slot de los brackets. En este sentido, no existen estudios que indiquen un enfoque correcto, lo que deja numerosas incógnitas sin resolver.

El método de elementos finitos se considera el enfoque más completo disponible en la actualidad para calcular las complejas condiciones de distribución de tensiones presentes en el sistema dentario. Por esta razón, el objetivo principal de este estudio es evaluar el torque y el estrés en el ligamento periodontal según la

angulación corono-radicular del incisivo central superior y el posicionamiento vertical de los brackets linguales utilizando el método de elementos finitos.

II. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

Planteamiento del problema

El eje corono-radicular de los incisivos centrales superiores varía de acuerdo al tipo de maloclusión.¹⁻⁶ Muchos estudios relacionan los incisivos centrales superiores con angulación corono-radicular negativa con la maloclusión de clase II-división 2 de Angle; generalmente, el ápice de la raíz de los incisivos centrales de estas maloclusiones está en contacto con la cortical ósea vestibular.³⁻⁷ Por lo tanto, el tratamiento ortodóntico con brackets linguales será muy complejo, necesitando una inclinación radicular hacia el palatino en mayor grado, lo que aumentará el costo biológico.^{5,6} Por otro lado, la cara palatina de los incisivos centrales superiores es variable en su dimensión mesiodistal y en la posición incisogingival.^{3,4} Estas variaciones anatómicas de los incisivos centrales generarán diferentes grados de inclinación radicular al posicionar los brackets linguales a diferentes alturas.^{11,12} No existe evidencia científica que determine el punto exacto para el posicionamiento de los brackets linguales y que genere un grado de inclinación específico. Es importante conocer el estrés en el ligamento periodontal, ya que los incisivos centrales difieren en el ángulo corono-radicular, lo que nos ayudará a interpretar qué tipo de incisivo central genera un mayor estrés con la aplicación de la misma intensidad de fuerza. Por esta razón, surge la siguiente interrogante: ¿Cuál será el comportamiento del torque y el estrés del ligamento periodontal según el ángulo corono-radicular del incisivo central superior y el posicionamiento vertical de los brackets lingual?

II.1. JUSTIFICACIÓN

Este estudio se justifica debido a su relevancia tanto clínica como teórica. Los hallazgos de esta investigación serán de suma importancia para los ortodoncistas, ya que contribuirán a comprender la dirección de inclinación de los incisivos centrales superiores en función de diferentes ángulos coronoradiculares y la variación en la posición de los brackets linguales a distintas alturas. Esto permitirá la realización de nuevos estudios clínicos con el fin de determinar la ubicación precisa de los brackets linguales que pueda generar la inclinación deseada de acuerdo con el ángulo corono-radicular de los incisivos centrales.

Será de mucha importancia conocer el estrés en el ligamento periodontal de las distintas formas de configuración del incisivo central. Además, ayudarán a orientar futuros estudios para determinar el torque adecuado en el slot de los brackets en función de cada tipo de incisivo.

III. MARCO TEÓRICO

La maloclusión es una anomalía del desarrollo de los arcos dentales, causando problemas estéticos y funcionales, siendo las causas más comunes la genética y las condiciones funcionales adquiridas. Las condiciones mencionadas anteriormente, como las dietas pastosas, la respiración bucal y los hábitos orales deletéreos, especialmente la succión del chupón, están entre las principales causas atribuidas al desarrollo de la maloclusión.^{5,7,11} Las maloclusiones han sido preocupación de hace mucho tiempo para los pacientes y los intentos para corregir remonta hacia los 1000 años a.c.

Hacia los años de 1890 Edward H. Angle¹² empieza a desarrollar el concepto claro de la oclusión natural y los clasificó de manera sencilla en Maloclusión clase I, Maloclusión clase II-1, Maloclusión clase II-2 y Maloclusión clase III

Morfología de los incisivos centrales superiores

La morfología del incisivo central superior es un factor clave para lograr una relación de estética, función y estabilidad del tratamiento ortodóncico¹. El ángulo corono-radicular de los dientes con una sola raíz es de particular interés para los ortodoncistas, ya que cualquier variación en las angulaciones de las raíces proporcionará una aplicación de fuerza axial impredecible en movimientos tales como intrusión, extrusión y torque.^{13,14} Una característica importante de las maloclusiones de Clase II, división 2 de Angle, es la excesiva palatinización y extrusión de la corona de los incisivos centrales superiores^{2,3,6,7}. Esta retroinclinación de incisivos superiores se observa claramente en la tomografías,

como una angulación aumentada entre el eje largo de la corona y la raíz. Este ángulo fue nombrado como el ángulo del collum por Andreasen.² El eje longitudinal del diente se ve afectado por su anatomía, particularmente por el ángulo entre la porción de corona y la raíz. Taylor⁵ publicó una descripción extensa de las variaciones morfológicas del incisivo central superior, indicando que la relación de la raíz a la corona varía considerablemente debido a que ambas partes están sujetas a variaciones en sus curvaturas.^{6,7,14,15}

Ángulo corono radicular del incisivo central superior

Se define como el ángulo formado por el eje longitudinal de la corona y el eje longitudinal de la raíz (C a R). Este ángulo puede tener valor positivo cuando el eje longitudinal de la corona se sitúa lingualmente sobre el eje de la raíz y de valor negativo, cuando el eje de la corona está situado hacia vestibular de la raíz³ (Anexo 01). Un ángulo de corono radicular negativo, puede dar lugar a una palatinización y sobremordida profunda, ya que los incisivos superiores e inferiores pueden erupcionar unos tras otros, como sugieren Korkhaus¹ y Andreasen.² Varios autores han informado que existe una variación considerable en el ángulo corono radicular (ACR), que puede tomar valores entre 156 ° a 195°^{3,7,14,15}. El ACR puede limitar el grado al cual las raíces pueden ser torcidas palatinamente debido a una mayor proximidad a la cortical ósea del proceso alveolar. Teniendo en cuenta que una raíz aproximada contra la cortical ósea, corre un mayor riesgo de reabsorción radicular.^{14, 20}

Israr *et al.*³³ Realizó estudio comparativo sobre el ángulo collum del incisivo central superior de maloclusión clase II- 2 y maloclusión clase II-1 en el año 2013

y 2014 en 60 radiografías cefalométricas en el departamento de ortodoncia de la Universidad Lahore de Pakistan. Encontrando diferencias significativas entre los incisivos de cada maloclusión. La clase II-2 presenta un ángulo de collum ($10,03 \pm 4,37^\circ$) en comparación con la división 1 ($3,65 \pm 3,79^\circ$).

McIntyre *et al.*²⁷ Realizaron estudio sobre la anatomía corono radicular del incisivo central superior permanente. El objetivo de este estudio fue, determinar si la forma corono radicular del incisivo central en cefalograma lateral difiere entre las maloclusiones clase I, II-1, II-2, III. Como muestra seleccionaron 499 cefalometrías, de los cuales 361 cumplieron los criterios de inclusión.

La conclusión de este estudio fue de la siguiente manera: la forma corono radicular del incisivo central superior entre la maloclusión clase I, II-1 y III no difirió significativamente; sin embargo la forma corono radicular de la maloclusión II-2, fue significativamente diferente de la maloclusión clase I, II-1, III, la maloclusión clase II-2 presentó un ACR negativo

Papageorgiou *et al.*³ Realizaron estudio con elementos finitos sobre las diferencias de torque de acuerdo a la morfología de incisivo central superior y posicionamiento de brackets vestibulares. Se construyeron 3 modelos matemáticos de incisivos centrales superiores con su ligamento periodontal y alveolo, la angulación corono radicular fue de 156° , 170° y 184° . Para el posicionamiento vertical de brackets por vestibular; se dividió la corona clínica en 3 tercios iguales; tercio incisal, medio y cervical; el punto de referencia para el cementado de brackets fue , la parte media de cada tercio.

Conclusión del estudio, La inclinación de la corona palatina se vio significativamente afectado por el posicionamiento de los brackets (hasta 94%), mientras que el desplazamiento del ápice hacia bucal fue significativamente afectado por la prescripción del brackets (hasta 42%) y el posicionamiento del brackets (hasta 23%). Las tensiones en el PDL fueron afectadas principalmente por CRA (hasta 54 %), seguido por la colocación de brackets (hasta 45 %). Por último, la prescripción de brackets afectó considerablemente las tensiones en el brackets (hasta 144%).

Torque y estrés periodontal

El torque también llamado momento o momento de fuerza, es la tendencia de una fuerza a girar un objeto alrededor de su eje. En ortodoncia, el torque se define como un momento generado por la torsión de un alambre rectangular en la ranura de los brackets y se emplea para alterar la inclinación bucolingual de los dientes¹⁶, es un movimiento de la raíz mas no de la corona.¹⁰ El tratamiento de ortodoncia requiere una fuerza óptima para lograr un máximo movimiento dental con un daño mínimo a la raíz, el ligamento periodontal (PDL) y el hueso alveolar. Por lo tanto, la cuantificación y dirección de la fuerza es muy importante durante el tratamiento de ortodoncia. La comprensión y aplicación de los principios biomecánicos básicos en el tratamiento mejora la eficacia de un sistema de aparatología, simplifica el tratamiento, mejora la entrega de la fuerza y ayuda a lograr un movimiento dentario más predecible con efectos secundarios mínimos. Las fuerzas linguales en comparación con las fuerzas labiales es de 32,8% menor en ortodoncia lingual¹⁸ la ortodoncia labial y la ortodoncia lingual, se utilizan para movimientos dentales

similares, pero difieren considerablemente en su biomecánica. Se pueden utilizar varios métodos para evaluar las diferencias y el método más adecuado es el FEM¹⁸ la expresión del torque en ortodoncia lingual no está suficientemente investigada, debido a que la perspectiva lingual del diente es más compleja y versátil, cada cambio en la posición de brackets puede incrementar o disminuir la fuerza para generar una inclinación^{17,19}

Ortodoncia lingual y brackets linguales

La ortodoncia lingual es la única técnica ortodóncica fija que permite un control tridimensional completo del movimiento del diente, manteniendo al mismo tiempo el aspecto estético del paciente; es la única técnica que se ha descrito como completamente invisible.¹⁹ Los primeros aparatos linguales fueron introducidos en los años 70 por Fujita en Japón y Kurtz en los EEUU.²⁰ Los aparatos ortodóncicos linguales habían sido estudiados por los clínicos con un gran interés inicialmente, pero debido a su diferente enfoque biomecánico comparado con la ortodoncia labial y debido a los problemas clínicos resultantes, hubo un rápido descenso del interés. Tener una configuración precisa (set-up) es un factor importante en todas las técnicas linguales con arcos rectangulares para el control del torque, y permite la transferencia indirecta de los brackets.^{19- 23}

Sifakakis *et al.*²⁰ Afirma que el aspecto lingual del diente es más complejo y versátil y por lo tanto, cada cambio en la posición del brackets en el lado lingual puede causar un cambio impredecible y extenso en el torque y la altura vertical del diente.

Además, la distancia entre el centro de resistencia y la aplicación del punto de fuerza podría ser diferente entre los aparatos linguales y convencionales, lo cual influye en la magnitud de los momentos de fuerzas, como consecuencia el torque es más difícil de controlar en la ortodoncia lingual. Sifakakis et al²⁰ realizaron un estudio comparativo sobre expresión del torque con brackets linguales y convencionales. Los brackets linguales utilizados en el estudio fueron: Incognito™ (3M Unitek, Monrovia, CA, USA), STb™ (Light Lingual System; ORMCO, Orange, CA, USA), In-Ovation L (DENTSPLY GAC, Bohemia, NY, USA) de slot de slot 0.018". Los brackets convencional de slot 0.018" (Gemini Twin; 3M Unitek). Los brackets de Incognito y STB generaron los momentos más altos. La menor expresión del torque se observó en los brackets linguales auto-ligantes, seguido de los brackets convencionales. Las fuerzas creadas a partir de un arco rectangular 0.016 x 0.022" en sistemas de brackets linguales está influenciado por el modo de ligación, es decir, convencional frente a autoligado, y no por la orientación de la ranura del brackets¹⁹⁻²¹

La altura de la corona clínica por palatino en el paciente promedio son aproximadamente 30% más corta que la corona disponible en las superficies labiales. Coronas clínicas linguales cortos pueden presentar una contraindicación para la óptima colocación de los brackets lingual.

Brackets linguales

Debido a las crecientes demandas estéticas de los pacientes, la ortodoncia lingual ha sido difundida y mejorada. Desde el inicio de su desarrollo hasta la fecha, se han diseñado y modificado varios brackets linguales y se han incorporado nuevos

procedimientos de laboratorio para mejorar los resultados, aumentar la eficiencia mecánica y el confort del paciente.²⁴

Los bracket patentados por los doctores Scuzzo y Takemoto (STB) se desarrolló en el año 2003 a partir de tres conceptos: mayor comodidad, más velocidad y mayor fiabilidad. Usando el arco recto lingual (LSW) requiere que el bracket se posicione mucho más cerca al margen gingival de la superficie lingual. En el año 2009 se mejora los brackets STB convencional al nuevo STB incorporando gancho (Ormco). El nuevo STB tiene una ranura horizontal de 0.018x0.025 pulgadas, cuya composición es de un 17-4PH de acero inoxidable, mientras que el material de la malla es 316 L de acero inoxidable.²⁵ Los brackets linguales STB, es pequeño y delgado para reducir la interferencia oclusales y aumentar la distancia interbrackets para fuerzas más ligeras. Su diámetro es de 4.57 mm de largo y 1.5 mm diámetro buco lingual.²⁵ La prescripción de los brackets linguales STB se detalla en (Anexo 02).

Posicionamiento de los brackets linguales

La colocación de los brackets linguales es más complicado que los brackets vestibulares a nivel de los incisivos centrales superiores, ya que necesita compensar características linguales específicas, tales como: diámetros de los dientes y cambios en la inclinación de la superficie lingual en relación con el plano oclusal.

Knösel *et al.*²³ Realizaron una investigación sobre cambios en el torque de los incisivos centrales superiores e inferiores con variación de posicionamiento vertical de brackets linguales en el año 2009. Para las mediciones del torque y

localización adecuada para la colocación de brackets linguales la referencia fue el plano oclusal. Se utilizaron las radiografías laterales de 38 sujetos no tratados en normoclusión sin abrasiones o restauraciones incisivas. Los puntos en la cara lingual fueron determinadas por los tangentes en la fosa incisal (S1), en la zona de transición entre la fosa incisal y el cingulo (S2), por una línea que inicia de la punta incisal al cingulo (S3) y por una tangente de la convexidad del cingulo (S4)²³ (Anexo. 03).

Para el presente estudio se utilizaron los siguientes puntos: S1, S2, S4. No se utiliza el punto S2 por la dificultad de ubicación en incisivo central superior con ACR 180°

Incisal (S1): Es la tangente de la fosa incisal

Medio(S3): Línea que inicia del borde incisal al cingulo

Cervical(S4): es la tangente de la convexidad del cingulo.

Método de elementos finitos en ortodoncia

El método de elementos finitos (FEM) implica una serie de procedimientos computacionales matemáticos para calcular la distribución de carga en cada elemento. Este análisis estructural permite determinar el estrés resultante de la fuerza externa, la presión, el cambio térmico y otros factores. Este método es extremadamente útil para indicar aspectos mecánicos de biomateriales y tejidos humanos que difícilmente pueden medirse in vivo.²⁶ El método de elementos finitos (FEM) es una técnica muy precisa utilizada para analizar el estrés estructural. Utilizado en la ingeniería durante años, este método utiliza la computadora para resolver un gran número de ecuaciones para calcular el estrés sobre la base de las

propiedades físicas de las estructuras que se analizan.²⁷ El FEM tiene muchas ventajas sobre otros métodos, como el método fotoelástico, resaltado por la capacidad de incluir la heterogeneidad del material dental y la irregularidad del contorno del diente en el diseño del modelo y la relativa facilidad con la que se pueden aplicar cargas en diferentes direcciones y magnitudes para un análisis más completo. El análisis de elementos finitos se ha utilizado en odontología para investigar una amplia gama de temas, como la estructura de los dientes, biomateriales y restauraciones, implantes dentales y conductos radiculares

Aplicaciones en ortodoncia

La aplicación del FEM en ortodoncia es muy amplia desde la descripción de los cambios de forma en las estructuras biológicas, en particular en el área de crecimiento y desarrollo, el análisis de las tensiones producidas en el ligamento periodontal cuando se someten a fuerzas ortodóncicas, el estudio de la biomecánica, del movimiento dentario, el comportamiento mecánico de los arcos ortodóncicos y el diseño de los brackets^{28,29}

Ventajas de método de elementos finitos²⁸

- No se requiere instrumentación extensa.
- Los problemas más complejos pueden dividirse en problemas más pequeños.
- Es un procedimiento completamente no invasivo.
- Se pueden generar modelos tridimensionales.
- Las propiedades físicas reales pueden ser simuladas y el ambiente externo puede ser simulado.
- El operador puede repetir el estudio tantas veces como sea posible.

Desventajas de método de elementos finitos ²⁹

- El diente es tratado como sujetado al hueso a través del ligamento periodontal, esta rigidez en el complejo nodal elemental puede resultar en errores en los cálculos
- Para simular el entorno físico se hacen ciertas suposiciones que pueden resultar en errores en cálculos de tensión máxima
- Las propiedades asignadas para los cálculos no son satisfactorias, por lo que se deben utilizar propiedades mejor definidas para obtener resultados más precisos.
- El método de elementos finitos (FEM) o el Análisis de Elementos Finitos (FEA) es una herramienta de investigación contemporánea para la especialidad de ortodoncia. ^{27,28} El análisis de elementos finitos proporciona al ortodoncista datos cuantitativos que puedan ampliar la comprensión de reacciones fisiológicas que ocurren dentro de la región más compleja dentoalveolar, se puede utilizar en diversas ramas de la odontología para estudiar los patrones de estrés relacionados con comportamiento de los tejidos orales ²⁸ es importante mencionar que la interacción con los técnicos informáticos y con los ortodoncistas para la realización de las mallas, la discusión de las hipótesis, de los modelos y las conclusiones de los resultados, constituyen uno de los aspectos

Etapas básicas en la utilización del método de los elementos finitos

1. **Pre-procesamiento.** El propósito de la fase de modelado geométrico es representar la geometría en términos de puntos, líneas, áreas y volumen. Los objetos complicados o lisos pueden ser representados por piezas

geoméricamente simples, esto puede lograrse mediante tomografía computarizada, normalmente se hace para modelar estructuras complejas o tejidos vivos, esqueleto craneofacial, maxilar o mandíbula. El escáner láser, por lo general, se utiliza para modelar objetos inanimados, por ejemplo modelado de brackets²⁷⁻²⁹

- **Conversión del modelo geométrico al modelo de elementos finitos**

La Discretización es el proceso de dividir el problema en varios elementos pequeños, conectados con los nodos. Todos los elementos y nodos deben estar numerados para que se establezca una configuración de conectividad matricial. Los elementos pueden ser uno, dos o tridimensionales y de diversas formas. Es esencial que los elementos no se superpongan, sino que estén conectados sólo en los puntos clave, que se denominan nodos. La unión de elementos en los nodos y la eliminación de los nodos duplicados se denominan "malla".²⁷⁻²⁹

- **Ensamblado / material representación de datos de propiedad**

Las ecuaciones se desarrollan para cada elemento en la malla FEM y se ensamblan en un conjunto de ecuaciones globales que modelan las propiedades de todo el sistema. Las propiedades de materiales mínimas requeridas son proporción de Poisson y el módulo de Young.²⁷

- **Definición de las condiciones de los límites**

Condiciones de frontera significa que supongamos que un elemento se construye en el ordenador y se le aplica una fuerza, actuará como un cuerpo rígido flotante y experimentará un movimiento de traslación o rotación o una combinación de los dos sin experimentar deformación. Para estudiar su deformación, algunos grados de libertad deben ser restringidos (movimiento del nodo en cada dirección x , y , z) para algunos de los nodos. Tales restricciones se denominan condiciones de limite.²⁷⁻²⁹

- **Aplicación de la fuerza**

Aplicación de la fuerza en varios puntos de geometría y su configuración.

2. **Procesamiento:**

Resolver el sistema de la ecuación algebraica lineal. Las tensiones se determinan a partir del estrés por la ley de Hooke. Las tensiones se derivan de las funciones de desplazamiento dentro del elemento combinado con la ley de Hooke.²⁷⁻²⁹

3. **Post-procesamiento:**

El resultado del Análisis de Elementos Finitos se encuentra principalmente en la forma numérica. El resultado es principalmente en forma de mapas con códigos de colores, el análisis cuantitativo se determina mediante la interpretación de estos mapas. Los resultados y pantallas gráficas suelen ser más informativas, las curvas y contornos de la variable de campo se pueden trazar y mostrar²⁷⁻²⁹

IV. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el torque y estrés del ligamento periodontal según la angulación corono radicular del incisivo central superior y posicionamiento vertical de brackets linguales

Objetivos específicos

1. Determinar el torque del incisivo central superior con ángulo corono radicular de 160° , 170° , 180° y posicionamiento vertical de bracket lingual hacia incisal, medio, cervical
2. Determinar el estrés del ligamento periodontal en el incisivo central superior con ángulo corono radicular de 160° , 170° y 180° y posicionamiento vertical de bracket lingual hacia incisal, medio, cervical

V. HIPÓTESIS

Existe diferencia del torque y estrés del ligamento periodontal según la angulación corono radicular del incisivo central superior y posicionamiento vertical de bracket lingual

VI. MATERIAL Y MÉTODOS

VI.1. Diseño del estudio

Experimental in silico

VI.2. Unidad de estudio: incisivo central superior derecho

Grupo Experimental: 3 modelos matemáticos de incisivos centrales superiores con ángulo corono radicular de 160°, 170°, 180° (anexo 05)

- Modelo matemático de 160° con brackets linguales, en posiciones: incisal, medio y cervical
- Modelos matemático de 170° con brackets linguales, en posiciones: incisal, medio y cervical
- Modelos matemático de 180° con brackets linguales, en posiciones: incisal, medio y cervical

VI.3. Variables

VI.3.1. Variables independientes

- Angulo corono radicular del incisivo central superior
- Posicionamiento vertical de bracket lingual

VI.3.2. Variables dependientes

- Torque
- Estrés del ligamento periodontal

VI.4. Técnicas y Procedimiento

1. Criterios de inclusión:

Tomografías computarizadas cone beam, tomadas con el modelo Picasso Master, de haz cónico, campo de visión de 20 cm x 19 cm, tiempo de exposición de 24 segundos, pacientes con ojos abiertos, boca cerrada y sin apoyo en el mentón. Edades de 16 a 40 años, en dentición permanente y en aparente buen estado general. El incisivo central debe estar sin ningún tipo de tratamiento, con una proporción corono radicular de 1 a 2.

2. Recolección de la muestra:

Se solicitó permiso al coordinador del departamento de ortodoncia de la clínica dental docente de la UPCH para revisar las historias clínicas y las tomografías del año 2015-2017.

Se revisaron 40 tomografías del incisivo central superior derecho utilizando el software RealScan 2.0 de: 5 pacientes con maloclusión clase I, 15 pacientes con maloclusión clase III y 20 pacientes con maloclusión clase II-2. La muestra se obtuvo por conveniencia, hasta encontrar los incisivos con un ACR de 160°, 170°, 180°. Los cortes del incisivo central superior derecho se realizaron con un intervalo de 0.5 mm y un grosor de 2.0 mm, almacenándolos en formato JPEG.

Las imágenes se transportaron al Software de imagen Fona OrisWin DG Suite 4.0 para realizar las mediciones exactas del ángulo corono radicular: 160°, 170°, 180° (Anexo 08).

Se solicitó permiso para el procesamiento de los modelos matemáticos y el análisis de elementos finitos a la Pontificia Universidad Católica del Perú, sección Ingeniería Mecánica – Área de diseño (Anexo 07).

3. Preprocesamiento:

Se utilizó un procesador HP con procesador Intel Core i7 de 7ª generación para realizar cortes tomográficos de los incisivos centrales superiores con ángulos corono radiculares de 160°, 170°, 180° (Anexo 06). Las tomografías seleccionadas se almacenaron en un disco externo con extensión DICOM para iniciar el procesamiento. Se utilizó el software 3D Slicer 4.8.0 para la segmentación del incisivo central superior, el ligamento periodontal con un grosor de 0.2 mm, el hueso alveolar, y el hueso cortical, guardándolos con extensión STL (Anexo 09).

4. Procesamiento:

Las imágenes segmentadas se transportaron al software Autodesk Meshmixer para afinar el contorno y se guardaron como archivos de malla STL. Luego se exportaron al programa Solidworks para modelar la geometría final para la simulación (Anexo 10). Para la construcción del bracket lingual STB, se tomaron fotografías desde diferentes ángulos para esquematizar todas sus características. El slot es de 0.018 x 0.025 pulgadas, y el arco de TMA calibre 0.016x0.022 pulgadas se instaló pasivamente en el slot del bracket y se ligó con alambre de ligadura de 0.010 pulgadas (Anexo 11). El enmallado de los huesos, dientes y ligamento periodontal se realizó con elementos tetraédricos, mientras que para los brackets se utilizaron elementos hexaédricos. El número de nodos y elementos para

cada estructura se detalla en el (Anexo 12). Luego se ensamblaron cada uno de los incisivos con su respectivo bracket, arco, y ligadura metálica en las posiciones incisal, media y cervical (Anexo 4). Para el análisis se consideraron las siguientes propiedades mecánicas de las estructuras dentarias, el bracket y el alambre TMA (Anexo 13). La aplicación de la fuerza fue de 1.5 N al alambre TMA de 0.016 x 0.022 pulgadas, posterior al ligado del arco al slot del bracket. La simulación por elementos finitos se realizó mediante el software ANSYS 18.2.

VI.5. Plan de análisis:

El resultado se presenta principalmente en forma de mapas con códigos de colores, y el análisis cuantitativo se determina mediante la interpretación de estos mapas (Anexo 15, 16, 17). Se realizó la tabulación de los datos recolectados en el programa Microsoft Excel versión 22.0, donde se crearon tablas descriptivas y gráficas.

VI.6. Consideraciones éticas

El protocolo de investigación fue enviado para su evaluación y aprobación al Comité Institucional de Ética (CIE) de la Universidad Peruana Cayetano Heredia y se aprobó para la ejecución del trabajo (Anexo 14)

VII. RESULTADOS

En todos los modelos, la corona se inclinó hacia vestibular y la raíz hacia palatino (torque positivo). El torque mayor se encontró en el incisivo con un ángulo de collum de 180° y posicionamiento de brackets linguales hacia incisal; mientras que el torque menor se encontró en el incisivo con ángulos de collum de 160°, 170° y 180° y posicionamiento de brackets lingual hacia cervical. Tabla 01 y Gráfico 01. El posicionamiento de brackets linguales en el medio de la corona produjo un torque similar en los tres incisivos con ángulos de collum de 160°, 170° y 180°. Tabla 01 y Gráfico 01. El estrés más alto se produjo en el incisivo con un ángulo corono radicular de 160° y posicionamiento de brackets linguales hacia incisal; mientras que el estrés más bajo se encontró en el incisivo con ángulos corono radicular de 170° y 180° y posicionamiento de brackets lingual hacia cervical. Tabla 02 y Gráfico 02. El incisivo con un ángulo corono radicular de 160° en las tres posiciones de bracket lingual (incisal, medio, cervical) produjo el estrés más alto en comparación con los incisivos con ángulos corono radicular de 170° y 180°. El posicionamiento de brackets linguales hacia incisal en los incisivos con ángulos corono radicular de 160°, 170° y 180° produjo un mayor estrés en el ligamento periodontal; mientras que el posicionamiento de brackets linguales hacia cervical en los tres incisivos con ángulos corono radicular de 160°, 170° y 180° produjo un menor estrés en el ligamento periodontal. El incisivo central con un ángulo corono radicular de 170° y posicionamiento de bracket lingual hacia incisal, medio y cervical produjo un menor estrés en el ligamento periodontal en comparación con los incisivos con ángulos corono radicular de 160° y 180°.

Tabla N° 01. Distribución del Torque de acuerdo al ángulo corono radicular del incisivo central superior y posicionamiento vertical del bracket lingual.

ACR	Torque del incisivo central superior (mm)		
	160°	170°	180°
Incisal	0.09	0.10	0.11
Medio	0.08	0.08	0.09
Cervical	0.05	0.06	0.06

Gráfico N° 01. Distribución del Torque de acuerdo al ángulo corono radicular del incisivo central superior y posicionamiento vertical de bracket lingual

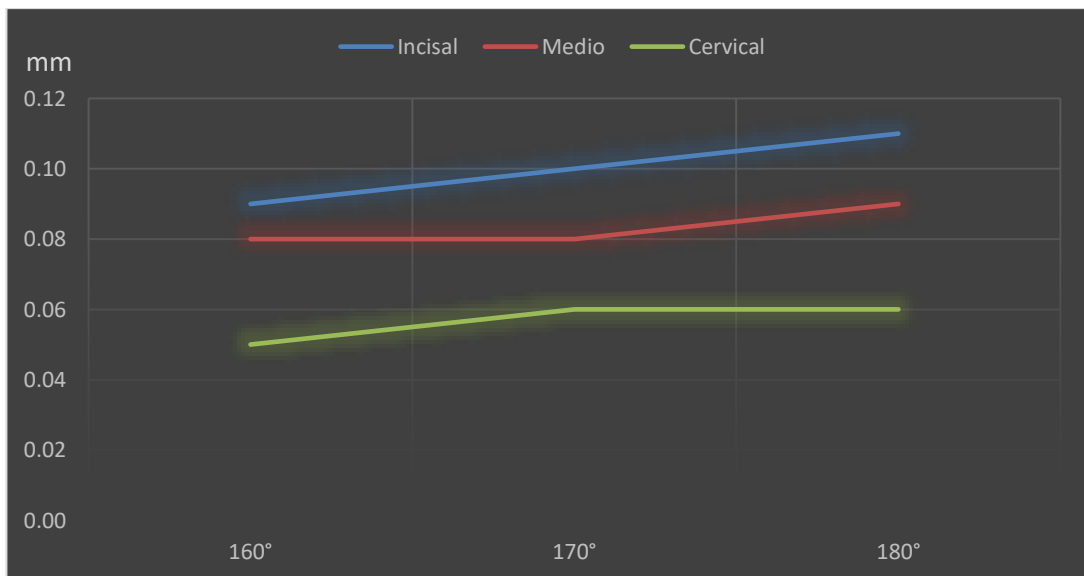
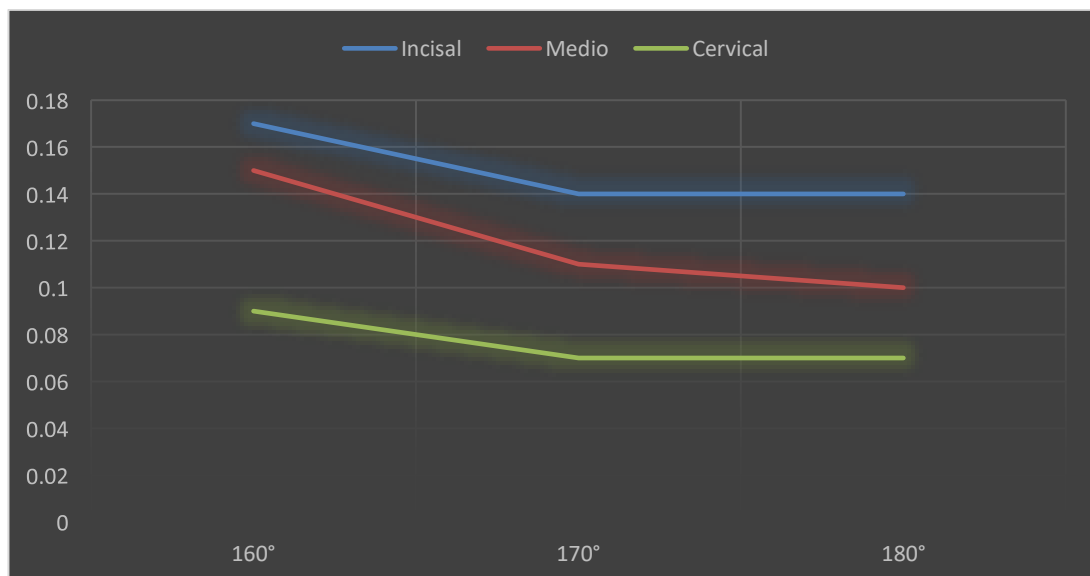


Tabla N° 02. Distribución del estrés del ligamento periodontal de acuerdo al ángulo de corono radicular del incisivo central superior y posicionamiento vertical de brackets lingual

ACR	Estrés del ligamento periodontal (Mpa)		
	160°	170°	180°
Incisal	0.17	0.14	0.14
Medio	0.15	0.11	0.10
Cervical	0.09	0.07	0.07

Gráfico N° 02. Distribución del estrés del ligamento periodontal de acuerdo al ángulo corono radicular del incisivo central superior y posicionamiento vertical de bracket lingual



VIII. DISCUSIÓN

Se investigó la contribución relativa del ángulo corono radicular del incisivo central superior derecho y la variación en el posicionamiento vertical de brackets linguales sobre la expresión del torque del incisivo y el estrés desarrollado en el ligamento periodontal en una investigación in silico.

Los hallazgos más importantes encontrados en este estudio son el aumento del torque en el modelo de 180° con posicionamiento de brackets linguales hacia incisal. Este aumento del torque se puede manifestar debido al posicionamiento de brackets lingual hacia incisal, ya que aumenta la distancia al centro de resistencia, lo que conlleva a un aumento del momento (mayor giro).

Becerra D. C. et al. (2018) encontraron que la variación en la posición de brackets linguales en segundas premolares tiene efectos sobre la expresión del torque, siendo los mayores efectos cuando los brackets linguales se posicionaron hacia oclusal.

También, el acople del alambre TMA en el slot de los brackets linguales, al realizar el torque, hace que los cantos del alambre contacten con las paredes del slot del bracket, generando una carga hacia el centro de resistencia y, como consecuencia, un movimiento de inclinación del incisivo. Esta conclusión puede justificarse por las investigaciones realizadas por Papageorgiou et al. (2017), quienes llevaron a cabo un estudio sobre las diferencias en el torque en los diferentes componentes de la aparatología ortodóntica. Concluyeron que el alambre utilizado influye principalmente en el desplazamiento y el estrés del ligamento periodontal. Arreghini A et al. (2017) realizaron un estudio sobre la capacidad de expresión del torque en los brackets con slot de 0.018" y 0.022" con diferentes materiales de arcos

y calibres, demostrando que la precisión dimensional de los brackets y arcos de ortodoncia tienen una profunda influencia en la expresión del torque.

El contorno labial de la superficie de la corona difiere a diferentes alturas en la corona del mismo diente por vestibular; por lo tanto, un arco de alambre completamente acoplado en el slot del bracket producirá un torque diferente en el diente.

Los aspectos linguales del incisivo por palatino muestran una gran variedad en el tamaño y la morfología. Además, el cingulo, la cresta marginal y la curvatura pronunciada de la superficie lingual varían.

En este estudio, se encontró un mayor estrés en el ligamento periodontal del incisivo con un ángulo de collum de 160° y posición de brackets linguales en incisal, medio y cervical; sin embargo, produjo un menor torque en el incisivo en comparación con los demás modelos. La biomecánica en ortodoncia lingual es diferente. Con los brackets vestibulares, los cambios en la altura del bracket y los cambios en la inclinación del diente no provocan grandes cambios en relación al punto de aplicación de la fuerza y al centro de resistencia (Cres). Mientras que en ortodoncia lingual, cambios en la altura del bracket y los cambios en la inclinación del diente y el grosor del cemento adhesivo de la base personalizada del bracket provocan un cambio importante en la relación entre Cres y el punto de aplicación de la fuerza, lo que lleva a la generación de un momento diferente y hace que la biomecánica lingual sea más dinámica. Existe un momento de inclinación (torque) lingual inherente en los dientes anteriores con mecánica lingual.

Samandara et al. (2016) realizaron una revisión sistemática sobre la reabsorción radicular en el tratamiento de ortodoncia. Manifiestan que la reabsorción apical inducida por tratamiento de ortodoncia (OIRR) es una complicación frecuente del movimiento dentario ortodóntico, cuya etiología es multifactorial y el mecanismo de acción no está completamente claro. Los factores internos se consideran la genética, sexo, edad, tipo de diente, factores sistémicos, morfología radicular y antecedentes de trauma dentario. Por otro lado, los factores externos están relacionados al tratamiento de ortodoncia, como el tipo de aparato, duración del tratamiento, tipo de movimiento dentario, magnitud de la aplicación de la fuerza, duración de la aplicación de la fuerza y tratamiento con extracción. La evidencia sugiere que el tratamiento de ortodoncia aumenta la incidencia y la gravedad de la reabsorción radicular; diferentes posiciones de los dientes mostraron diferentes grados de reabsorción, y la secuencia de reabsorción radicular más frecuente fue en los incisivos laterales superiores, incisivos centrales maxilares, dientes antero inferiores y caninos maxilares, y la extracción de dientes aumenta la reabsorción.

Cabe mencionar que en el estudio se encontró que el incisivo central derecho con ángulo corono radicular de 160° produjo un mayor estrés en el ligamento periodontal con posicionamiento de brackets linguales hacia incisal, medio y cervical en comparación con el modelo de 170° y 180° y con poco movimiento de torque. Estos hallazgos se pueden relacionar con la curvatura de la raíz, que muchos autores refieren, que la desviación de la raíz produce más estrés en el ligamento periodontal; por otro lado, al realizar un torque en el arco, aumenta considerablemente el movimiento de la raíz, produciendo mayor estrés a nivel apical, como se muestra en la Fig. 03.

Estos hallazgos se pueden correlacionar con los trabajos realizados por Papageorgiou et al. (2016), quienes llevaron a cabo estudios con modelos de ACR de 156°, 170°, 184° con posicionamiento de brackets vestibulares en diferentes alturas; el posicionamiento de los brackets influyó en el desplazamiento de la corona hacia palatino, y el estrés del ligamento periodontal fue afectado principalmente por la angulación corono radicular de 156°.

Oyama et al. (2015) evaluó los efectos de la morfología radicular sobre la distribución del estrés en el ápice radicular; las raíces desviadas, como las cortas, dilaceradas, romas o con forma de pipeta, resultaron en una mayor generación de estrés a nivel apical del periodonto en comparación con una raíz normal. La morfología de la raíz dilacerada mostró la tensión máxima en la raíz al aplicar fuerzas en diferentes direcciones y fue propensa a la reabsorción radicular. Muchos estudios indican que los incisivos superiores son más susceptibles a la reabsorción radicular durante el tratamiento de ortodoncia.

En el tratamiento de ortodoncia con brackets linguales, después de haber terminado el tratamiento activo, la longitud de la raíz permaneció en un 96.3% (tasa de reabsorción 3.7%).

Las comparaciones con otros estudios son limitadas debido a la ausencia de estudios con un alcance y resultados similares. Hay otros factores que podrían influir en el comportamiento biomecánico de aparatos fijos, como el tipo de cementado de los brackets y la utilización de setup antes de cementar los brackets.

Varias consideraciones deben ser tomadas en cuenta al interpretar los resultados de este estudio, como la forma radicular, biotipo facial y enfermedades sistémicas.

En lo que se refiere a las implicaciones clínicas, se justifica una cuidadosa consideración de la prescripción y posicionamiento del bracket lingual, especialmente en casos de coronas palatinas cortas. Aunque las recomendaciones de tercer orden para incisivos superiores parecen verse afectadas por la morfología de la corona del diente, la magnitud de los momentos aplicados y del estrés correspondientes en el PDL parecen estar directamente afectados y deben ser considerados en los casos de ángulo corono radicular desviados para evitar efectos secundarios no deseados. El uso de arcos rectos por lingual podría no ser apropiado para cada paciente individual, mientras que la planificación de tratamiento individualizado para mecanoterapia ortodóncica lingual podría ser favorable.

IX. CONCLUSIÓN.

1. El cambio de la angulación corono radicular del incisivo central superior derecho, afecta a la expresión del torque
2. La variación vertical, en el posicionamiento de brackets linguales influye en el estrés del ligamento periodontal

X. REFERENCIAS

1. Bruhn C, Hofrath H, Korkhaus G. Gebiss-, Kiefer- und Gesichtorthopädie. 2nd ed. Bruhn C, editor. Berlín, Alemania: Springer; 1939.
2. Papageorgiou SN, Sifakakis I, Keilig L, Patcas R, Affolter S, Eliades T. Torque differences according to tooth morphology and bracket placement: a finite element study. *Eur J Orthod*. 2017;39(4):411–8
3. Nr V, Nagachandran K, Kumar S, Ym H. Apical stress distribution on maxillary central incisor during various orthodontic tooth movements by varying cemental and two different periodontal ligament thicknesses: A FEM study. *Indian J Dent Res*. 2012;23(2):213–20.
4. Taylor RM. Variation in form of human teeth: I. An anthropologic and forensic study of maxillary incisors. *J Dent Res*. 1969;48(1):5–16.
5. Bryant RM, Sadowsky PL, Hazelrig JB. Variability in three morphologic features of the permanent maxillary central incisor. *Am J Orthod* [Internet]. 1984;86(1):25–32. Available from: [http://dx.doi.org/10.1016/0002-9416\(84\)90273-2](http://dx.doi.org/10.1016/0002-9416(84)90273-2)
6. Shen Y-W, Hsu J-T, Wang Y-H, Huang H-L, Fuh L-J. The Collum angle of the maxillary central incisors in patients with different types of malocclusion. *J Dent Sci* [Internet]. 2012;7(1):72–6. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jds.2012.01.010>
7. Hohoff A, Wiechmann D, Fillion D, Stamm T, Lippold C, Ehmer U. Evaluation of the parameters underlying the decision by adult patients to opt for lingual therapy: an international comparison. *J Orofac Orthop* [Internet].

2003;64(2):135–44. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s00056-003-0217-7>

8. Bellot C, Ferrer M, Carrasco A, Montiel J, Almerich J. Differences in psychological traits between lingual and labial orthodontic patients: Perfectionism, body image, and the impact of dental esthetics. *Angle Orthod.* 2015;85(1):58–63.
9. Wu AKY, McGrath C, Wong RWK, Wiechmann D, Rabie ABM. A comparison of pain experienced by patients treated with labial and lingual orthodontic appliances. *Eur J Orthod* [Internet]. 2010;32(4):403–7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1093/ejo/cjp117>
10. Long H, Zhou Y, Pyakurel U, Liao L, Jian F, Xue J. Comparison of adverse effects between lingual and labial orthodontic treatment: A systematic review. *Angle Orthod.* 2013;83(6):1066–73
11. Srinivasan B, Kailasam V, Chitharanjan A, Ramalingam A. Relationship between crown-root angulation (collum angle) of maxillary central incisors in Class II, division 2 malocclusion and lower lip line. *Orthod Art Pract Dentofac Enhanc.* 2013;14(1):e66-74
12. Van Loenen M. Anterior tooth morphology and its effect on torque. *Eur J Orthod.* 2005;27(3):258–62
13. Daratsianos N, Bourauel C, Fimmers R, Jäger A, Schwestka-Polly R. In vitro biomechanical analysis of torque capabilities of various 0.018" lingual bracket/wire systems: total torque play and slot size. *Orthod.* 2016;38(5):459–69

14. Lossdörfer S, Bieber C, Schwestka-Polly R, Wiechmann D. Analysis of the torque capacity of a completely customized lingual appliance of the next generation. *Head Face Med.* 2014;10(4).
15. Mascarenhas R, Chatra L, Shenoy S, Husain A, Mathew J, Parveen S. A comparative study of forces in labial and lingual orthodontics using finite element method. *J Indian Orthod Soc.* 2015;49(1).
16. Dalessandri D, Lazzaroni E, Migliorati M, Piancino MG, Tonni I, Bonetti S. Self-ligating fully customized lingual appliance and chair-time reduction: a typodont study followed by a randomized clinical trial. *Eur J Orthod.* 2013;35(6):758–65.
17. Sifakakis I, Pandis N, Makou M, Eliades T, Katsaros C, Bourauel C. A comparative assessment of torque generated by lingual and conventional brackets. *Eur J Orthod.* 2013;35(3):375–80.
18. Baron P, Gualano C. Customized brackets and the straight arch technique combined in one appliance to simplify lingual orthodontics. *J Dentofac Anom Orthod.* 2012;15(1).
19. Huanca Ghislanzoni LT, Lineberger M, Cevidanes LH, Mapelli A, Sforza C, Mcnamara JA. Evaluation of tip and torque on virtual study models: a validation study. *Prog Orthod.* 2013;14(
20. Knösel M, Jung K, Gripp-Rudolph L, Attin T, Attin R, Sadat-Khonsari R. Changes in Incisor Third-Order Inclination Resulting from Vertical Variation in Lingual Bracket Placement. *Angle Orthod.* 2009;79(4):747–54.

21. Cotrim A, Cotrim F, Vellini F, Peron D, Carvalho C, Torres F. Evaluation of Cervico-occlusal Dimensions of Maxillary and Mandibular Incisor Brackets for Lingual Orthodontics. *J Contemp Dent Pract.* 2014;306–11.
22. Takemoto K, Scuzzo G, Lombardo L. Takemoto Y u. i. La technique linguale straight wire. *Int Orthod.* 2009;7(4):335–53.
23. Hadia K. Torque in Lingual Appliance: A Review. *IJSS Case Reports Reviews.* 2016;2(12).
24. McIntyre G, Millett D. Crown-Root Shape of the Permanent Maxillary Central Incisor. *Angle Orthodontist.* 2003;73(6).
25. Melleiro C. Digital technologies and CAD/CAM systems applied to lingual orthodontics: The future is already a reality. *Dental Press J Orthod.* 2003;73(6):22–7.
26. Desai SH, Shinde H. Finite Element Analysis: Basics And It Applications In Dentistry. *Indian Journal of Dental Sciences.* 2012;1(4).
27. Cattaneo PM, Dalstra M, Melsen B. The finite element method: a tool to study orthodontic tooth movement. *J Dent Res [Internet].* 2005;84(5):428–33. Available from: <http://dx.doi.org/10.1177/154405910508400506>
28. Hemanth M, Deoli S, Raghuveer HP, Rani MS, Hegde C, Vedavathi B. Stress induced in periodontal ligament under orthodontic loading (part II): A comparison of linear versus non-linear fem study. *J Int Oral Health.* 2015;7(9):114–8.
29. Papageorgiou SN, Keilig L, Vandevska-Radunovic V, Eliades T, Bourauel C. Torque differences due to the material variation of the orthodontic

- appliance: a finite element study. *Prog Orthod* [Internet]. 2017;18(1):6.
Available from: <http://dx.doi.org/10.1186/s40510-017-0161-5>
30. Arreghini A, Lombardo L, Mollica F, Siciliani G. Torque expression capacity of 0.018 and 0.022 bracket slots by changing archwire material and cross section. *Prog Orthod* [Internet]. 2014;15(1):53. Available from: <http://dx.doi.org/10.1186/s40510-014-0053-x>
31. Oyama K, Motoyoshi M, Hirabayashi M, Hosoi K, Shimizu N. Effects of root morphology on stress distribution at the root apex. *Eur J Orthod* [Internet]. 2007;29(2):113–7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1093/ejo/cjl043>
32. Samandara A, Papageorgiou SN, Ioannidou-Marathiotou I, Kavvadia-Tsatala S, Papadopoulos MA. Evaluation of orthodontically induced external root resorption following orthodontic treatment using cone beam computed tomography (CBCT): a systematic review and meta-analysis. *Eur J Orthod* [Internet]. 2019;41(1):67–79. Available from: <http://dx.doi.org/10.1093/ejo/cjy027>
33. Deng Y, Sun Y, Xu T. Evaluation of root resorption after comprehensive orthodontic treatment using cone beam computed tomography(CBCT): a meta-analysis. *BMC Oral Health*. 2018;18.
34. Fritz U, Diedrich P, Wiechmann D. Apical Root Resorption after Lingual Orthodontic Therapy. *J Orofac Orthop*. 2003;64:434–42.
35. Kong W-D, Ke J-Y, Hu X-Q, Zhang W, Li S-S, Feng Y. Applications of cone-beam computed tomography to assess the effects of labial crown morphologies and collum angles on torque for maxillary anterior teeth. *Am*

- J Orthod Dentofacial Orthop [Internet]. 2016;150(5):789–95. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ajodo.2016.03.029>
36. van Loenen M, Degrieck J, De Pauw G, Dermaut L. Anterior tooth morphology and its effect on torque. Eur J Orthod [Internet]. 2005;27(3):258–62. Available from: <http://dx.doi.org/10.1093/ejo/cji007>
37. Heravi F, Salari S, Tanbakuchi B, Loh S, Amiri M. Effects of crown-root angle on stress distribution in the maxillary central incisors' PDL during application of intrusive and retraction forces: a three-dimensional finite element analysis. Prog Orthod [Internet]. 2013;14(1):26. Available from: <http://dx.doi.org/10.1186/2196-1042-14-26>
38. Choy K, Pae EK, Park Y, Kim KH, Burstone CJ. Effect of root and bone morphology on the stress distribution in the periodontal ligament. Am J Orthod Dentofacial Orthop [Internet]. 2000;117(1):98–105. Available from: [http://dx.doi.org/10.1016/s0889-5406\(00\)70254-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0889-5406(00)70254-x)
39. Ahlbrecht CA, Ruellas AC de O, Paniagua B, Schilling JA, McNamara JA Jr, Cevidanes LHS. Three-dimensional characterization of root morphology for maxillary incisors. PLoS One [Internet]. 2017;12(6):e0178728. Available from: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0178728>
40. Diamond M. aspectos críticos de la colocación de los brackets lingual. J Clin Orthod. 1983;688–91.
41. Pandey H, Pandey L, Agarwal A, Singh G, Singh R. A Finite Element Study On Effects Of Deviated Central Incisor Root Morphology On Stress Distribution At The Root Apex Under Experimental Orthodontic Forces. Indian Journal of Dental Sciences. 2015;(7).

42. Preotrasa CT, Mc CA. Orthodontically induced root resorption correlated with morphological characteristics. *Romanian Journal of Morphology and Embryology*. 2009;50(2):257–62.
43. Becerra DC, Tuesta O, Liñan C. Efectos de la variación del posicionamiento vertical de un bracket lingual sobre la expresión del torque y estrés en el ligamento periodontal en una segunda premolar superior, mediante el método de elementos finitos. Tesis para obtener el grado de maestro en ortodoncia. Lima Perú; 2018.
44. Labh S. Lingual biomechanics, case selection and success. *J Indian Orthod Soc* [Internet]. 2016;50(4_suppl1):10–22. Available from: <http://dx.doi.org/10.4103/0301-5742.198617>

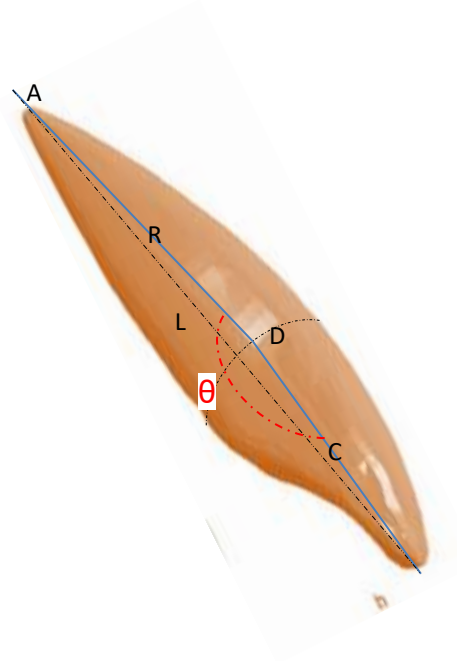
ANEXOS

Operacionalización de variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	indicador	Tipo	Escala de Medición	Valores o Categorías
Ángulo coronal del incisivo superior	Es la inclinación de la corona o de la raíz, formando un ángulo en la intersección del cuello.	Es el ángulo que se obtiene de la intersección del eje longitudinal de la raíz y corona a nivel cervical.	Cortes tomográficos de incisivos centrales superiores	Cualitativo	Nominal	ACR 160° ACR 170° ACR 180°
Posicionamiento vertical de bracket lingual	Cementado de bracket lingual en la cara palatina de un incisivo central superior.	Ubicación de bracket lingual en diferentes puntos de la cara palatina del ICS en sentido vertical	Escaneo de Bracket Lingual STB	Cualitativa	Nominal	1. Incisal: fosa incisal 2. Medio: entre borde incisal y el cingulo 3. Cervical: tangente de la convexidad del cingulo
Torque	Torsión o giro en su eje del incisivo	Inclinación de la raíz hacia vestibular o palatino de acuerdo a la dirección de la fuerza.	FEM.	Cuantitativa	De razón	Grados
Estrés del Ligamento Periodontal	Tensión y presión en el ligamento periodontal por la acción de la fuerza.	fuerza a nivel de los brackets genera estrés en el ligamento periodontal produciendo movimiento radicular	FEM.	Cuantitativa	De razón	MPa

ANEXO N° 01

Ángulo corono radicular del incisivo central superior



θ = ángulo corono radicular formado por la línea R y C

L = eje longitudinal del incisivo. Se define como una línea que pasa por el punto medio del borde incisal al punto de referencia (A) situado en el vértice radiográfico de la raíz.

D = Está situado en el punto medio entre las proyecciones linguales y vestibulares de la unión cemento adamantino.

R = Eje longitudinal de la raíz está representado por una línea que pasa por los puntos de referencia A y D

C = Eje longitudinal de la corona. Es la línea que une el punto incisivo superior (IS) y el punto D.

ANEXO 02

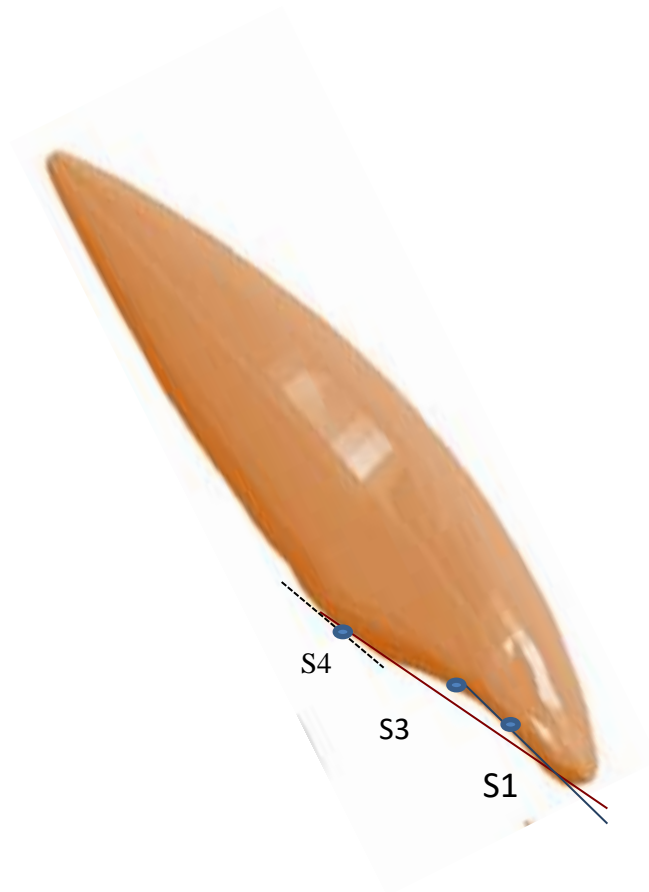
Brackets Linguales STB y su prescripción



ANTERIORES	Torq.	Ang.	O/D
◆ Superiores 3-3 Universal	+55°	0°	0°
◆ Superiores 3-3 Universal, con gancho	+55°	0°	0°
◆ Superiores 3-3 Universal	+40°	0°	0°
◆ Superiores 3-3 Universal, con gancho	+40°	0°	0°
BICÚSPIDES			
Superior/Inferior 4 y 5 Universal	+11°	0°	0°
Superior/Inferior 4 y 5 Universal, con gancho	+11°	0°	0°
Superior/Inferior 4 y 5 Universal	0°	0°	0°
Superior/Inferior 4 y 5 Universal, con gancho	0°	0°	0°
MOLARES			
Superior 6D, con gancho	+10°	0°	+5°
Superior 6I, con gancho	+10°	0°	+5°
Superior 7D, con gancho	+10°	0°	+5°
Superior 7I, con gancho	+10°	0°	+5°
Inferior 6D, con gancho	0°	0°	0°
Inferior 6I, con gancho	0°	0°	0°

ANEXO 03

Posicionamiento de Brackets Linguales



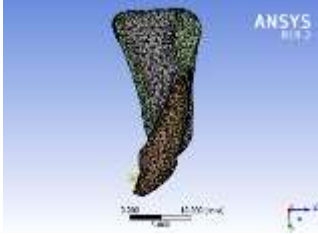


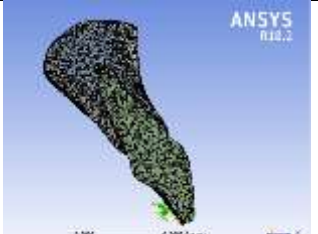
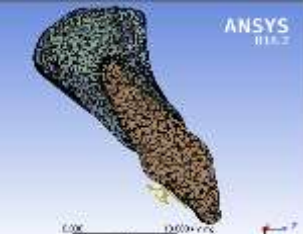
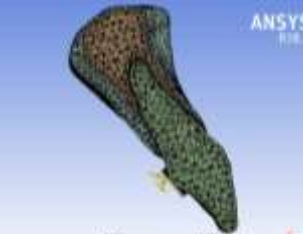
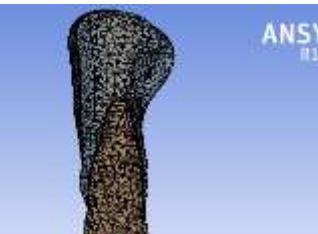


Incisal (S1). Punto medio de la fosa incisal

Medio (S3) Se ubica entre el borde incisal y cíngulo

Cervical (S4) Es la parte más prominente de la convexidad del cíngulo

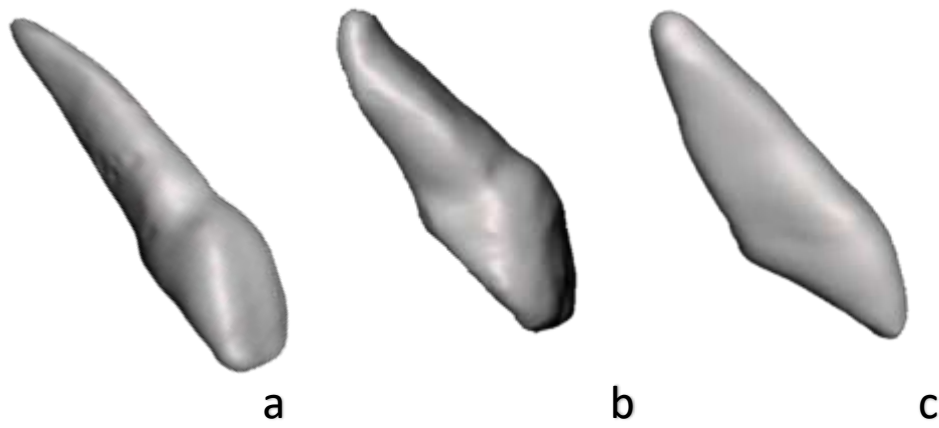
ANEXO 04

Incisivos centrales con ángulo corono radicular de 160°,170°,180° enmallados y posición de bracket lingual en: incisal, medio y cervical

160°/ Incisal	Medio	Cervical
		
170°/ Incisal	Medio	Cervical
		
180°/ Incisal	Medio	Cervical
		

ANEXO 05

Incisivo central con ángulo corono radicular de 160°,170°,180°



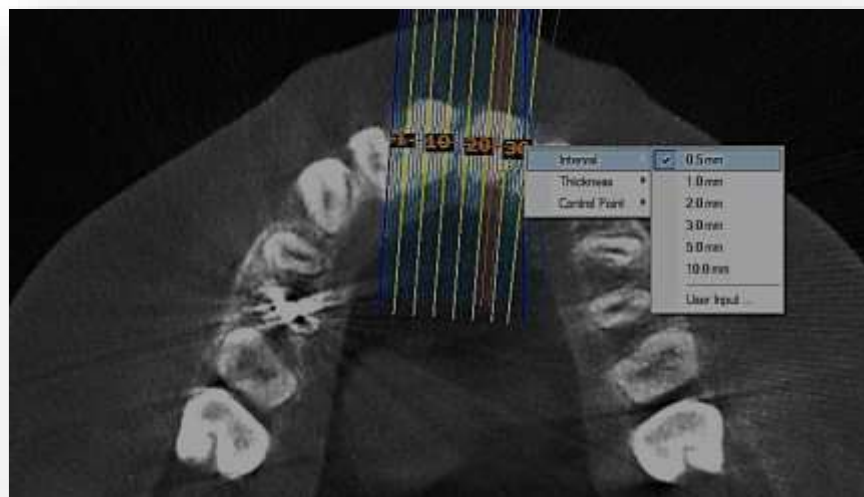
a = Ángulo corono radicular de 160°

b = Ángulo corono radicular de 170°

c = Ángulo corono radicular de 180°

ANEXO 06

Corte tomográfico de un incisivo central derecho



ANEXO. 07

Carta de aceptación para el procesamiento y análisis con elementos finitos.

DEPARTAMENTO DE
INGENIERÍA
SECCIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA



Lima, 29 de mayo de 2017

Mg. Janett Mas López
Directora
Posgrado y Especialización
Facultad de Estomatología
Universidad Peruana Cayetano Heredia
Presente.-

Estimada Mg. Janett Mas:

Ante todo quiero agradecer sus saludos enviados en la carta de presentación del Señor CD Jules Munaylla Ayala y la deferencia que ha tenido Ud. de invitarnos a colaborar con el trabajo de investigación que están realizando en el campo de la ortodoncia.

Mediante el presente documento aceptamos yo Jorge Alencastre Miranda en calidad de asesor y Ernesto Verástegui Nahutz como investigador por parte de la PUCP, en el tema de simulación por el método de los elementos finitos del trabajo de investigación titulado: "Efectos de la variación del posicionamiento vertical de brackets linguales en el incisivo central sobre la expresión de torque y estrés en el ligamento periodontal mediante el método de los elementos finitos". El tiempo aproximado para dicha actividad es de aproximadamente ocho meses a partir de la fecha de inicio.

Saludos Cordiales,



Dr. Ing. Jorge Alencastre Miranda
Profesor Principal
Sección Ingeniería Mecánica- Área de Diseño
Pontificia Universidad Católica del Perú

ANEXO 08

Medición del ángulo corono radicular del incisivo central superior



ángulo corono radicular : 160°



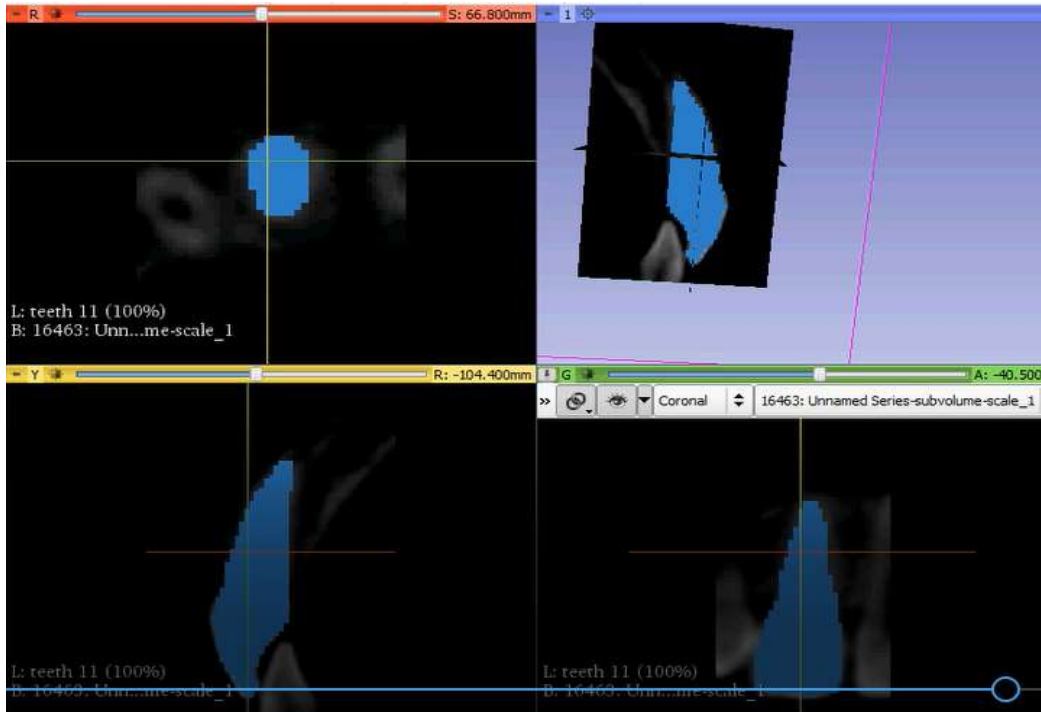
ángulo corono radicular: 170°



Angulo corono radicular: 180°

ANEXO 09

Segmentación del incisivo central superior con el software 3D Slicer vs. 4.6.2

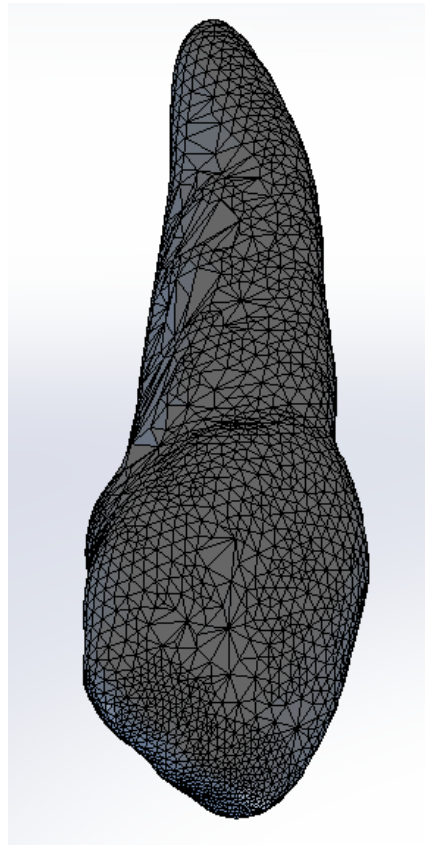


ANEXO 10

Modelo del incisivo central superior en formato STL



a

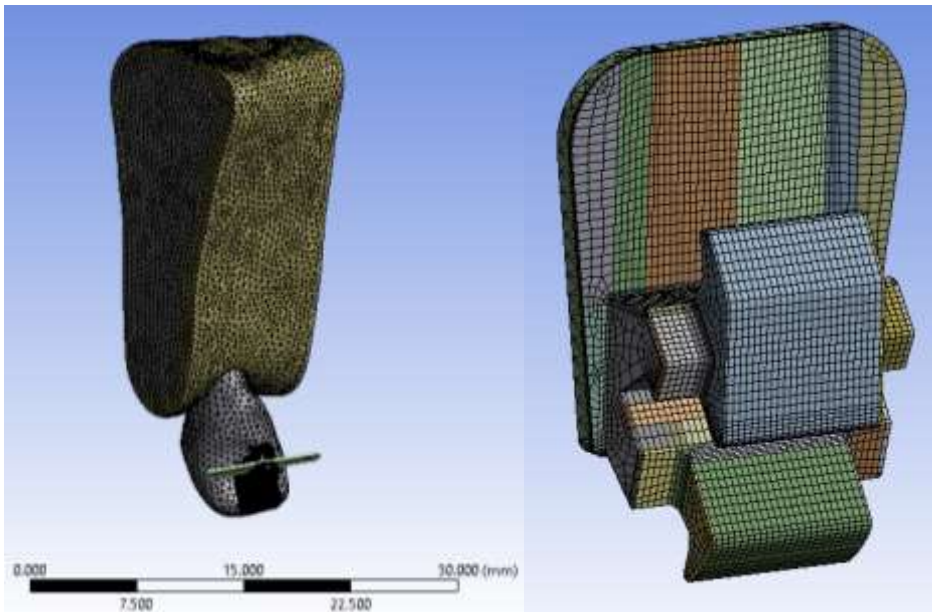
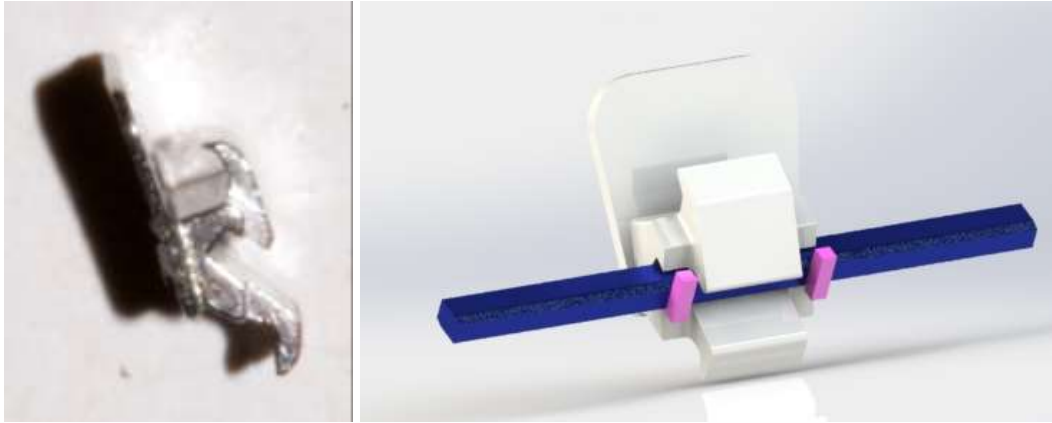


b

- (a) Formato STL
- (b) Modelo geométrico final

ANEXO 11

Esquema de barckets STB, arco 0.016 X0.025 TMA, Ligadura metálica



ANEXO 12

Número de nodos y elementos para cada estructura

	160°			170°			180°		
	Incisal	Medio	Cervical	Incisal	Medio	Cervical	Incisal	Medio	Cervical
Número de nodos	36257 6	36153 6	376235	25264 0	22718 1	234501	35384 5	34722 0	352866
Número de elementos	20142 6	19912 9	202747	11994 0	10988 1	111884	19350 2	19107 0	193281

ANEXO 13

Propiedades mecánicas de las estructuras dentarias, brackets, alambre

	Módulo de Young (MPa)	Módulo de Poisson
Bracket (bilineal)	$E_1=193000, E_2=1800$	0,31
Ligamento Periodontal	0,71	0,4
Hueso cortical	13700	0,3
Hueso trabecular	1600	0,3
Diente	20000	0,3
Resina	8823	0,36
Alambre TMA	62000	0,3

ANEXO 14.

Aprobación de comité de ética - UPCH

CAREG-ORVEI-063-017

Lima, 21 de setiembre del 2017

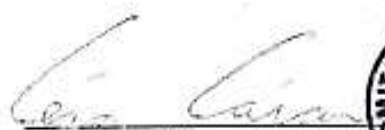
Señor:
MUNAYLLA AYALA, JULES
Presente.-

Estimado Investigador:

Es grato dirigirme a usted para saludarlo y a la vez informarle que hemos recibido el Proyecto de Investigación Titulado: **"Evaluación del torque y estrés del ligamento periodontal según el ángulo corono radicular y posicionamiento vertical de brackets linguales en el incisivo central superior: Método de elementos finitos"**. SIDISI 101424, el cual ha sido revisado y registrado en la Dirección Universitaria de Investigación, Ciencia y Tecnología de la Universidad Peruana Cayetano Heredia. De acuerdo al Manual de Procedimientos de nuestra universidad y por sus características, este proyecto no requiere evaluación por el Comité Institucional de Ética en Humanos o en Animales, pudiendo iniciar su ejecución.

Agradeceremos tenga a bien presentar su informe de cierre al concluir la ejecución de su proyecto.

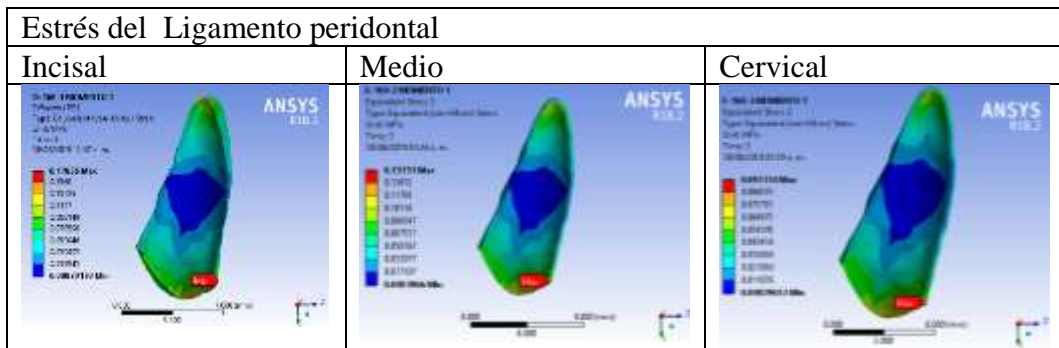
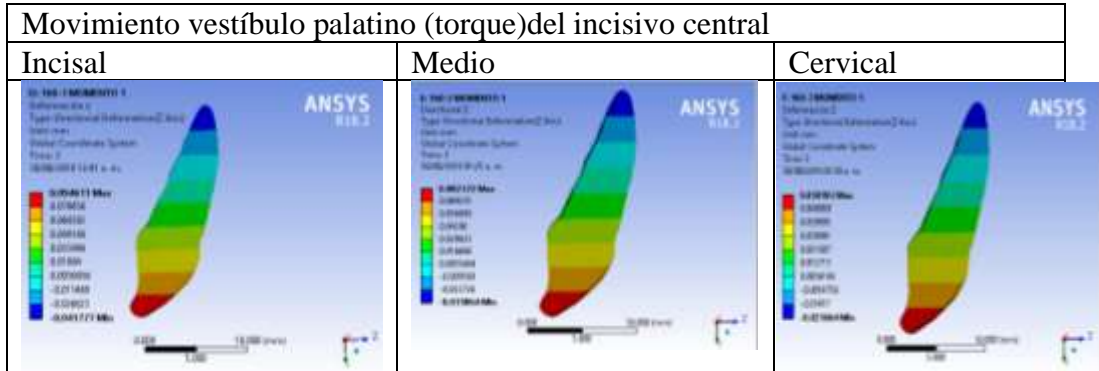
Atentamente,


Dr. César Cárcamo Cavagnaro
Jefe de la Oficina de Promoción
de la Investigación



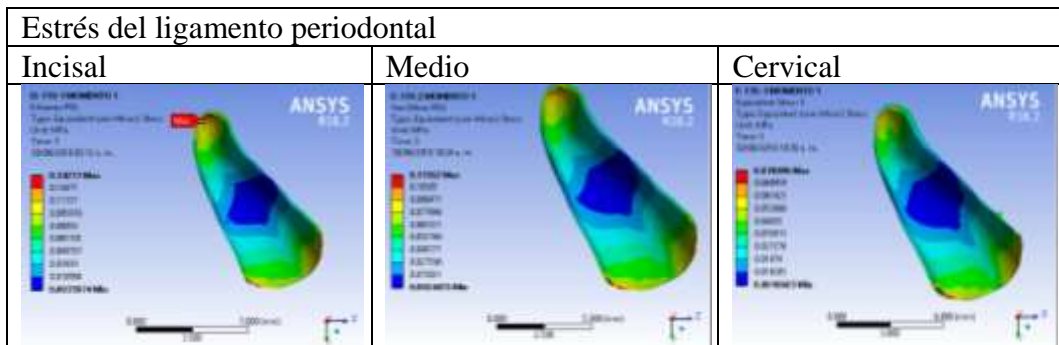
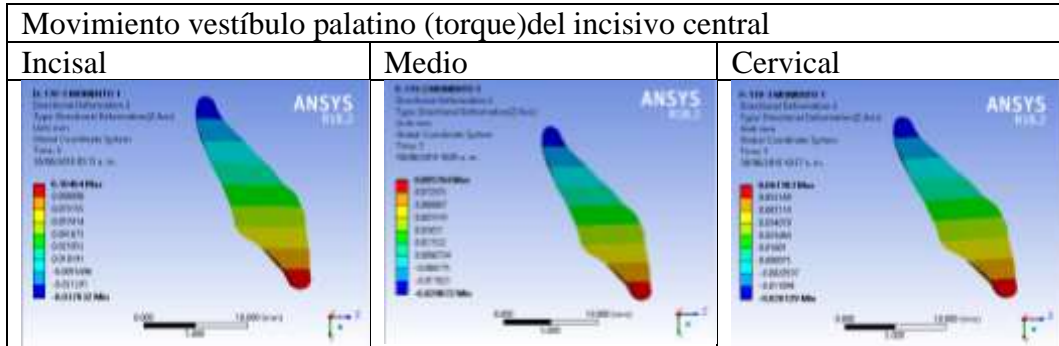
ANEXO 15

Gráfico del movimiento (torque) y el estrés en el ligamento periodontal en el incisivo central superior de 160°



ANEXO 16

Gráfico del movimiento (torque) y el estrés en el ligamento periodontal en el incisivo central superior de 170°



ANEXO 17

Gráfico del movimiento (torque) y el estrés en el ligamento periodontal en el incisivo central superior de 180°

