

**ANÁLISIS EN ELEMENTOS FINITOS DE EFECTOS DENTOALVEOLARES EN
CIERRE DE ESPACIOS CON RETRACCIÓN ANTERIOR ROTH-MBT**

AUTORES

LUISA FERNANDA BERDUGO NAVAIS

JAIME EDUARDO MORENO VALDERRAMA

OSCAR LUIS MONSALVE DE HOYOS

ADRIAN DARIO TORRES SEPULVEDA

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA COLEGIOS DE COLOMBIA

UNICOC

ÁREA DE EDUCACIÓN AVANZADA Y CONTINUADA

POSTGRADO DE ORTODONCIA Y ORTOPEDIA MAXILAR

BOGOTÁ, NOVIEMBRE DE 2025

**ANÁLISIS EN ELEMENTOS FINITOS DE EFECTOS DENTOALVEOLARES EN
CIERRE DE ESPACIOS CON RETRACCIÓN ANTERIOR ROTH-MBT**

AUTORES

LUISA FERNANDA BERDUGO NAVAIS

JAIME EDUARDO MORENO VALDERRAMA

OSCAR LUIS MONSALVE DE HOYOS

ADRIAN DARIO TORRES SEPULVEDA

ASESOR CIENTÍFICO

DR. MARIO DAVID OSORNO

Especialista en Ortodoncia Y Ortopedia Maxilar

ASESOR METODOLÓGICO

DRA.LUZ ANDREA VELANDIA

Especialista en Ortodoncia

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA COLEGIOS DE COLOMBIA

UNICOC

AREA DE EDUCACIÓN AVANZADA Y CONTINUADA.

**POSGRADO DE ORTODONCIA Y ORTOPEDIA MAXILAR.
BOGOTÁ, NOVIEMBRE DE 2025**

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado “**Análisis en elementos finitos de efectos dentoalveolares en cierre de espacios con retracción anterior Roth-MBT**” elaborado por **Luisa Fernanda Berdugo Navais, Jaime Eduardo Moreno Valderrama, Oscar Luis Monsalve de Hoyos y Adrián Darío Torres Sepúlveda** como requisito para optar por el título de especialista en **Ortodoncia y Ortopedia Maxilar**.

La sustentación se llevó a cabo el 27 de noviembre de 2025
acta No.

Dr. Mario Osorno Ortiz

Asesor Científico

Dra. Luz Andrea Velandia

Asesora Metodológica

Dra. Sandra Aguilera Rojas

Director Centro Investigaciones

Directora de Investigación y Gestión

del Conocimiento

Institución Universitaria Colegios de

Colombia - UNICOC

Dr. Camilo Andrés Romo

Director Centro de Investigaciones

DEDICATORIA

Dedicamos esta tesis a Dios por brindarnos la oportunidad de llegar a este momento tan especial de nuestras vidas, por los triunfos y dificultades que nos puso en el camino. A nuestros padres por guiarnos, apoyarnos y ser nuestro motor en la construcción de nuestro proyecto de vida. A los docentes por compartirnos sus enseñanzas, conocimientos y apoyarnos durante el desarrollo de nuestra formación; en especial a nuestros asesores Mario Osorno Ortiz y Luz Andrea Velandia Palacio por su constante dedicación, compromiso, acompañamiento y motivación para poder llevar a cabo este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Doctores; sin ustedes, su apoyo, paciencia y constancia, esta investigación no hubiese sido posible, sus consejos fueron útiles cuando no encontrábamos como expresar lo que pensábamos; con su profesionalismo y dedicación nos llenaron de fuerza para culminar este proceso, aun cuando sentíamos que las cosas no estaban saliendo bien.

Gracias a nuestros padres, quienes nos impulsaron a creer en este proyecto, por estar siempre presentes en esos días y noches de trabajo constante, hoy al finalizar esta investigación, les dedicamos este nuevo logro en nuestras vidas. Damos gracias a Dios por darnos los mejores padres y por siempre creer en nosotros.

Introducción	13
1. ASPECTOS TEÓRICO-CIENTÍFICOS.....	16
1.1 Planteamiento del problema.....	16
1.2 Justificación.....	17
1.3 Propósito.....	20
1.4. Antecedentes.....	21
1.5 Marco teórico.....	24
1.5.1 Biología del movimiento.....	24
1.5.2 Cierre de espacios.....	24
1.5.3 Retroinclinación de la corona clínica.....	25
1.5.5 Activación del arco DKL.....	27
1.5.6 Errores de activación del arco DKL.....	28
1.5.6 Maloclusión clase II.....	29
1.5.7 MBT	31
1.5.8 Elementos finitos.....	31
1.5.9 Aplicaciones del método de los elementos finitos en ortodoncia	32
1.5.10 Movimiento dental ortodóntico	33
1.5.11 Anclaje ortodóntico	34
1.5.12 Barra transpalatina.....	36
1.6 Objetivos generales y específicos.....	37
2. ASPECTOS METODOLÓGICOS.....	38

2.1. Tipo de estudio.	38
2.2. Objeto de estudio.	38
2.3. Material objetivo de estudio.	38
2.4. Unidad de observación.	39
2.5 Muestra.	43
2.6 Criterios de selección.	43
2.7 Procedimiento.....	44
2.8. Aspectos éticos	50
3. RESULTADOS.	52
4. DISCUSIÓN.....	54
5. CONCLUSIONES.....	57
6. RECOMENDACIONES.....	58
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	59
ANEXOS.....	67
TABLAS.	67
FIGURAS.	71
ABREVIATURAS.	82

TABLAS ESPECIALES

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Módulo de Young y Coeficiente de Poisson de las estructuras.

Tabla 2. Rotación de canino en técnica MBT Y Roth.

Tabla 3. Valores de inclinación dental técnica MBT.

Tabla 4. Valores de inclinación técnica Roth.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelamiento de geometrías.

Figura 2. Esfuerzo de hueso cortical y trabecular en primer molar superior derecho.

Figura 3. Deformación DKL.

Figura 4. Deformación Roth.

Figura 5. Hueso trabecular 16 Roth.

Figura 6. Esfuerzo-deformación hueso trabecular y cortical diente 16.

Figura 7. Hueso cortical diente 16 Roth.

Figura 8. Hueso trabecular diente 16 MBT.

Figura 9. Hueso cortical diente 16 MBT.

Figura 10. Inclinación MBT

Figura 11. Inclinación ROTH

GLOSARIO

- **FEM:** El método de elementos finitos (MEF o FEM, por sus siglas en inglés) es una técnica numérica utilizada para aproximar la solución de ecuaciones diferenciales parciales (EDP) que modelan fenómenos físicos en ingeniería, física y matemáticas aplicadas. Tiene una amplia aplicación en biología y bioingeniería.
- **Deformación:** se refiere al cambio en la forma o tamaño de un cuerpo debido a la aplicación de fuerzas externas (esfuerzos) o cambios térmicos.
- **Esfuerzo:** es una medida de la fuerza interna que experimenta un material por unidad de área cuando se aplica una carga externa.
- **MBT:** La técnica MBT (abreviatura de McLaughlin-Bennett-Trevisi) es un sistema de ortodoncia que fue desarrollado por los doctores Richard McLaughlin, John Bennett y Claudio Trevisi. Este enfoque se basa en una serie de principios biomecánicos para lograr una alineación dental eficiente y predecible, optimizando los movimientos de los dientes durante el tratamiento ortodóntico.
- **Tieback:** Es un término incluido en la técnica MBT. Este sistema se caracteriza por el uso de Brackets, pines, módulos elásticos y alambres específicos. El tieback es un método de sujeción que se usa para "tirar hacia atrás" ciertos dientes durante las biomecánicas de movimiento dental.
- **Torque:** el torque se refiere a la inclinación de los dientes en el plano vertical. Es un término utilizado para describir cómo se mueve un diente hacia adelante

o hacia atrás en su eje longitudinal. Este movimiento es esencial para lograr una alineación correcta de los dientes y una oclusión adecuada.

- **Anclaje:** se refiere a la resistencia al movimiento de los dientes durante el tratamiento ortodóntico. Es un principio clave que se utiliza para controlar y dirigir el movimiento de los dientes de manera eficiente.
- **Rotación:** Se refiere al movimiento de un diente alrededor de su eje longitudinal. Es un tipo específico de movimiento dental en el cual el diente gira sobre sí mismo.
- **Roth:** La Técnica Roth se usa en ortodoncia, basada en un sistema de Brackets y alambres específicos para corregir eficazmente la alineación dental. La técnica la desarrolló el ortodoncista Dr. Robert Ricketts y perfeccionó el Dr. Larry Andrews y otros. La técnica se ha convertido en una de las técnicas de ortodoncia predecibles y ampliamente utilizadas en todo el campo de la ortodoncia.
- **DKL:** (Distal Key Loop) Arco de acero inoxidable tiene dos ansas de cada lado que, como se mencionó anteriormente, se utiliza para realizar movimientos sagitales de los sectores anteriores y/o posteriores, con el objeto de cerrar los espacios creados por las extracciones.
- **Cierre de espacios:** Se refiere al proceso de cerrar los espacios vacíos que existen entre los dientes. Estos espacios se deben a diversas razones, como dientes faltantes, discrepancias en el tamaño de los dientes, o afecciones; como

la maloclusión, pérdida de dientes temporales o la falta de desarrollo de ciertos dientes permanentes y espacios pos- exodoncia.

- **Ligadura Metálica:** Mecanismo utilizado para fijar el arco al Brackets. Puede ser metálica (ligadura de alambre) o elástica. La ligadura influye en la fricción entre el arco y el Brackets, lo cual afecta la expresión del torque, el desplazamiento dental y la eficiencia del tratamiento.

Introducción

La extracción de los primeros premolares superiores y/o inferiores se ha empleado tradicionalmente para el camuflaje ortodóncico de pacientes con discrepancias maxilo-mandibulares, apiñamientos de moderado a severo, o en casos de proinclinación de incisivos, con el fin de compensar la maloclusión y corregir la protrusión de incisivos superiores. Sin embargo, la mecánica de cierre de espacios post-exodoncia puede generar efectos secundarios no deseados, como pérdida de anclaje y alteraciones en la inclinación de los incisivos, lo que enfatiza la necesidad de estrategias biomecánicas precisas para optimizar los resultados clínicos ¹ Con este fin, se han diseñado diversos sistemas de Brackets con diferentes prescripciones para lograr el torque más adecuado en los incisivos superiores, dentro de los sistemas más utilizados se encuentra Roth y MBT. En los casos de compensaciones de pacientes Clases II-1 se indican generalmente extracciones de primeros premolares y cierres de espacio con retracción anterior para lograr la corrección del overjet aumentado y de la maloclusión ².

Para estos cierres de espacio, MBT, indica el uso de 3 sistemas (Tieback) donde se emplean pines soldados en arcos de acero y ligaduras activas con módulos elastómericos, que dan la fuerza necesaria para la retracción en masa anterior ³. Dentro de este sistema, el uso de anclaje se hace necesario para lograr el éxito del tratamiento y cumplir con los objetivos faciales y de retracción anterior, sin embargo, la pérdida de anclaje impide muchas veces cumplir con los objetivos terapéuticos,

es por eso necesario el uso de aditamentos, entre ellos, la barra transpalatina que permiten generar un refuerzo en molares contrarrestando la fuerza anterior ⁴.

Por otra parte, en técnica Roth mediante el uso de arco DKL, en combinación con la barra transpalatina (TPA), ha sido propuesto como un mecanismo de anclaje que permite un control más eficiente del movimiento dentario durante el cierre de espacio. Mientras que el arco DKL facilita la aplicación de fuerzas controladas para la retracción de los incisivos, la barra transpalatina contribuye a la estabilización de los molares, minimizando su desplazamiento mesial ⁵.

Durante esta retracción en masa es necesario una ubicación ideal de los incisivos para cumplir con los objetivos del tratamiento, siendo una característica importante en la estabilidad post tratamiento, la armonía, la estética y función masticatoria ⁶. Sin embargo, la distribución de las tensiones y esfuerzos sobre el complejo dentoalveolar requieren un análisis detallado para determinar los efectos producidos por ambos sistemas y adicionalmente determinar las posibles limitaciones o efectos secundarios presentes en ambas técnicas de manera tal que permita optimizar su aplicación clínica y la selección de la técnica más apropiada para cada caso.

Estas mecánicas de cierres de espacio tienen efectos dentoalveolares que no son fácilmente medibles clínicamente, el uso de método de elementos finitos (FEM) se ha consolidado como una herramienta fundamental para el estudio de la biomecánica ortodóncica, ya que permite evaluar con precisión la distribución de

fuerzas y desplazamientos inducidos en los tejidos dentoalveolares. A diferencia de los estudios clínicos convencionales, el FEM proporciona un análisis tridimensional detallado de las fuerzas aplicadas y sus efectos en la estructura ósea y periodontal, lo que facilita la elección de la técnica más apropiada, así como de los protocolos de tratamiento ⁷.

Por lo tanto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar los efectos dentoalveolares de los sistemas ROTH y MBT en el cierre de espacios usando anclaje con barra transpalatina en el movimiento de dientes anteriores mediante el método de elementos finitos. Se espera que los hallazgos de esta investigación contribuyan al desarrollo de estrategias biomecánicas más eficientes, mejorando la predictibilidad y estabilidad de los resultados ortodóncicos en este tipo de maloclusión. Este estudio se realizó en UNICOC en el posgrado de Ortodoncia y Ortopedia Maxilar de donde se tomó una tomografía del archivo de historias clínicas, se realizó un modelado de los diferentes aditamentos (Brackets, barra transpalatina, pin soldado, arco de acero 0,17x0,25 y arco DKL) usados para cada técnica, además de la reconstrucción anatómica del maxilar superior, dientes, huesos y ligamentos, definiendo 2 modelos para el estudio. Posteriormente, cada modelo por separado se importó al programa Ansys Workbench, donde se dio inicio con la simulación.

1. Aspectos teórico-científicos.

1.1 Planteamiento del problema.

La retracción de los incisivos para cierre de espacio pos-extracción es uno de los objetivos principales en la mayoría de los pacientes de ortodoncia específicamente en aquellos que presentan proinclinación dentoalveolar bimaxilar de Clase I o maloclusiones de Clase II división 1 ⁸.

Desde que se desarrolló el aparato de alambre recto Andrews, se han desarrollado y modificado muchas prescripciones y técnicas de Brackets, todos estos avances apuntan hacia un objetivo final, el cual es crear un sistema de fuerza que puede trabajar eficientemente y acortar el período de tratamiento de ortodoncia ⁹. El uso de arco recto Double key loop (DKL) en técnica Roth es una de estas opciones de tratamiento ortodóntica en casos de extracción. El arco DKL es un arco de acero con dos llaves por hemiarcada que se usa para hacer movimientos sagitales de los sectores anteriores y/o posteriores, este arco parece controlar bien los grupos de dientes involucrados ¹⁰.

Otra de las técnicas más empleadas, es la técnica MBT la cual ha sido ampliamente utilizada por su versatilidad biomecánica, pero estudios recientes muestran que puede presentar limitaciones en el control de torque y tip durante la retracción en masa, especialmente en combinación con mecánicas de deslizamiento ¹¹. Dentro de estas mecánicas, el uso de barra transpalatina como elementos de anclaje se ha implementado para contrarrestar las fuerzas recíprocas, buscando evitar el movimiento mesial de los molares y mantener el control del segmento anterior ^{12 13}.

Sin embargo, las investigaciones en la relación entre el tieback en técnica MBT y Barra transpalatina es limitada, Algunos autores como Sebastián et al. y Mohammed et al. reportan variaciones significativas en los resultados dependiendo del tipo de fuerza utilizada, del sistema de Brackets y de la prescripción empleada, lo cual pone de manifiesto la necesidad de evaluar con mayor precisión estas variables desde una perspectiva biomecánica cuantificable ¹⁴.

Dadas las posibles limitaciones tanto en técnica MBT como Roth a la hora de realizar retracción anterior en casos de Clase II-1, es necesario identificar los efectos dentoalveolares en los cierres de espacios con el fin de establecer la mejor selección de técnicas de acuerdo con el caso y a los efectos observados. Clínicamente estos efectos no son fácilmente detectables, el método de FEM permite establecer con mayor precisión dichos efectos y lograr una mejor observación de las ventajas y desventajas entre ambas técnicas.

1.2 Justificación.

Dada la problemática previamente presentada y acorde a los objetivos mencionados, la salud y bienestar de los pacientes es prioridad y es componente esencial dentro de la formación de los futuros Ortodoncistas.

Si bien es cierto dentro de los estudios locales y nacionales existen descripciones de los efectos de los movimientos ortodóncicos que integran diversas variables alusivas a las características de cierre de espacios de hecho grandes

investigaciones existentes se ha enfocado dentro de la ortodoncia a temas muy limitados sobre los movimientos, por lo que la presente investigación podría otorgar el punto de partida aportando datos basales en relación a los efectos sobre movimiento dental ortodóntico en cierre de espacios ¹⁵.

Debido a que en el movimiento de los dientes se usa una técnica ortodóncica donde se aplican fuerzas y se provoca un proceso de remodelación ósea entre el ligamento periodontal y hueso alveolar, que se usa para cerrar espacios en caso de extracciones dentales o cuando se requiere modificar la posición de los dientes en el maxilar superior o inferior. Estas técnicas se basan en la aplicación de fuerzas ligeras y controladas para lograr el movimiento dental necesario ¹⁵.

La extracción de los primeros premolares superiores y/o inferiores se ha empleado tradicionalmente para el camuflaje ortodóncico de pacientes con protrusión de incisivos dentoalveolar y maloclusiones Clase II División 1 ¹⁶.

Se hace necesario una ubicación ideal de los incisivos para cumplir con los objetivos del tratamiento, ya que durante el cierre de espacio la posición de los incisivos superiores e inferiores y sus huesos de soporte es una importante característica en la estabilidad post tratamiento, la armonía y equilibrio del perfil facial, además de la estética y función masticatoria. Los incisivos superiores juegan un papel importante ya que proporcionan la pendiente de guía anterior durante el movimiento de protrusión de la mandíbula. La posición y la inclinación axial de la parte superior y los incisivos inferiores también son factores importantes para determinar estética facial ⁶. La posición dental va a repercutir en los tejidos blandos, por lo tanto, esta

posición dentaria, luego del tratamiento de ortodoncia debería conseguir una armonía en el perfil facial del paciente ¹⁷.

La pérdida del torque es un aspecto importante que surge de la retracción de los incisivos. Es esencial mantener el torque durante este proceso, y el punto de aplicación de la fuerza desempeña un papel crucial en ello. Se han diseñado diversos sistemas de brackets con diferentes ajustes para lograr el torque más adecuado en los incisivos superiores ¹¹.

El sistema DKL se caracteriza por aplicar fuerzas ligeras y controladas sobre los dientes, lo que minimiza el riesgo de lesionar los tejidos circundantes. Esto es especialmente importante en el cierre de espacios, ya que evita la reabsorción excesiva de hueso alveolar y el colapso de las encías entre los dientes, lo que contribuye a mantener la salud periodontal durante y después del tratamiento. Al aplicar fuerzas controladas, el DKL disminuye la probabilidad de efectos secundarios no deseados, como la inclinación de dicho objetivo en este trabajo. Esto es particularmente relevante en el cierre de espacios, donde se busca mantener una alineación adecuada de los dientes y una relación ideal entre las arcadas dentales ⁵.

En las técnicas con "mecánica de deslizamiento", que consiste en vencer la fuerza de fricción estática y desplazar el alambre a lo largo de Brackets y tubo, es el método más utilizado para el cierre de espacios por extracciones en este tipo de mecánicas se emplean resortes metálicos, cadenas elastoméricas, generando un momento en el diente que causa una inclinación inicial de la corona y más tarde el

enderezamiento de la raíz, sin embargo la mecánica con fricción también presenta desventajas como una más alta probabilidad de generar inflexión dental y la fricción en la interface bracket-alambre-ligadura ¹⁸. En la mecánica de deslizamiento durante la retracción dental anterior se han analizado diferentes aspectos como el centro de resistencia de los incisivos superiores, el centro de resistencia del segmento del arco anterior, la cantidad de fuerza de retracción, la fricción y la rigidez a la flexión del arco. Sin embargo, aún no se comprende por completo cómo afectan los sistemas de Brackets y arcos de alambre al movimiento de los dientes anteriores en la mecánica de deslizamiento, dentro de estos sistemas encontramos MBT ¹¹.

1.3 Propósito.

Esta investigación tiene como propósito servir como ayuda para evaluar los efectos del uso de Tieback (retro ligadura) y DKL, en conjunto con barra transpalatina en técnica MBT y Roth para cierre de espacios en dientes antero- superiores. Además de adquirir conocimientos que mejore la capacitación y aporte un nuevo conocimiento tanto a los residentes del posgrado de Ortodoncia y Ortopedia maxilar de la Institución universitaria colegios de Colombia como a ortodoncistas dentro de su práctica profesional. Así como a pacientes donde la necesidad de extracción de premolares sea indicativa para el éxito del tratamiento.

Desde el punto de vista clínico, busca determinar el efecto dentoalveolar referente la inclinación en grados de este cierre en el sector anterosuperior, además de los efectos a nivel del área de anclaje. Todo esto en pro de unos resultados estéticos y funcionales, cumpliendo con los objetivos terapéuticos.

Finalmente, servirá como marco de referencia a nuevas investigaciones relacionadas al tema que se encarguen de profundizar en los efectos biomecánicos, y en la determinación para la utilización de una mecánica u otra dentro de la práctica clínica.

1.4. Antecedentes.

Andrews realizó mediciones exhaustivas en oclusión tratadas y no tratadas. Determinó los ángulos promedio de punta y torque, así como las dimensiones de adentro hacia afuera de la superficie vestibular de cada diente en relación con el plano de un arco labial. Estas dimensiones, que representan los objetivos de las posiciones individuales de los dientes, se utilizaron para fabricar Brackets para cada diente. Cuando cada Brackets se colocó con precisión en el punto medio del eje facial y se alineó con dicho eje, se convirtieron en el aparato de alambre recto. Este, en efecto, orienta la ranura del arco de alambre para una punta, torque y ángulo de rotación específicos, además de la altura y las dimensiones de adentro hacia afuera, con respecto a la superficie vestibular de cada diente ³. La experiencia con la "prescripción" de Andrews ha demostrado que estos objetivos de las posiciones individuales de los dientes no siempre se lograban solo con alambres rectos, y era necesario doblar el arco de alambre para lograr resultados óptimos. Debido a esto comienza la proliferación de dispositivos preajustados o "prescripciones" como Roth y MBT ³.

Roth, después de sus primeros años de experiencia con el aparato de arco recto, introdujo variaciones para solventar las limitaciones que encontraba en la práctica

clínica diaria. Mientras Andrews, con la primera generación de brackets preajustados estaba recomendando una amplia gama de brackets, Roth deseaba evitar las dificultades de inventario que provocaba un sistema con múltiples brackets. Por tanto, recomendó un solo juego de brackets de extracciones que él creía que le permitiría controlar tanto los casos con extracciones como los de sin ellas ¹⁰.

Esta ha sido descrita como la segunda generación de brackets preajustadas. Las recomendaciones de Roth fueron ampliamente aceptadas por los clínicos, algunos de los cuales también habían experimentado dificultades similares con la mecánica de tratamiento y estaban confundidos con la amplia gama de brackets disponibles. Las prescripciones de los aparatos desarrolladas por Andrews y Roth se basaban en el conjunto de mecánicas de tratamiento que utilizaban en sus clínicas ³.

El planteamiento de tratamiento de Roth hacía hincapié en el uso de articuladores para los registros diagnósticos, la construcción de férulas iniciales y de posicionadores gnatólogicos al final del tratamiento. Este planteamiento se utilizaba como ayuda para establecer la posición correcta del cóndilo. Utilizaba formas de arcada más anchas que las de Andrews para evitar dañar las cúspides de los caninos durante el tratamiento y para facilitar la obtención de una buena función protrusiva ¹⁰.

Una vez establecido un enfoque general y un sistema eficaz de mecánica de tratamiento con el sistema de Brackets preajustadas estándar, McLaughlin y Bennett trabajaron con Trevisi para rediseñar completamente el sistema de brackets

para complementar su probada filosofía de tratamiento y superar las limitaciones del aparato de arco recto original. Revisaron los hallazgos de Andrews y tuvieron en cuenta investigaciones adicionales de origen japonés para diseñar el sistema de Brackets MBT, convirtiéndose en la tercera generación de Brackets preajustados ³. Los valores de las inclinaciones del aparato de arco recto original eran mayores que los de los hallazgos en investigaciones. Se había añadido más Tip, por encima de las medias presentes en la investigación. Por ejemplo, el canino superior tenía 11° de inclinación en la primera generación (aparato de arco recto) y 13° en el sistema de segunda generación (Roth), comparados con los 8° de MBT. Por lo que, dentro de la técnica, se hace una reducción del Tip de cada Brackets en comparación con Roth. Por contra parte, el torque de MBT, desde Andrews, aumento los valores a nivel de incisivos y molares, en relación con las anteriores técnicas, para poder conseguir los objetivos con el menor doblez de alambre ^{3 10}

1.5 Marco teórico.

1.5.1 Biología del movimiento.

El movimiento de los dientes a través del complejo dentoalveolar es una secuencia sinérgica de fenómenos físicos y biológicos del tejido. Biológicamente, el concepto de movimiento dental comprende tres fases: primero, presión y tensión en el ligamento periodontal que originan alteraciones del flujo sanguíneo, segundo formación o liberación de mediadores químicos y tercero, activación celular ¹⁶. Inicialmente, durante la aplicación de fuerza ortodóncica se produce la remodelación del ligamento periodontal (LPD) y del hueso alveolar alrededor del diente. La tensión en la matriz del PDL y el hueso alveolar inmediatamente después de la aplicación de fuerza, resulta en un flujo de líquido en ambos tejidos. Como resultado de la tensión de la matriz y el flujo de líquido, las células se deforman, y en respuesta a la deformación, se activan los fibroblastos y osteoblastos del PDL, así como los osteocitos del hueso, produciendo una combinación de remodelación del PDL y aposición localizada y resorción del hueso alveolar, permitiendo que el diente se mueva ¹⁹. Este sistema biológico del diente reacciona a la variación en la magnitud de la fuerza, el tiempo de aplicación y la direccionalidad a través de células receptoras y cascadas de señalización que, en última instancia, producen el movimiento dental ortodóncico importante para el éxito del tratamiento dental ²⁰.

1.5.2 Cierre de espacios.

Se refiere al proceso de cerrar los espacios vacíos que existen entre los dientes. Estos espacios se deben a diversas razones, como dientes faltantes, discrepancias en el tamaño de los dientes, o afecciones; como la maloclusión, pérdida de dientes

temporales o la falta de desarrollo de ciertos dientes permanentes y espacios pos-exodoncia. El cierre de espacios es una parte esencial de muchos tratamientos ortodóncicos y puede ser necesario para lograr una oclusión adecuada y una mejor estética dental ¹⁸.

1.5.3 Retroinclinación de la corona clínica.

la retroinclinación de la corona clínica es definida como el movimiento hacia palatino de esa corona clínica esta es una consecuencia no deseada de los tratamientos ortodóncicos generando implicaciones negativas en la funcionalidad y estética dental del paciente. Para hablar de retroinclinación de la corona clínica es necesario definir el torque coronario, este está medido en grados entre una perpendicular al plano de Andrews (es la superficie o plano sobre el cual caerá el plano medio transversal de cada corona en un arco cuando los dientes estén en la posición óptima), por el punto EM (punto medio del eje mayor de la corona clínica) y una tangente a la cara vestibular del diente que, pasando por el mismo punto, tiene sus extremos a igual distancia de la porción incisal y gingival de la corona ¹⁰

La tangente que pasa por el centro del eje mayor de las coronas clínicas de los incisivos centrales y laterales superiores tiene una inclinación desde gingival y palatino hacia incisal y vestibular (torque positivo).

En los demás dientes del maxilar superior y en todos los del maxilar inferior, la tangente va desde vestibular y gingival hacia incisal (u oclusal) y lingual. Esto es denominado torque negativo ¹⁰.

1.5.4 Arco DKL

El arco DKL (Double Key Loop) es un tipo de arco utilizado en ortodoncia. Fue desarrollado por los ortodoncistas alemanes Dr. Derichs, Dr. Klusmeier y Dr. Linewise, y se utiliza principalmente en el tratamiento de pacientes con maloclusión de Clase II, que se caracteriza por una relación incorrecta entre los dientes superiores e inferiores, como una sobremordida excesiva o una retrusión de los dientes inferiores en relación con los superiores ²¹.

Es un arco de acero inoxidable que tiene dos ansas de cada lado que, como se mencionó anteriormente, se utiliza para realizar movimientos sagitales de los sectores anteriores y/o posteriores, con el objeto de cerrar los espacios creados por las extracciones. Realiza una gran variedad de movimientos con muy buen control de los grupos dentarios involucrados. Si bien se puede confeccionar, se dispone de arcos DKL preformados en diferentes calibres de alambre de acero. A cada lado, a la altura de los caninos, lleva dos ansas en forma de ojo de cerradura. Cuando este arco está instalado, estas ansas deben estar equidistantes por mesial y distal del Brackets de cada canino ¹⁰

El mercado provee arcos DKL preformados en varias dimensiones, adecuados para los diferentes tamaños de arcada. La escala de numeración es en milímetros y mide la distancia existente entre ambas ansas mesiales con una diferencia de 2 mm entre cada una de las medidas. Estas ansas tienen entre sí una separación de 8 mm. Este espacio permite la inserción en la ranura del canino de la porción de arco situada entre ellas, dejando aproximadamente 2 mm a cada lado del Brackets. En algunos

casos, dada la estandarización de los tamaños, no es posible lograr la equidistancia entre brackets y ansas. Se deberá entonces tener la precaución de que el tamaño elegido permita que el ansa mesial quede separada del bracket del canino por no menos de 2 mm, para que sea posible su activación. El arco DKL se dimensiona en mm, tomando la distancia entre las ansas mesiales, que va desde 22mm hasta 46mm ¹⁰

1.5.5 Activación del arco DKL

La activación consiste en abrir las ansas ya sea traccionando y doblando el arco por distal de los molares, o a través de una ligadura metálica.

Activando el arco mediante una ligadura metálica que va desde el gancho del tubo vestibular del molar hasta el ansa distal del DKL. Se abren las ansas con una pinza de Weingardt y se consolida esta activación con la ligadura metálica. El arco DKL no se dobla por distal del molar. La diferencia fundamental entre esta forma de activación y la que se realiza con tracción distal consiste en la posición que asume el sector anterior del arco. La tracción realizada por la ligadura en el ángulo disto gingival del ansa distal provoca una inclinación distal del mismo y con ello la inclinación hacia gingival del sector anterior del DKL con el consiguiente aumento del torque positivo ¹⁰.

Ventajas

- Mejora la capacidad de recuperación del torque en los incisivos superiores
- Evita la extrusión del sector anterior

- Moviliza el canino hacia distal minimizando el efecto de retroinclinación coronal anterior
- Reduce el efecto de intrusión en el sector lateral y mantiene nivelado el plano oclusal
- Cuando es necesario una retracción de gran magnitud la activación con retro ligadura es la más apropiada ¹⁰.

1.5.6 Errores de activación del arco DKL

Los errores en la activación se producen por exceso: Se entiende una exagerada apertura de las ansas del arco o bien una exagerada frecuencia de activación. Ambas provocan retro inclinaciones muy marcadas del sector anterior que luego ofrecen una mayor resistencia a la recuperación del torque. Como resultado de esto se produce un descontrol del movimiento dentario y la pérdida de los objetivos del tratamiento ¹⁰

La activación de un arco DKL provoca en un primer tiempo una inclinación distal de los caninos y una retroinclinación de los incisivos, para en un segundo tiempo recuperar la verticalidad de los caninos y el torque de los incisivos.

Estos diferentes tipos de movimientos realizados por el DKL requieren un tiempo prolongado para manifestarse. El clínico debe tener precaución en la cantidad de activación de las llaves del DKL, que debe ser muy moderada para evitar una inclinación de la corona del canino hacia distal que afectaría a la parte anterior de la arcada provocando una extrusión de los incisivos.

Por esta razón la activación no debe superar el milímetro en cada llave. Por otra parte, la activación demasiado frecuente del arco DKL no permite que el canino recupere la inclinación normal y dificulta la recuperación del torque de los incisivos. Esta sobre activación provoca un aumento de la sobremordida por extrusión de los incisivos ¹⁰.

Además, otros errores como en la sincronización del cierre de los espacios cuando se están retrayendo ambas arcadas, el operador debe hacer esta maniobra en forma coordinada. Error en el control vertical anterior, pretender retruir la arcada superior sin haber solucionado con antelación algún problema vertical de los incisivos superiores o inferiores¹⁰.

1.5.6 Maloclusión clase II

La Clase II también llamada distoclusión (Angle), se refiere a la maloclusión o la relación distal del maxilar inferior respecto al superior, la cual puede resultar de un maxilar superior prognático, una mandíbula retrognática o la combinación de las 2 anteriores, en cuanto a los factores etiológicos relevantes de las maloclusiones Clase II se encuentran: Características Genéticas , raciales y familiares, factores ambientales: los hábitos como son la succión digital, empuje lingual, succión labial y la respiración oral, las lesiones cariosas como resultantes de la pérdida prematura de dientes primarios, erupción precoz de los dientes permanentes y movimiento mesial de los mismos ¹.

Teniendo en cuenta las características faciales, esqueléticas, dentales intra e Inter arco y funcionales que acompañan las maloclusiones Clase II, se pueden dividir en Clase II división 1 y división 2 Clase II División 1: La maloclusión incluye incisivos superiores inclinados hacia vestibular, un aumento de la sobremordida horizontal con o sin una arcada superior relativamente estrecha. Verticalmente puede variar de una sobremordida profunda a una mordida abierta. Sagitalmente se encuentra una relación distal de los maxilares. Clase II División 2: Este tipo de maloclusión se caracteriza por tener excesiva inclinación lingual de los incisivos centrales superiores y los laterales a vestibular. En algunos casos, tanto la central y los incisivos laterales están inclinados hacia palatino y los caninos hacia vestibular. Es acompañado a menudo por una mordida profunda y horizontal mínima. En los casos con extrema sobremordida, los bordes incisales de los incisivos inferiores pueden ponerse en contacto con los tejidos blandos del paladar o los tejidos gingivales labiales inferiores pueden ser también lesionados por la inclinación excesiva de los incisivos superiores. Sagitalmente se encuentra una relación distal de los maxilares²².

En cuanto al tratamiento de la maloclusión Clase II Dentoalveolar en dentición permanente: Aparatología correctiva para retrusión dentoalveolar superior y protrusión dentoalveolar inferior o evaluar grado de discrepancia esquelética o definir discrepancia de espacio o definir necesidad de exodoncias superiores o definir necesidad de anclaje mínimo, moderado, máximo o absoluta²¹.

1.5.7 MBT

En la técnica MBT, se usa el Tieback como mecánica para el cierre de espacio. En esta se emplean ganchos soldados de latón de 0,7" en arcos de acero 0,019"x0,025" con brackets slot 0,22", con una distancia entre gancho y gancho de 36-38mm para la arcada superior y 26mm en la arcada inferior. Junto a esto, se colocan ligaduras distales activas de 0,10" con módulos elastómeros, las cuales se estiran dos veces su tamaño proporcionando fuerzas entre 50-100gr. Dentro de esta Biomecánica existen 3 diferentes sistemas: en el sistema 1 (modulo distal), se posiciona el módulo elástico en el gancho del primer o segundo molar permanente unido a este se encuentra ligadura de 0,10" la cual pasa por encima del 2 premolar, envuelve al canino y se liga al gancho soldado. En el sistema 2 (modulo mesial), a diferencia del anterior, el módulo elástico se posiciona en el gancho soldado, unido a este se coloca la ligadura la cual pasa por encima del canino, se mete por el slot junto arco del premolar y se entorcha en primer o segundo molar. Por último, está el sistema 3, mediante el uso de resortes de Nitinol ³.

1.5.8 Elementos finitos

El método de los elementos finitos se ha aplicado con éxito al estudio mecánico de tensiones y deformaciones en el campo de la ingeniería. Es un método de análisis matemático numérico basado en las propiedades de los materiales. El modelado de elementos finitos es la representación de la geometría en términos de un número finito de elementos y sus puntos de conexión conocidos como nodos. Estos son los componentes básicos de la representación numérica del modelo ²³.

Ventajas

- Es una técnica no invasiva.
- El objeto de interés se puede estudiar en tercera dimensión.
- Estrés real experimentado en cualquier momento se puede medir
- Proporciona una base sólida y viable de estudio. para modelar un sistema.
- El modelo MEF (Método de Elementos Finitos) se puede ampliar infinitamente en cuanto a la construcción volumétrica real y a la variabilidad matemática de sus parámetros materiales.
- El modelo de elementos finitos es el medio de análisis más adecuado debido a su capacidad para manejar diversas formas y materiales de naturaleza no homogénea ²⁴.

1.5.9 Aplicaciones del método de los elementos finitos en ortodoncia

- El comportamiento mecánico de los alambres de ortodoncia y los diferentes diseños de Brackets y su problema de contacto se pueden modelar y simular bien mediante el método de elementos finitos.
- Este método es una herramienta importante en el desarrollo y mejora del diseño de alambres y Brackets de ortodoncia.
- Técnica no invasiva
- El objeto de interés se puede estudiar en tercera dimensión.

- Se puede ampliar infinitamente tanto en la construcción volumétrica real como en la variabilidad matemática de sus parámetros materiales.
- Proporciona al ortodoncista datos cuantitativos que aumentan la comprensión de las reacciones fisiológicas que ocurren después de la aplicación de fuerza y pueden producir una mejor comprensión de las reacciones e interacciones de los tejidos individuales
- Útiles para la evaluación de cambios de forma complejos.
- Analiza las tensiones producidas en el ligamento periodontal al ser sometido a fuerzas ortodónticas.
- Útil para estructuras con homogeneidad de material inherente y formas potencialmente complicadas, como los implantes dentales.
- Tipo de modelo informático predictivo descrito puede utilizarse para estudiar la biomecánica del movimiento dental en ortodoncia ²⁵.

1.5.10 Movimiento dental ortodóntico

El movimiento dental ortodóntico se refiere a la alineación y nivelación de los dientes mediante la aplicación de fuerzas ortodónticas controladas. Los ortodoncistas utilizan una variedad de técnicas y dispositivos para lograr el movimiento dental con el objetivo de corregir maloclusiones, mejorar la alineación de los dientes y crear una oclusión óptima y adecuada, El movimiento dental se logra aplicando fuerzas a los dientes a través de aparatos ortodónticos, como Brackets, alambres, elásticos, resortes y otros dispositivos. Estas fuerzas ejercen

presión sobre los dientes y las estructuras de soporte, lo que provoca cambios en la posición y la alineación dental, puede implicar desplazamientos en diferentes direcciones, como intrusión (movimiento hacia el hueso), extrusión (movimiento fuera del hueso), inclinación, rotación, retracción (movimiento hacia atrás) y protrusión (movimiento hacia adelante). Cada tipo de movimiento se utiliza según las necesidades del paciente y el plan de tratamiento ¹.

1.5.11 Anclaje ortodóntico

se refiere a la resistencia o soporte que se utiliza para contrarrestar las fuerzas que los aparatos ortodónticos aplican a los dientes durante el tratamiento. El objetivo es controlar el movimiento de los dientes de manera eficiente y prevenir efectos secundarios no deseados, como la inclinación o desplazamiento indeseado de los dientes adyacentes ²⁶.

Dicho tratamiento depende del protocolo de anclaje planeado para cada caso en particular. El tipo de anclaje se basa en el movimiento dental deseado. El anclaje máximo es generalmente requerido en la mayoría de los casos ortodónticos y casi siempre se obtiene con la ayuda de anclaje extraoral. Sin embargo, este tipo de anclaje es rechazado la mayoría de las veces por los pacientes adolescentes y adultos por razones estéticas. Por esto se ha implementado el uso de implantes dentales en las últimas tres décadas, debido al proceso de osteointegración que ha garantizado su éxito a largo plazo y esto ha permitido aumentar su uso en

ortodoncia, con las modificaciones apropiadas en su diseño, cuando se requieren
27.

En términos de ortodoncia, cuando se utiliza una fuerza para desplazar a un grupo de dientes en cierta dirección, siempre habrá otra fuerza igual y en sentido opuesto, es por esto por lo que se debe determinar el tipo de anclaje a utilizar y los dientes con los que se requiere limitar su movimiento ya que la fuerza recíproca tiene la facilidad de inducir el desplazamiento de los dientes ¹.

Tipos de anclaje

- Anclaje dental: Utiliza los propios dientes como soporte. Los molares son comúnmente utilizados debido a su ubicación en la parte posterior de la boca y su resistencia para soportar fuerzas. Sin embargo, en algunos casos, puede ser necesario reforzar el anclaje dental mediante la colocación de mini-implantes o dispositivos similares.
- Aparatos intra-bucal: Arco de Nance, arco palatino. A lo largo de los años se han desarrollado aparatos intraorales para ayudar a resistir el movimiento anterior de los órganos dentarios posteriores, pero presentan una estabilidad de anclaje limitada.
- Anclaje esquelético o anclaje absoluto: Mini implantes dentales, por sus siglas en inglés "TADS" (dispositivo de anclaje temporal, mini-placas. El anclaje esquelético puede derivarse de implantes dentales típicos, de alambres quirúrgicos de fijación, de mini placas colocadas quirúrgicamente, así como de mini tornillos no osteointegrados y una de las ventajas es que

no se requiere la cooperación del paciente exceptuando la higiene de estos
1.

1.5.12 Barra transpalatina

La barra transpalatina es un dispositivo fijo que se coloca en la parte posterior del paladar, conectando los molares superiores de un lado con los del otro. Consiste comúnmente en un alambre que se une a bandas o Brackets colocados en los molares. La barra atraviesa el paladar y se utiliza para mantener o expandir la anchura del arco dental superior. Este aparato permite que las fuerzas sean distribuidas a lo largo del arco cuando se trata de lograr movimientos de primero, segundo y tercer orden.

Indicaciones

- para corregir mordidas cruzadas posteriores, donde los dientes superiores en la parte posterior no encajan correctamente con los dientes inferiores.
- En casos donde el maxilar superior es más estrecho de lo normal, la barra transpalatina puede utilizarse para ayudar a expandir la anchura del arco dental superior.
- También puede emplearse en situaciones donde es necesario mantener el espacio en la arcada superior, como después de la pérdida prematura de un diente temporal.

Barra transpalatina de anclaje

- Barra transpalatina básico. La barra transpalatina sirve como aparato de estabilización, conectando los dos primeros molares por medio de un alambre que atraviesa el paladar. Forma una unidad de anclaje que resiste el movimiento mesial de los molares, cuando se está realizando un tratamiento ortodóncico activo que requiere el mantenimiento del anclaje.
- Barra transpalatina sin omega: La barra transpalatina sin la omega en “U” en el medio de la barra, brinda mayor rigidez, favoreciendo a la estabilidad de los molares Según Braun, Kustono y Evans mientras mayor sea su rigidez, más rápido el centro de rotación va a migrar hacia los aditamentos linguales. Por esta razón la barra transpalatina con omega en “U” en el medio de la barra no son recomendadas para la rotación de los molares ²⁸.

1.6 Objetivos generales y específicos.

Objetivo general: Evaluar los efectos dentoalveolares de los sistemas ROTH y MBT en el cierre de espacios usando anclaje con barra transpalatina en el movimiento de dientes anteriores. Estudio de elementos finitos.

Objetivos específicos:

- Medir la retro inclinación de dientes anteriores posterior a la activación del sistema DKL y sistema 3 de MBT.
- Evaluar las deformaciones y esfuerzos ocasionados en las raíces y hueso circundante de dientes anteriores posterior a la activación del sistema DKL y sistema 3 de MBT.

- Evaluar la deformación y esfuerzo ocasionado por la activación del sistema DKL y sistema 3 de MBT, sobre los dientes que sostiene el anclaje de la barra transpalatina
- Evaluar la rotación de los caninos posterior a la activación del sistema DKL y sistema 3 de MBT.

2. Aspectos metodológicos.

2.1. Tipo de estudio.

Estudio observacional descriptivo por medio de modelado matemático.

2.2. Objeto de estudio.

Cierre de espacio con técnica Roth y MBT.

2.3. Material objetivo de estudio.

Cortes tomografía de paciente clase II subdivisión 1, tomada de la historia clínica de paciente de la institución universitarias colegios de Colombia (UNICOC).

2.4. Unidad de observación.

Para efectos del estudio se utilizarán las siguientes variables.

VARIABLE	DEFINICIÓN	NATURALEZA	TIPO DE VARIABLE	OPERACIONALIZACIÓN	ESCALA DE MEDICIÓN	INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN
Cierre de espacio post exodoncia	Cierre de espacio edéntulo que queda en el arco dental después de la extracción de uno o más dientes	Cuantitativa continua	dependiente	milímetros	razón	Modelo matemático de elementos finitos en el Software Ansys
Inclinación de dientes anteriores superiores	Desviación del diente superior con respecto a la línea	Cuantitativa continua	dependiente	grados	razón	Modelo Matemático software Ansys

	horizontal o vertical					
Deformación	se refiere al cambio en la forma o tamaño de un cuerpo debido a la aplicación de fuerzas externas (esfuerzos) o cambios térmicos.	Dependiente				
Esfuerzo	Es una medida de la fuerza interna que experimenta un material por unidad de área cuando se aplica una carga externa.	Dependiente	Mpa			

Torque coronal anterosuperiores	Los grados de angulación son una medida utilizada para describir el tamaño o la amplitud de un ángulo	Cuantitativa continua	dependiente	Grados de angulación	razón	Modelo Matemático Software Ansys
Rotación del canino	Se refiere al movimiento de un diente alrededor de su eje longitudinal		Dependiente	Milímetros	Razón	Modelo Matemático Software Ansys
Brackets formulación Roth.		Cualitativa – Nominal	Independiente.	Verificación del tipo de		

		dicotómica.		Brackets. Validación del troque y inclinación de la técnica.		
TIEBACK	Es un término incluido en la técnica MBT. Este sistema se caracteriza por el uso de Brackets, pines, módulos elásticos y alambres específicos.	Cualitativa	Independiente	Sistema 3 utilizado o	Nominal	

Brackets MBT		Cualit ativa nomin al dicotó mica	Independ iente	Torque s e inclina ciones específ icos de la técnica	Nominal	
-------------------------	--	--	-------------------	---	---------	--

2.5 Muestra.

Tomografía de paciente, clase II subdivisión 1 de la Clínica de Ortodoncia y Ortopedia Maxilar de UNICOC.

2.6 Criterios de selección.

2.6.1 Criterios de inclusión.

- Paciente de Sexo masculino o femenino.
- Edad 18-40 años.
- Paciente con maloclusión clase II
- Overjet aumentado
- Protrusión dental.
- Paciente con indicación de exodoncia de premolares superiores.

2.6.2 Criterios de exclusión.

- Enfermedad periodontal activa.
- Presencia de restauraciones en amalgamas
- Dientes con reabsorción radicular.

2.7 Procedimiento.

2.7.1 Modelamiento del conjunto en ANSYS.

El modelamiento inicial se realizó en dos etapas:

a. Modelamiento de las geometrías:

- i. A partir de la tomografía se reconstruyeron las estructuras morfológicas del paciente como son: Hueso cortical, hueso trabecular y piezas dentales.
- ii. Partiendo de los elementos físicos de los accesorios de cada modelo (Roth y DKL), se dibujaron los elementos correspondientes a los Brackets, los arcos y la barra transpalatina.
- iii. Se construyó los modelos de los conjuntos correspondientes a los sistemas Roth y DKL en archivos separados, para realizar la simulación de cada uno.

b. Importación de los conjuntos a Ansys:

Cada modelo por separado se importó al programa Ansys Workbench, donde se definieron los siguientes aspectos:

- Material a cada estructura (propiedades mecánicas del material)

- Enmallado de cada elemento
- Condiciones de frontera (apoyos y cargas aplicadas)
- Resultados a obtener: Esfuerzos y deformaciones en las estructuras de interés, así como la angulación inicial de las piezas dentales.

2.7.2 Modelamiento del movimiento dental.

Este estudio observacional descriptivo se basó en modelos matemático de elementos finitos (MEF) desarrollados a partir de tomografía de haz cónico. Este estudio fue aprobado previamente por el comité de ética de UNICOC y se desarrolló teniendo en cuenta los lineamientos de la declaración de Helsinki. La selección de la Tomografía computarizada de haz cónico (CBCT) cumplió con los criterios de inclusión que consideraron pacientes con un rango de edad entre 18 y 40 años con maloclusión Clase II-1, sexo masculino o femenino, presencia de Overjet aumentado, protrusión dental superior y con indicación de exodoncia de premolares superiores. Se excluyeron del estudio, CBCT de pacientes con enfermedad periodontal activa, restauraciones en amalgama y dientes con reabsorción radicular.

El modelamiento inicial se realizó en dos etapas. Inicialmente, Modelamiento de las geometrías: A partir de la tomografía se reconstruyeron las estructuras morfológicas del paciente como son: Hueso cortical, hueso trabecular y dientes. Partiendo de los elementos físicos de los accesorios de cada modelo (Roth y DKL), se dibujaron los

elementos correspondientes a los Brackets, los arcos y la barra transpalatina. Se construyeron los modelos de los conjuntos correspondientes a los sistemas Roth y MBT en archivos separados, para realizar la simulación de cada uno (Figura1).

Posteriormente, se Importó de los conjuntos a ANSYS, cada modelo por separado se importó al programa ANSYS Workbench, donde se definieron los siguientes aspectos: Material a cada estructura (Propiedades mecánicas del material) (Tabla 1), Enmallado de cada elemento, condiciones de frontera (apoyos y cargas aplicadas) y Resultados a obtener, Esfuerzos y deformaciones en las estructuras de interés, así como la angulación inicial de las piezas dentales.

Para la simulación del movimiento ortodóntico, se empleó un enfoque numérico basado en el método de elementos finitos tridimensionales (3D FEM), basada en la metodología propuesta por Kojima y Fukui ²⁹. En el modelo, los dientes y el hueso alveolar se representaron como cuerpos rígidos, mientras que el ligamento periodontal (PDL) fue modelado como una superficie con comportamiento elástico lineal. Esta formulación permitió reproducir adecuadamente la movilidad labio lingual y axial observada clínicamente.

El hueso no se modela directamente, sino que su efecto se incorpora al cálculo del desplazamiento del diente mediante el coeficiente **C** de remodelación ósea. De esta manera los cálculos resultan en un modelo computacionalmente simple y eficaz, aunque no permite la distribución ni remodelación ósea explícitamente.

El esfuerzo promedio en el ligamento periodontal se estimó como el promedio de los tres esfuerzos principales, asumiendo un estado de deformación plana. El desplazamiento de cada diente se calculó en función de la remodelación ósea inducida por el esfuerzo en el PDL, considerando que dicho esfuerzo estimula la reabsorción o aposición del hueso alveolar. Este desplazamiento se obtuvo mediante la expresión:

$$\Delta x = -C \cdot \sigma \cdot \Delta T$$

donde Δx es el desplazamiento incremental del diente, C es un coeficiente de absorción ósea (dependiente del tipo de movimiento), σ es el esfuerzo medio en el PDL, y ΔT es el paso temporal (en días).

La simulación se implementó como un procedimiento iterativo en el que, para cada paso de tiempo, se calcularon los esfuerzos en el ligamento, se aplicaron las fuerzas ortodónticas y se actualizaron las posiciones de los dientes. Posteriormente, se reestimaron las fuerzas transmitidas al sistema arco-bracket para el siguiente ciclo. Además, se incluyó el efecto de la fricción entre el arco y los brackets, considerando un coeficiente de fricción promedio de 0,2; lo cual reduce la fuerza neta aplicada a los dientes activos.

2.7.3 Cálculo de las fuerzas transmitidas a los dientes

La fuerza aplicada a cada diente se calcula como resultado de la acción de elásticos ortodónticos conectados entre los dientes #16 y #13 (lado derecho) y #26 y #23

(lado izquierdo), teniendo en cuenta los efectos de fricción en el sistema arco-brackets y la redistribución de cargas a través del arco.

La fuerza generada por cada elástico se modela mediante una relación lineal tipo resorte, donde la magnitud de la fuerza es proporcional al alargamiento del elástico:

$$F(t) = F_0 * L(t) - L_0 L_0 - L_{Libre} \quad F_t = F_0 * L(t) - L_0 L_0 - L_{Libre}$$

Donde:

- F_0 es la fuerza máxima aplicada cuando el elástico está completamente estirado,
- $L(t)$ es la longitud actual del elástico en el instante t ,
- L_0 es la longitud inicial del elástico (estirado),
- L_{Libre} es la longitud del elástico sin carga.

El modelo también considera la fricción entre el arco y los brackets, representada mediante un coeficiente de fricción μ , lo que reduce la fuerza efectiva transmitida al diente activo:

$$F_{neta} = F(t) * (1 - \mu) \quad F_{neta} = F_t * 1 - \mu$$

Las fuerzas netas se aplican inicialmente sobre los dientes activos (#13 y #23), mientras que los dientes de anclaje (#15, #16, #25 y #26) reciben el remanente de la fuerza total. El efecto de la rigidez del arco se modela como una redistribución

uniforme de la fuerza total del sistema entre todos los dientes conectados. La fuerza final aplicada a cada diente se estima como:

$$F_i = F_{neta, 13} + F_{neta, 23} + F_{remanente} / n \quad F_i = F_{neta, 13} + F_{neta, 23} + F_{remanente} / n$$

Donde n es el número total de dientes considerados en el modelo. Este valor se utiliza posteriormente para calcular el esfuerzo promedio en el ligamento periodontal de cada diente, el cual determina su desplazamiento mediante la ley de remodelación ósea.

La fuerza generada por cada elástico se modela mediante una relación lineal tipo resorte, donde la magnitud de la fuerza es proporcional al alargamiento del elástico:

$F(t) = F_0 * (L(t) - L_0) / (L_{libre} - L_0)$ Donde, F_0 es la fuerza máxima aplicada cuando el elástico está completamente estirado, $L(t)$ es la longitud actual del elástico en el instante t, L_0 es la longitud inicial del elástico (estirado), y L_{libre} es la longitud del elástico sin carga.

El modelo también considera la fricción entre el arco y los brackets, representada mediante un coeficiente de fricción μ , lo que reduce la fuerza efectiva transmitida al diente activo: $F_{neta} = F(t) * (1 - \mu)$ Las fuerzas netas se aplican inicialmente sobre los dientes activos #13 y 23, mientras que los dientes de anclaje #15, #16, #25 y #26 reciben el remanente de la fuerza total. El efecto de la rigidez del arco se modela como una redistribución uniforme de la fuerza total del sistema entre todos los dientes conectados. La fuerza final aplicada a cada diente se estima

como: $F_i = F_{neta, 13} + F_{neta, 23} + F_{remanente}$ *$F_i = F_{neta, 13} + F_{neta, 23} + F_{remanente}$*
 Donde n es el número total de dientes considerados en el modelo. Este valor se utiliza posteriormente para calcular el esfuerzo promedio en el ligamento periodontal de cada diente, el cual determina su desplazamiento mediante la ley de remodelación ósea.

2.8. Aspectos éticos

Conforme a la Resolución N° 008430 del 4 de noviembre de 1993, y en cumplimiento con los criterios mencionados en el Título II, capítulo 1, Art.6 y Art. 11 de dicha resolución que establece las pautas científicas, técnicas y administrativas para la investigación en salud, se determina que el estudio que se lleva a cabo es clasificado sin riesgo. El presente estudio adopta un diseño observacional mediante un modelo matemático y no implica intervención alguna en individuos. La CBCT usada para el modelado matemático fue seleccionada de historias clínicas donde se requirió como parte de los exámenes diagnósticos.

Consentimiento informado:

En esta investigación se utilizó una CBCT seleccionada de los registros de historias clínicas donde se requiriera dicho examen como parte del diagnóstico, los registros de los pacientes que se usaron sin consentimiento explícito en el momento de la toma de la imagen se garantizaron que los datos fueran anonimizados sin compromiso de la confidencialidad del paciente.

Confidencialidad: Los datos recolectados de la historia clínica seleccionada, se preservaron teniendo en cuenta la habeas data, removiendo datos como nombre, fecha de nacimiento, registro médico y cualquier información identificable. Los datos fueron codificados y el acceso al registro original se restringió a los investigadores autorizados únicamente para evitar el uso indebido de los datos del participante. Los investigadores se aseguraron de que el examen seleccionado de las historias clínicas se encontraba justificados como medio diagnóstico para el tratamiento del paciente.

La investigación puede implicar la recopilación de datos y esos datos, si se revelan a terceros, pueden causar perjuicio o aflicción. Por consiguiente, los investigadores deben adoptar medidas para proteger la confidencialidad de dichos datos, por ejemplo, omitiendo información que pudiese traducirse en la identificación de personas determinadas, o limitando el acceso a los datos, o por otros medios.

3. Resultados.

La discretización de la geometría permitió realizar análisis numéricos detallados de las estructuras y sus respuestas mecánicas en donde se calculó la deformación de raíces de los 6 dientes anteriores y dientes de soporte de anclaje tras una aplicación de fuerza de 1.5 N en dos técnicas, MBT y ROTH

Deformación y esfuerzo dentales: Este estudio demostró la deformación y el esfuerzo con una fuerza aplicada de 1.5 N en donde se establecieron deformaciones, en la técnica ROTH la mayor la presentó el diente 16 con 0,0019656 mm en superficie oclusal y el diente #12 presento una deformación mínima de 0,00016228 mm en el ápice (Figura 2a) (Figura 3).

En la técnica MBT el diente #16 presento una mayor deformación con un valor de 0,23371 a nivel oclusal y el diente #11 presento una deformación mínima 0,000019294 a nivel de tercio apical (Figura 4).

Se demostraron los esfuerzos en ambas técnicas, en la técnica ROTH, el mayor esfuerzo diente #12 0,17125 MPa en superficie cérvico vestibular y el menor el diente #11 0,0015662 MPa en apical. En la técnica MBT el mayor esfuerzo fue a nivel de furca de diente #16 con un valor de 0,23762 y un esfuerzo mínimo en el diente #12.

Deformación y esfuerzo de hueso trabecular y cortical: A demás se demostró el esfuerzo máximo del hueso trabecular en técnica ROTH del diente #16 en zona

interradicular vestibular con 0,071904 MPa y la deformación máxima 0,00019182 mm concuerda en la misma zona que el esfuerzo (Figura 5), y el hueso cortical, el mayor esfuerzo del diente #16 se presentó en la zona mesial con 0,25648 MPa y la mayor deformación del diente #16 se presentó en la zona meso vestibular con 0,00017463 mm (Figura 1-6) (Figura 7).

En MBT a nivel de hueso trabecular el esfuerzo máximo se evidencio a nivel de fúrca de diente #16 con un valor de 0,72578, la deformación se presentó en el mismo lugar con un valor de 0,0002361 (Figura 8). En cuanto a hueso cortical, el mayor esfuerzo se dio en la zona mesial de #16 con un valor de 0,17954 MPa y se presentó mayor deformación en la misma zona de #16 con un valor de 0,00010677 (Figura 9) (Figura 3).

Rotaciones: En la tabla, se indican las rotaciones generadas durante el movimiento en los caninos en ambas técnicas, en MBT el #13 tuvo una rotación total de 0,00571 y en ROTH 0,002309 Siendo el diente #13 en la técnica MBT la que presento mayor rotación (Tabla 2).

Inclinación dental: En comparación inclinación angular de los dientes anterosuperiores tras la activación de ambas técnicas ortodónticas MBT y DKL se observó una secuencia constante en la retro inclinación angular de los dientes anterosuperiores (del #11 al #16). Con la técnica MBT, el mayor ángulo final se observó en el diente #11 con 4,2837°, seguido por el diente #12 con 4,0179°, el #13 con 3,8979°, el #16 con 3,7152° y el #15 con 3,6852° (Figura 10). En comparación, con el sistema DKL, el diente #11 también presentó el mayor valor final con 4,1287°, seguido por el diente #12 con 3,9067°, el #13 con 3,5791°, el #15 con 3,3716° y el

#16 con $3,6062^{\circ}$ (Figura 11). No se observaron diferencias mayores a nivel de la inclinación de dientes anterosuperiores entre las dos técnicas.

En los valores iniciales (día 0), los ángulos variaron entre $0,6609^{\circ}$ (#13 - DKL) y $1,0323^{\circ}$ (#12 - DKL); mientras que en MBT estuvieron entre $0,6826^{\circ}$ #13 y $0,8813^{\circ}$ #16. Para el día 7, DKL mostró ángulos de entre $1,3387^{\circ}$ #15 y $1,8555^{\circ}$ #12, y MBT entre $1,2184^{\circ}$ #13 y $1,6398^{\circ}$ #12. En el día 14, DKL presentó una media angular de $2,30^{\circ}$, mientras MBT fue superior, con una media de $2,51^{\circ}$. Para el día 28, la media de todos los dientes fue $3,92^{\circ}$ con MBT y $3,72^{\circ}$ con DKL. Ambas técnicas resultaron efectivas, la técnica MBT indujo una mayor retro inclinación angular promedio en todos los dientes analizados las diferencias fueron de $0,4^{\circ}$ (Tabla 3-4)

4. Discusión

Los resultados obtenidos mediante el método de elementos finitos (FEM) en este estudio muestran que tanto el sistema MBT como el sistema ROTH generan efectos dentoalveolares relevantes durante la retracción en masa de los dientes anterosuperiores, aunque con comportamientos biomecánicos diferentes que pueden influir en la selección clínica más apropiada según las necesidades individuales del paciente.

En relación con la inclinación de los incisivos superiores, ambos sistemas produjeron retro inclinación, siendo más descontrolada en MBT ($3,92^{\circ}$) frente a ROTH ($3,72^{\circ}$). Este hallazgo coincide con lo reportado por Cozzani et al. (2019), quienes demostraron que el sistema MBT presentaba el mayor grado de retro

inclinación al ser comparado con Alexander, Gianelly y Roth, con desplazamiento palatino de la corona y vestibular de la raíz del incisivo central superior. Dicho comportamiento refleja una inclinación no controlada con mayor pérdida de torque en comparación con ROTH. Sin embargo, los valores no son directamente comparables, ya que Cozzani expresó la pérdida de torque como una relación (1,47° en MBT), donde un valor de 1 representa movimiento igual de corona y raíz, y valores superiores a 1 indican retro inclinación coronal más marcada ¹¹ al analizar la rotación canina, se encontró que fue mayor en MBT (0,00571) comparado con ROTH (0,002309), lo que indica un menor control rotacional en el sistema MBT. Este hallazgo coincide con lo descrito por Liu et al. (2021), quienes demostraron que la mecánica Double Key Loop (DKL), al incrementar la relación momento/fuerza mediante preactivación, favorece movimientos más cercanos a la traslación y reduce la rotación indeseada de caninos durante la retracción ³⁰.

De hecho, Kumar et al. señalaron que una de las principales ventajas del DKL como técnica sin fricción es precisamente el mejor control del movimiento del canino ³¹.

La diferencia observada entre Roth y MBT podría explicarse por las variaciones en la prescripción de torque e inclinación de los caninos. MBT incorpora valores más altos de torque radicular en sectores anteriores, lo cual mejora el control de la inclinación, pero puede generar momentos adicionales que se manifiestan en rotación. En contraste, la prescripción Roth, con una expresión más conservadora de torque, parece ofrecer mayor control rotacional bajo las condiciones analizadas

³¹.

Al analizar los dientes #11, #12 y #13, se observaron variaciones individuales en sus inclinaciones vestibulo-palatinas: Roth mostró valores de 4,1°, 3,9° y 3,5°, mientras que MBT registró 4,2°, 4,0° y 3,8°, respectivamente. Estas diferencias concuerdan con lo descrito por Reimann et al. (2007), quienes evidenciaron que cada diente responde de manera independiente a las fuerzas aplicadas, contradiciendo la existencia de un único centro de resistencia para el segmento anterior³². Investigaciones posteriores mediante FEM reforzaron que la posición del centro de resistencia depende tanto del número de dientes incluidos en el segmento como de la morfología alveolar, lo que explica la respuesta individualizada de cada incisivo durante la retracción^{33 34 35} lo cual concuerda con lo observado en el presente estudio estos hallazgos resaltan la importancia clínica de evaluar los efectos dentoalveolares de manera individual y no asumir un movimiento uniforme de todo el bloque anterior, incluso al utilizar arcos más rígidos en técnicas como Roth o MBT.

En conjunto los hallazgos del presente estudio sugieren que el sistema Roth, combinado con mecánicas de control como el DKL, puede ser más adecuado cuando se requiere minimizar la deformación en estructuras de soporte con raíces cortas o altura ósea disminuida en molares. Por su parte, MBT podría ser preferible en casos donde se busque mayor retro inclinación de incisivos, siempre que el torque radicular positivo no implique riesgos de dehiscencia o defectos óseos vestibulares. En tales situaciones, es posible compensar los efectos indeseados mediante aditamentos auxiliares, como lacebacks o loops, que optimicen el control tridimensional del movimiento³⁶.

Finalmente, la utilización del método de elementos finitos demostró ser una herramienta valiosa al permitir visualizar con precisión los efectos tridimensionales de las fuerzas aplicadas, superando las limitaciones de la observación clínica directa.

En la presente investigación se deben considerar algunas limitaciones importantes, el modelo FEM no reproduce completamente la complejidad anatómica, por lo que los resultados solo aplican a pacientes con características similares; además, nuestros hallazgos representan únicamente la respuesta inicial a la fuerza, sin considerar los cambios progresivos ni la remodelación tisular. Se evaluó un único tipo de anclaje, sin incluir alternativas como mini-implantes u otras técnicas ortodóncicas, y las diferencias entre dimensiones nominales y reales de brackets y alambres limitan la precisión del modelo.

5. Conclusiones.

- El análisis por elementos finitos demostró que tanto MBT como ROTH son efectivos en el cierre de espacios con retracción anterior; MBT mostró mayor retroinclinación y rotación canina, mientras ROTH concentró esfuerzos en áreas corticales, diferencias que deben considerarse en la planificación clínica.
- Al evaluar las deformaciones y esfuerzos a nivel óseo cortical y trabecular se observó que La técnica ROTH concentró los mayores esfuerzos en hueso cortical mesial del primer molar superior, mientras MBT lo hizo en la furca a

nivel trabecular; por ello, es esencial considerar la densidad ósea y controlar la activación para prevenir sobrecargas y pérdida ósea.

- Los resultados mostraron rotaciones en los caninos en ambas técnicas, siendo más marcada en MBT. Esto sugiere que MBT genera una mayor tendencia a la rotación canina durante la retracción lo cual se debe tener en cuenta al momento de seleccionar la técnica de acuerdo con el caso clínico.

6. Recomendaciones.

- Evaluar otros tipos de anclaje como mini-implantes, puede cambiar mucho la distribución de fuerzas.
- Comparar más prescripciones, considerar variaciones de brackets/arcos y usando el método de FEM.

7. Referencias bibliográficas.

1. Proffit WR. Ortodoncia contemporánea [Internet]. 6a ed. Elsevier; 2019 [citado el 6 de octubre de 2025]. Disponible en: <https://research-ebSCO-com.lgproxy.unicoc.edu.co/c/jn3qbr/search/details/tvtbuirxhj?limiters=F T1%3AY&q=proffi%20Ortodoncia%20Contempor%C3%A1nea>
2. Conley RS, Jernigan C. Soft Tissue Changes after Upper Premolar Extraction in Class II Camouflage Therapy. Vol. 76, Angle Orthodontist. 2006.
3. McLaughlin RP, Bennett JC, Trevisi HJ. Mecanica Sistematizada del Tratamiento Ortodónico. 1a ed. España: Elsevier; 2002.
4. Geron S, Shpack N, Kandos S, Davidovitch M, Vardimon AD. Anchorage Loss-A Multifactorial Response [Internet]. Vol. 73, Angle Orthodontist. 2003. Disponible en: <http://meridian.allenpress.com/angle-orthodontist/article-pdf/73/6/730/1375876/0003-3219>
5. Kattner PF, Schnelder BJ. Comparison of Roth appliance and standard edgewise appliance treatment results. American Journal of Orthodontics

and Dentofacial Orthopedics [Internet]. el 1 de enero de 1993 [citado el 15 de octubre de 2025];103(1):24–32. Disponible en: <https://www.ajodo.org/action/showFullText?pii=0889540693701003>

6. Ceylan I, Bü Lent Baydas ;, Bö Lü Kbasi B. Longitudinal Cephalometric Changes in Incisor Position, Overjet, and Overbite Between 10 and 14 Years of Age [Internet]. Vol. 72, Angle Orthodontist. 2002. Disponible en: <http://meridian.allenpress.com/angle-orthodontist/article-pdf/72/3/246/1378506/0003-3219>
7. Knop L, Gandini LG, Shintcovsk RL, Gandini MREAS. Scientific use of the finite element method in orthodontics. Dental Press J Orthod. 2015;20(2):119–25.
8. Philip P, Jose NP. Versatile retraction mechanics: Implant assisted en-masse retraction with a boot loop. Contemp Clin Dent. el 1 de marzo de 2015;6(5):S41–4.
9. Sia SS, Koga Y, Yoshida N. Determining the center of resistance of maxillary anterior teeth subjected to retraction forces in sliding mechanics: An in vivo study. Angle Orthodontist. noviembre de 2007;77(6):999–1003.
10. Gregoret J. Tratamiento ortodóncico con arco recto [Internet]. 2a ed. Amolca; 2015 [citado el 6 de octubre de 2025]. Disponible en: <https://openurl-ebsco->

com.lgproxy.unicoc.edu.co/contentitem/cat09082a:ucoc.9644?sid=ebsco:plink:crawler&id=ebsco:cat09082a:ucoc.9644&crl=c

11. Cozzani M, Sadri D, Nucci L, Jamilian P, Pirhadirad AP, Jamilian A. The effect of Alexander, Gianelly, Roth, and MBT bracket systems on anterior retraction: a 3-dimensional finite element study. Clin Oral Investig. el 1 de marzo de 2020;24(3):1351–7.
12. Zablocki HL, McNamara JA, Franchi L, Baccetti T. Effect of the transpalatal arch during extraction treatment. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics. junio de 2008;133(6):852–60.
13. Amaya S, Navarrete G, Barrera JP, Godoy S, Prado E, Ramírez A. Efectividad del anclaje esquelético temporal para el cierre de espacios: Revisión sistemática de literatura Effectiveness of temporary skeletal anchorage for space closure: A systematic review. Vol. 24, Rev.CES Odont. 2011.
14. Sebastian B, Bhuvaraghan A, Thiruvengkatachari B. Orthodontic space closure in sliding mechanics: a systematic review and meta-analysis. Vol. 44, European Journal of Orthodontics. Oxford University Press; 2022. p. 210–25.
15. Carvajal Caro AA, Portillo Bastidas R, López Sedano D, Quirós Castillo J. Cierre de espacios en tratamientos ortodónticos con fricción: Revisión Bibliográfica. Revista Latinoamericana de Ortodoncia y Odontopediatría

[Internet]. 2020 [citado el 6 de octubre de 2025]; Disponible en:

<https://www.ortodoncia.ws/publicaciones/2020/art-54/>

16. Javaratne YSN, Uribe F, Janakiraman N. The effect of mini.implant supported anchorage on maxillary incisor position during retraction - A systematic review. J Istamb Univ Fac Dent. el 17 de noviembre de 2017;51(0).
17. Morán AC, Ruiz Díaz R, Meléndez A, li O. Análisis comparativo de la inclinación final de los incisivos después del cierre de espacios entre mecánicas de deslizamiento y traslación. Revista odontológica mexicana [Internet]. 2012 [citado el 15 de octubre de 2025];16(3):159–63. Disponible en:
<https://www.scielo.org.mx/pdf/rom/v16n3/v16n3a2.pdf>
18. Reascos Pamela R, Cruz Valeria S, Calderón Estuardo B. Cierre de espacios con fricción. Revista Latinoamericana de ortodoncia y odontopediatria [Internet]. noviembre de 2014 [citado el 15 de octubre de 2025]; Disponible en:
<http://www.ortodoncia.ws/publicaciones/2014/art24.asp>
19. Sangcharearn Y, Ho C. Effect of incisor angulation on overjet and overbite in class II camouflage treatment: A typodont study. Angle Orthodontist. noviembre de 2007;77(6):1011–8.

20. Li Y, Jacox LA, Little SH, Ko CC. Orthodontic tooth movement: The biology and clinical implications. Vol. 34, Kaohsiung Journal of Medical Sciences. Elsevier (Singapore) Pte Ltd; 2018. p. 207–14.
21. Uribe Restrepo GA. Ortodoncia teoría y clínica [Internet]. 2a ed. Ortodoncia Teoria y Clinica. Medellin: CIB; 2010 [citado el 15 de octubre de 2025]. Disponible en: <https://openurl-ebsco-com.lgproxy.unicoc.edu.co/contentitem/cat09082a:ucoc.6561?sid=ebsco:plink:crawler&id=ebsco:cat09082a:ucoc.6561&crl=c>
22. Ma Y, Zhao W, Zhang S, Jin X, Xu J, Fu B, et al. Treatment decisions of patients with Class II Division 2 malocclusion and severe tooth wear: a systematic review. BDJ Open [Internet]. el 1 de diciembre de 2024 [citado el 6 de octubre de 2025];10(1). Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39138157/>
23. Tominaga JY, Ozaki H, Chiang PC, Sumi M, Tanaka M, Koga Y, et al. Effect of bracket slot and archwire dimensions on anterior tooth movement during space closure in sliding mechanics: A 3-dimensional finite element study. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics [Internet]. 2014 [citado el 6 de octubre de 2025];146(2):166–74. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25085299/>
24. Jafari A, Shetty KS, Kumar M. Study of stress distribution and displacement of various craniofacial structures following application of

transverse orthopedic forces--a three-dimensional FEM study - PubMed. Angle Orthod [Internet]. 2003 [citado el 6 de octubre de 2025];73(1):12–20. Disponible en:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12607850/>

25. Parashar A, Aileni KR, Rachala MR, Shashidhar NR, Mallikarjun V, Parik N. Torque Loss in En-Masse Retraction of Maxillary Anterior Teeth Using Miniimplants with Force Vectors at Different Levels: 3D FEM Study. J Clin Diagn Res [Internet]. 2014 [citado el 15 de octubre de 2025];8(12):ZC77. Disponible en:

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4316344/>

26. Baldini G, Luder HU. Influence of arch shape on the transverse effects of transpalatal arches of the Goshgarian type during application of buccal root torque. Am J Orthod [Internet]. el 1 de marzo de 1982 [citado el 15 de octubre de 2025];81(3):202–8. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0002941682900537?via%3Dihub>

27. Ingervall B, Göllner P, Gebauer U, Fröhlich K. A clinical investigation of the correction of unilateral first molar crossbite with a transpalatal arch. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics [Internet]. el 1 de abril de 1995 [citado el 15 de octubre de 2025];107(4):418–25. Disponible en:

<https://www.ajodo.org/action/showFullText?pii=S0889540695700951>

28. Álvarez Arango EJ, Uribe Restrepo GA. Movimientos dentales generados por momentos diferenciales en mecánica de cierre en masa, posterior a la extracción de premolares. [Internet]. [Medellín]: Universidad CES; 2015 [citado el 15 de octubre de 2025]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10946/749>
29. Kojima Y, Fukui H. Numeric simulations of en-masse space closure with sliding mechanics. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics. 2010;138(6):702.e1-702.e6.
30. Liu J, Zhang D, Xu L, Cai S, Guo J, Chen J, et al. Mechanical force system of double key loop with finite element analysis. BMC Oral Health. el 1 de diciembre de 2021;21(1).
31. Kumar M, Goyal M, Kushwah A, Sonika Sharma. A review on double keyhole loop. TMU Journal of Dentistry [Internet]. 2018;5(3):13–6. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/348431549>
32. Reimann S, Keilig L, Jäger A, Bourauel C. Biomechanical finite-element investigation of the position of the centre of resistance of the upper incisors. Eur J Orthod. junio de 2007;29(3):219–24.
33. Zhang ZH, Jhaveri DJ, Marshall VM, Bauer DC, Edson J, Narayanan RK, et al. A comparative study of techniques for differential expression analysis on RNA-Seq data. PLoS One [Internet]. el 13 de agosto de 2014 [citado el 15 de octubre de 2025];9(8). Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25119138/>

34. Viecilli RF, Chen J, Katona TR, Roberts WE. Force system generated by an adjustable molar root movement mechanism. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics [Internet]. el 1 de febrero de 2009 [citado el 15 de octubre de 2025];135(2):165–73. Disponible en: <https://www.ajodo.org/action/showFullText?pii=S0889540608009256>
35. Jeong GM, Sung SJ, Lee KJ, Chun YS, Mo SS. Finite-element investigation of the center of resistance of the maxillary dentition. Korean J Orthod. abril de 2009;39(2):83–94.
36. Jain A, Prasantha GS, Mathew S, Sabrish S. Analysis of stress in periodontium associated with orthodontic tooth movement: a three dimensional finite element analysis. Comput Methods Biomech Biomed Engin. 2021;24(16):1841–53.

Anexos.

Tablas.

Tabla 1. Módulo de Young y Coeficiente de Poissons de las estructuras.

Estructura	Módulo de Young	Coeficiente de Poisson
Diente	20000	0.30
Ligamento periodontal Xia Z	0.71	0.40
Hueso cortical	13700	0.26
Hueso trabécula	1370	0.30
Arco acero inoxidable 19x25	190 a 210 Gpa	0.27 a 0.30
Barra transpalatina	200 Gpa	0.3
Brackets ROTH	190 a 210 Gpa	0.27 a 0.30
Ligadura metálica		0,3

Tabla2. Rotación de canino en técnica MBT Y Roth.

MBT				DKL			
	13	12	11		13	12	11
ROT X	4,61E-03	4,98E-03	3,75E-03	ROT X	1,26E-03	-7,95E-04	4,24E-03
ROT Y	0,00E+00	-4,48E-03	3,83E-03	ROT Y	0,00E+00	1,22E-03	-8,33E-04
ROT Z	-3,37E-03	5,99E-03	-9,77E-03	ROT Z	-1,94E-03	3,32E-03	1,26E-03
TOT T	5,712E-03	8,986E-03	1,114E-02	TOT T	2,309E-03	3,630E-03	4,499E-03

2A

2B

Tabla 2a. Rotación de canino técnica MBT.

Tabla 2b. Rotación de canino Técnica Roth.

Tabla 3. Valores de inclinación dental técnica MBT.

Suma de VALOR	Etiquetas de columna 				
	☐ MBT				
Etiquetas de fila 	0	7	14	21	28
16	0,88129701	1,510652107	2,34093212	3,150975481	3,715283738
15	0,864380501	1,481789915	2,332198844	3,14803406	3,685282682
13	0,686256024	1,218412519	2,156570044	3,078973029	3,897931756
12	0,805558313	1,639760399	2,105566996	3,154003275	4,0179405
11	0,860754249	1,66497627	2,209782574	3,236220921	4,283760181

*Medidas dadas en grados.

Tabla 4. Valores de inclinación técnica Roth.

Suma de VALOR		Etiquetas de columna 				
		DKL				
Etiquetas de fila 		0	7	14	21	28
16		0,867457519	1,464334807	2,22476743	3,032618748	3,606216105
15		0,83772588	1,33871129	2,218692344	2,986370079	3,371699636
13		0,660991518	1,699067959	2,380624574	3,180506391	3,579101683
12		1,032313449	1,718554846	2,410705219	3,41260093	3,906795394
11		0,831708327	1,618251967	2,158298029	3,095502535	4,128745476

*Medidas dadas en grados.

Figuras.

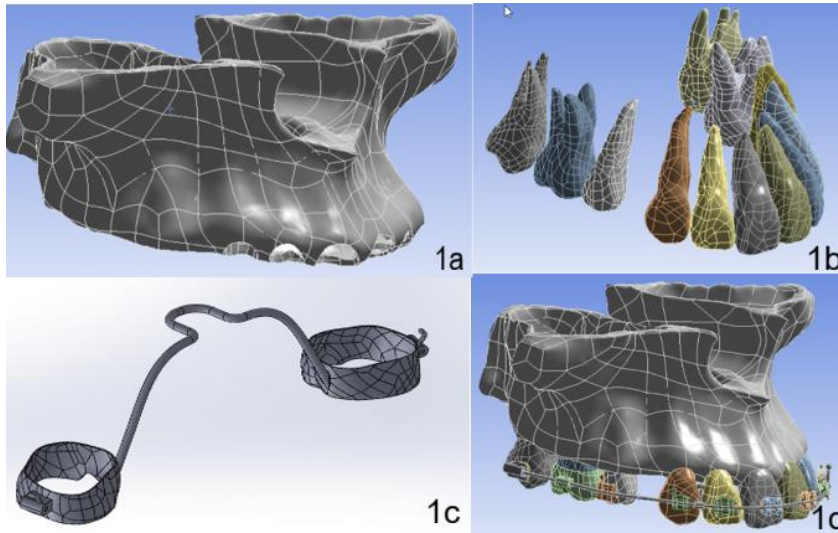


Figura 1. Modelamiento de geometría.

Figura 1a. Reconstrucción anatómica del maxilar.

Figura 1b. Reconstrucción anatómica de dientes.

Figura 1c. Reconstrucción de barra transpalatina.

Figura 1d. Estructuras maxilar, dental, Brackets y arco.

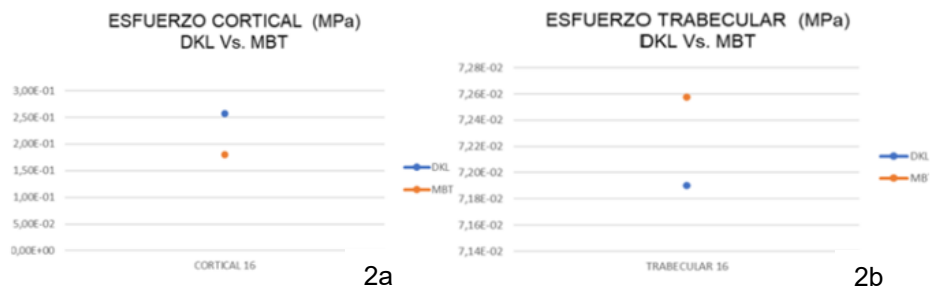


Figura 2. Esfuerzo de hueso cortical y trabecular en primer molar superior derecho.

a. Esfuerzo de hueso cortical de primer molar superior derecho.

b. Esfuerzo de hueso trabecular de primer molar superior derecho.

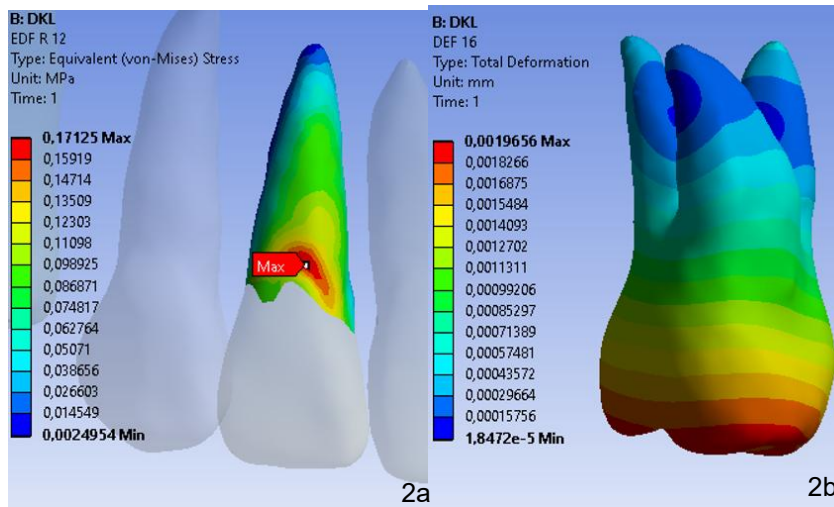


Figura 3. Deformación DKL.

a. Menor deformación, diente 12.

b. Mayor Deformación, diente 16.

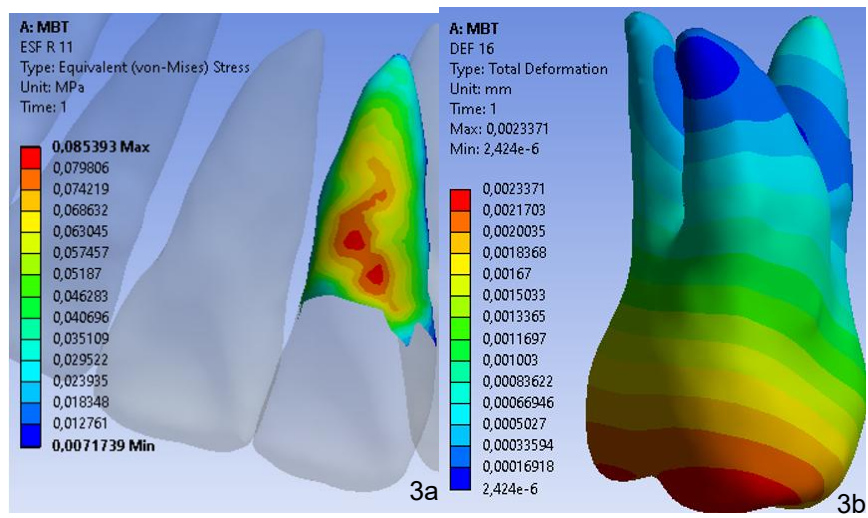


Figura 4. Deformación MBT. a) Menor deformación, diente 11. b) Mayor deformación, diente 16.

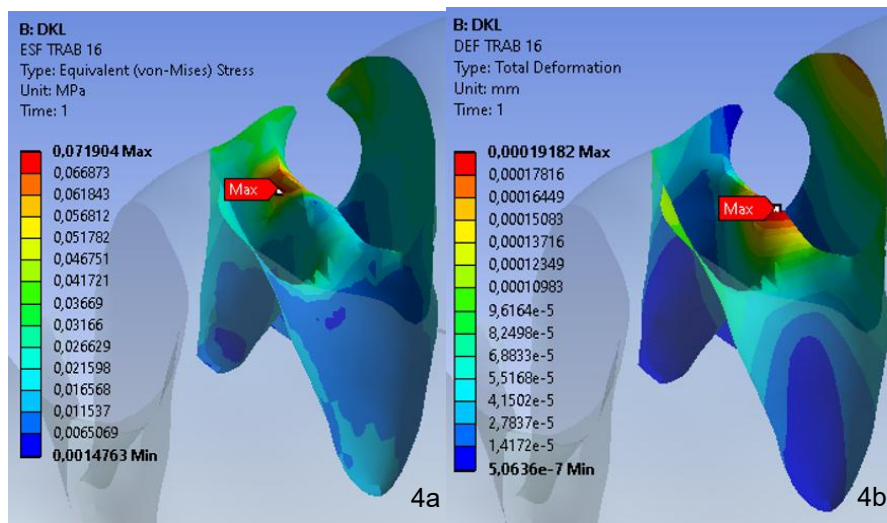


Figura 5. Hueso trabecular diente 16 Roth. a) Esfuerzo. b) Deformación.

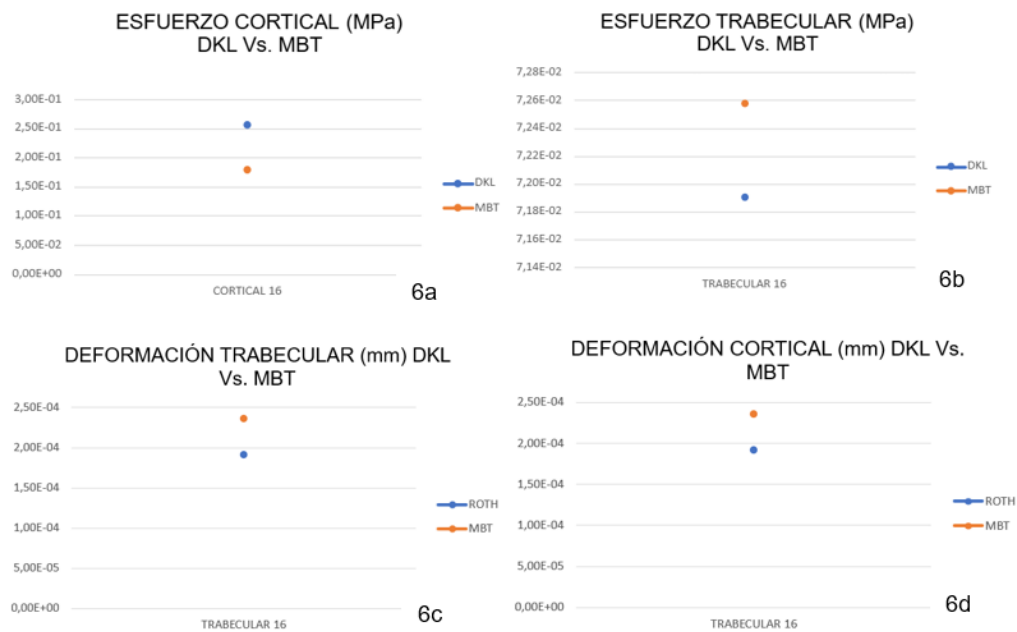


Figura 6. Esfuerzo-deformación hueso trabecular y cortical diente 16. a) Esfuerzo cortical. b) Esfuerzo trabecular. c) Deformación trabecular. d) Deformación cortical.

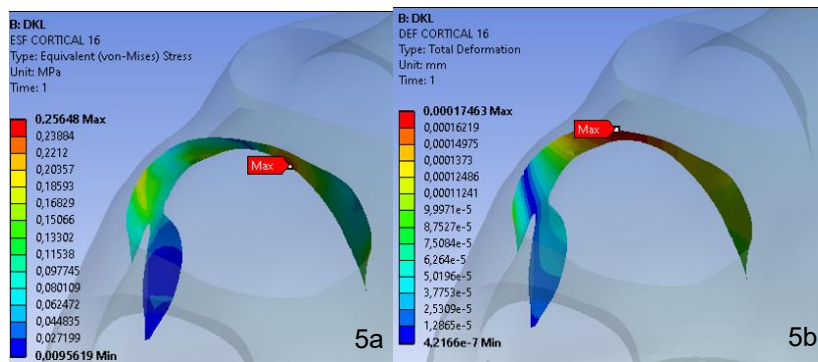


Figura 7. Hueso cortical diente 16 Roth. a) Esfuerzo. b) Deformación.

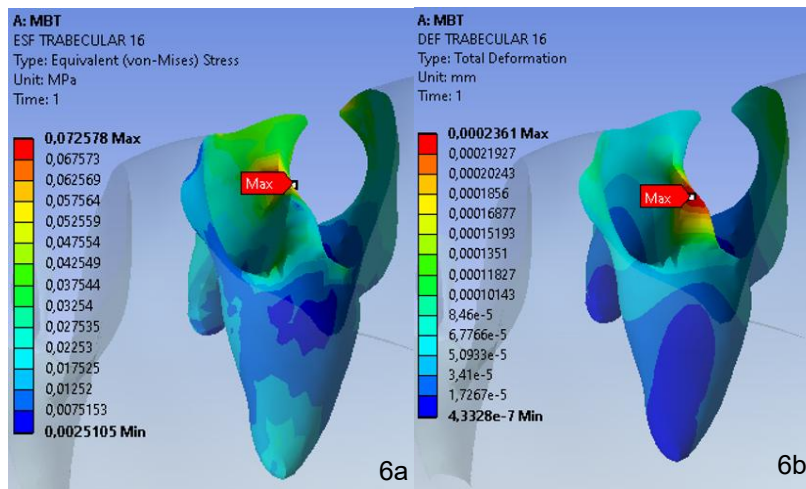


Figura 8. Hueso trabecular diente 16 MBT. a) Esfuerzo. b) Deformación.

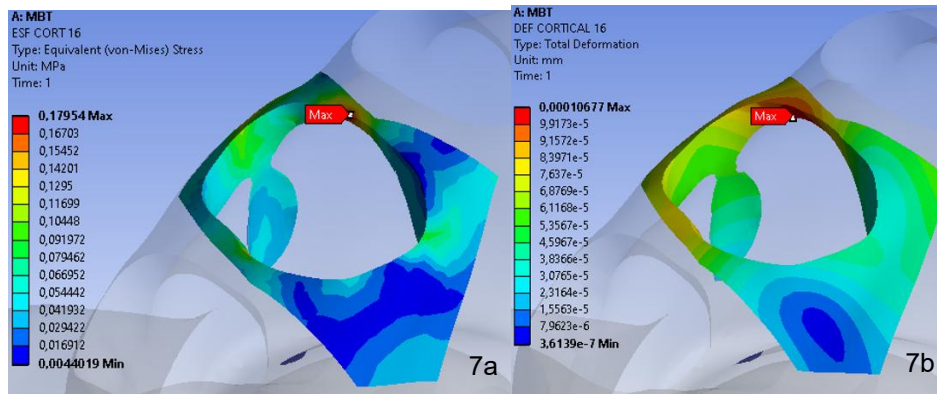


Figura 9. Hueso cortical diente MBT. a) Esfuerzo. b) Deformación.

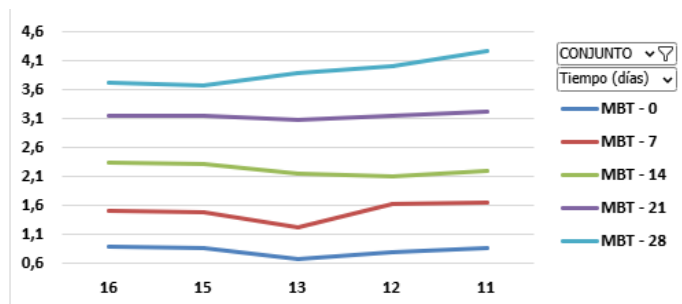


Figura 10. Inclinación de MBT.

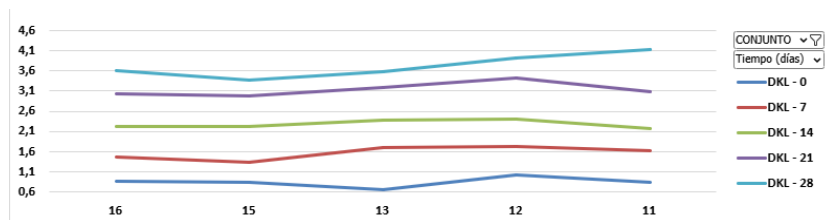


Figura 11. Inclinación de Roth.

Abreviaturas.

MBT: Mclaughlin,Bennett,Trevisi.

FEM: método elementos finitos.

TPA: Barra transpalatina.