

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE ODONTOLOGIA
POSGRADO DE ORTODONCIA**



**EFFECTOS BIOMECÁNICOS DEL MOVIMIENTO DE INCLINACIÓN MESIAL EN
UN CANINO INFERIOR AL APLICAR UNA FUERZA ORTODÓNICA:
UN ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.**

**POR
MARCELA CAROLINA DE LEÓN MARTÍNEZ**

**TESIS
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN ORTODONCIA**

MONTERREY, NUEVO LEÓN, A ENERO DE 2024

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por darme la vida y bendecirme al permitirme seguirme realizando como persona y profesional. Por abrirme el camino y regalarme la compañía de personas que han dejado huella en mi vida.

A mis padres, mi pilar más fuerte, que gracias a ellos he logrado alcanzar mis sueños, por su entrega incondicional, apoyo y consejos. Gracias Mamá, por estar siempre a mi lado; pido a Dios que sigas acompañándome en cada paso de mi vida. Gracias Papá, por motivarme todos los días a dar lo mejor de mí, gracias por tu ejemplo de trabajo y que, siendo un ángel en el cielo, siempre esta tu compañía cerca de mí.

A mis hermanos Cynthia, Miguel y Jorge, por apoyarme de todas las maneras posibles, han sido clave para cada uno de mis logros. Mis sobrinos Renata, Romina, Ana, Rodrigo, Emma y Ángel por ser mi alegría. Gracias a todos por esa recarga de energía, los amo.

A mis compañeros de posgrado y docentes, que después de años conviviendo todos los días nos quedamos con lo mejor de cada uno y formamos una amistad trascendental. Los tendré siempre presentes en mi vida.

Al Dr. Roberto Carrillo González y la Dra. Hilda Torre, por darme la oportunidad de aprender tanto de ustedes y siempre mantener a la vanguardia al Posgrado de Ortodoncia, UANL.

Al Dr. Roberto Carrillo Fuentesvilla, el Ing. Luis Reyes Osorio y el Ing. Oscar Zapata Hernández, por ser un gran apoyo para la realización de este trabajo de investigación, gracias por su paciencia y trabajo.

Principalmente a mi familia, Javier y Santiago, que han sido mi principal motivación para finalizar este trabajo. Gracias Javier por ser mi compañero de vida y alentarme todos los días, juntos hacemos un gran equipo. Gracias hijo por tu amor y ser mi inspiración. Los amo con todo mi corazón.

INDICE

Resumen	1
Abstract	3
1. Introducción	5
2. Antecedentes	6
2.1 Análisis de Elementos Finitos	6
2.1.1. Historia del Método de Elementos Finitos	6
2.1.2. Definición	7
2.1.3. Elemento Finito	8
2.1.4. Nodo	8
2.1.5. Malla	8
2.1.6. Pasos para el Análisis de Elementos Finitos	9
2.2. Digitalización de Imágenes	10
2.3. Análisis de Elementos Finitos en Ortodoncia	11
2.4. Propiedades Biomecánicas de los Materiales	12
2.5. Aplicación de Fuerzas	13
2.5.1. Clasificación de las fuerzas	14
2.6. Tipos de Movimientos en Ortodoncia	16
2.6.1. Torque	16
2.6.2. Rotación	16
2.6.3. Extrusión	17
2.6.4. Intrusión	17
2.6.5. Tipping	18
2.6.6. Movimiento de Traslación	19
2.7. Ortodoncia Invisible	20
2.7.1. Características del Sistema	21
2.7.2. Aditamentos	22
2.7.3. Tipos de Aditamentos Convencionales	22
2.7.3.1. Elipsoidales	22

2.7.3.2. Rectangulares	23
2.7.4. Limitaciones del Tratamiento con Alineadores	23
3. Marco de Referencia	25
4. Planteamiento del Problema	26
5. Justificación	26
6. Objetivo	27
7. Objetivos Específicos	27
8. Hipótesis	27
8.1. Hipótesis Científica	27
9. Diseño	28
10. Materiales y Métodos	28
10.1. Universo de Estudio	28
10.2. Tamaño de la Muestra	28
10.3. Criterios de Selección	29
10.3.1. Criterios de Inclusión	29
10.3.2. Criterios de Exclusión	29
10.3.3. Criterios de Eliminación	29
10.4. Definición de Variables	29
10.5. Descripción de Procedimientos	30
13. Presentación de Resultados	36
14. Discusión	43
15. Conclusión	45
16. Importancia del Estudio	46
17. Referencias Bibliográficas	47

RESUMEN

INTRODUCCIÓN: El método de elementos finitos contribuye a la comprensión de la biomecánica de los dispositivos de ortodoncia, ya que permite estimar las tensiones generadas dentro de las diferentes estructuras tisulares, como el hueso alveolar, el ligamento periodontal y los dientes durante el tratamiento. **OBJETIVO:** Evaluar el comportamiento biomecánico de un canino inferior al aplicar un movimiento de inclinación mesial utilizando cuatro diferentes tipos de aditamentos en un modelo de elementos finitos. **MATERIAL Y METODO:** Estudio comparativo, abierto, observacional, prospectivo y transversal. Se utilizó un órgano dentario (canino inferior derecho) provenientes de una tomografía axial de cráneo de un paciente masculino ex vivo de entre 20 y 30 años, 4 diseños distintos de aditamentos y un alineador por modelo, que fueron diseñados mediante el Software APEX 2021, en el cual se llevó a cabo un análisis de estudios finitos, donde se realizaron las simulaciones en las que a cada canino se le aplicó una fuerza de 11.821 N. **RESULTADOS:** Se observó y analizó el desplazamiento obtenido con cada uno de los diferentes modelos de estudio, como consecuencia de la fuerza aplicada en la simulación, obteniendo así que el aditamento menos preciso para movimiento de inclinación mesial es el Double Round Wedge, por otro lado el attachment Rectangular de 5 mm, obtuvo el mayor desplazamiento mesial de la corona, su uso en conjunto con un aditamento auxiliar podría incrementar exponencialmente la predictibilidad del movimiento. **CONCLUSION:** El aditamento Rectangular de 5 mm, obtuvo el mayor desplazamiento mesial de la corona.

PALABRAS CLAVE: Inclinación Mesial, Ortodoncia, Aditamentos, Alineadores, Análisis de Elementos Finitos.

Director de Tesis

ABSTRACT

INTRODUCTION: The finite element method contributes to the understanding of the biomechanics of orthodontic devices, since it allows estimating the stresses generated within the different tissue structures, such as the alveolar bone, the periodontal ligament and the teeth during treatment. **OBJECTIVE:** To evaluate the biomechanical behavior of a lower canine when applying a mesial tilting movement using four different types of attachments in a finite element model. **MATERIAL AND METHOD:** Comparative, open, observational, prospective and cross-sectional study. A dental organ (lower right canine) was used from a skull axial tomography of an ex vivo male patient between 20 and 30 years old, 4 different designs of attachments and one aligner per model, which were designed using the APEX 2021 Software. in which an analysis of finite studies was carried out, where simulations were carried out in which a force of 11,821 N was applied to each canine. **RESULTS:** The displacement obtained with each of the different models of study, as a consequence of the force applied in the simulation, thus obtaining that the least precise attachment for mesial tilt movement is the Double Round Wedge, on the other hand the 5 mm Rectangular attachment, obtained the greatest mesial displacement of the crown, its Use in conjunction with an auxiliary attachment could exponentially increase the predictability of the movement. **CONCLUSION:** The 5 mm Rectangular attachment obtained the greatest mesial displacement of the crown

KEYWORDS: Tipping, Orthodontics, Aligners, Attachments, Finite Element Analysis.

Director de Tesis

1. INTRODUCCION

La limitación en la predictibilidad del movimiento de inclinación mesial con alineadores invisibles durante el tratamiento ortodóncico, principalmente a nivel de los dientes premolares y caninos inferiores, en los cuales por las variaciones que pueden presentar en su anatomía, configuración de hueso, edad y sexo del paciente, entre otros parámetros, ha planteado el uso de técnicas o recursos que reduzcan esta limitación de movimiento con los alineadores.

Los aditamentos son pequeñas prominencias de resina pegadas a las superficies de los dientes que facilitan los movimientos a la hora del tratamiento con alineadores invisibles, existen muchos tipos y cada uno tiene su uso específico. Pueden combinarse o usarse de manera individual dependiendo del movimiento que se quiera generar.

El Método de Elementos Finitos, es utilizado para la comprensión de la biomecánica de los dispositivos ortodóncicos, ya que permite estimar las tensiones generadas en las diferentes estructuras tisulares (hueso alveolar, ligamento periodontal y dientes) durante el tratamiento. Tiene la gran ventaja de ser un método no invasivo y preciso que nos proporciona datos cuantitativos y detallados. Del mismo modo, es posible determinar patrones de carga y desplazamiento con los alineadores y otros aparatos. Este método aplicado a las nuevas técnicas de ortodoncia permite obtener una mejor comprensión de su desempeño, con el objetivo de aumentar la predictibilidad del movimiento, contribuyendo a futuros diagnósticos y planificaciones de tratamiento.

2. ANTECEDENTES.

2.1. Análisis de Elementos Finitos

2.1.1 Historia del Método de Elementos Finitos

Se ha considerado con diversos autores que Arquímedes utilizaba un método semejante al de los elementos finitos para determinar el volumen de algunos sólidos. En 1960, Clough fue el primero en emplear el término de “Elemento finito”.

Durante los primeros años de la década de 1960, se utilizó principalmente por ingenieros, este método para obtener soluciones en problemas de análisis de esfuerzos, flujo de fluidos, transferencia de calor y otras áreas. En 1967, fue publicado el primer libro sobre elementos finitos por Zienkiewicz y Cheng.

A principios de la siguiente década, en 1970, el análisis de elemento finito se aplicó a problemas no lineales y de grandes deformaciones. En 1972, se publicó el libro de Oden sobre continuos no lineales. (Ptolomeo, 2011)

En Ortodoncia, inicialmente se estudió el comportamiento dental bajo diferentes condiciones de carga bucolingual, con un modelo bidimensional, resultando que al aumentar la angulación de la carga aumentaban los esfuerzos y las deflexiones, el centro de rotación también se movilizó hacia el eje longitudinal del diente. (Takahashi et al, 1980)

Igualmente, se ha determinado la distribución tridimensional de los esfuerzos del ligamento periodontal, utilizando aparatos fijos o removibles y se concluyó que, durante el movimiento de inclinación, se produce una variación importante de los esfuerzos desde cervical hasta el ápice radicular. (Andersen et al, 1991).

El método de elementos finitos es práctico para determinar las siguientes variables biomecánicas: Desplazamiento, deformación y esfuerzos inducidos en las estructuras vivas al aplicarles fuerzas ortopédicas.

2.1.2. Definición

El método de los elementos finitos (FEM) se basa en el principio de los trabajos virtuales que se aproximan a los de un cuerpo real; es la representación de un cuerpo o estructura por un ensamble de subdivisiones llamadas elementos. Estos elementos se interconectan a través de puntos llamados nodos, que son un conjunto de puntos que se ubican entre un elemento y otro, desplazándose de un lugar a otro cuando se aplica una fuerza y retornan a su lugar de origen cuando esta fuerza es suspendida. Con este método, se puede predecir cómo reaccionará un cuerpo ante la aplicación de fuerzas, calor, flujo de fluidos y otros efectos físicos del mundo real (Figura 1). Muestra que efectos tendrá sobre un producto o si este funcionará como se espera, para predecir qué ocurrirá cuando se utilice. La simulación computacional se utiliza para hacer análisis y mejorar la calidad de los productos o proyectos (Piccioni et al 2013).

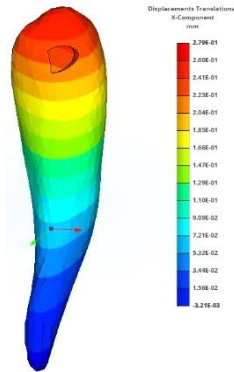


Figura 1. Resultados obtenidos al aplicar una fuerza ortodóncica a una pieza dental mediante software utilizando método de elementos finitos (APEX 2021).

El Método de Elemento Finito ha sido ampliamente utilizado en la investigación en ortodoncia, ya que es un recurso de ingeniería aplicado para calcular esfuerzo y la deformación en estructuras complejas. Con la ventaja de ser un método no invasivo y preciso que proporciona datos cuantitativos y detallados sobre las posibles

reacciones fisiológicas que pueden ocurrir en los tejidos, la aplicación del FEM permite anticipar la visualización de estas respuestas tisulares a través de la observación de áreas de esfuerzo creadas a partir de la mecánica ortodóncica (Knop et al, 2015).

2.1.3. Elemento Finito

Es una unidad que al estar adherida con otras forman una estructura (malla), estas unidades son figuras geométricas. En sus bordes se encuentran los nodos, los cuales conectan a estas unidades entre sí. Pueden ser elementos lineales (1D), como líneas o barras; elementos planos (2D), como membranas y placas; y elementos sólidos (3D) tridimensionales que pueden tener diversas formas (Trivedi S, 2014)

2.1.4. Nodo

Son un conjunto de puntos que se encuentran en los bordes de los elementos, un nodo representa a un átomo de un objeto real, pero también es una ecuación que determina el comportamiento de cada material; es decir, los nodos son los átomos virtuales contenidos en la estructura y captan las diferentes situaciones a las que se les somete a los elementos en la simulación y las traducen en ecuaciones matemáticas. Por lo que, la suma de todos los resultados que proporciona cada nodo es el resultado del análisis (Trivedi S, 2014).

2.1.5. Malla

Está formada por el conjunto de elementos que se relacionan entre sí por medio de nodos. La malla actúa como una red de la cual cada nodo presenta una prolongación o canal de información que se dirige hacia otro nodo (Trivedi S, 2014). (Figura 2).

11

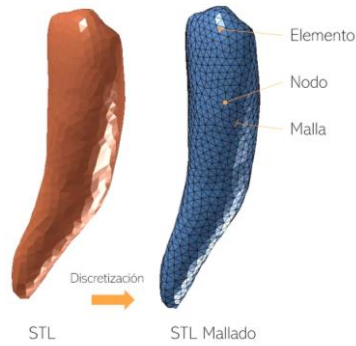


Figura 2. Discretización de un modelo STL a un modelo STL Mallado, donde se muestran sus componentes: Elemento, Nodo y Malla (APEX 2021).

2.1.6. Pasos para el Análisis de Elementos Finitos

Los pasos para realizar el análisis de elementos finitos se ejecutan a través de un software, que a su vez se divide en 3 unidades básicas:

- Pre-Procesador: Es el encargado de la entrada y/o generación del problema.
- Procesador: Se encarga del ensamblaje y resolución del sistema de ecuaciones.
- Post-Procesador: Encargado de la impresión y graficación de la solución.

Las etapas para la realización de un modelado por el método de elementos finitos son las siguientes:

A. Pre-Procesamiento

1. Dibujo detallado de la geometría.
2. Mallado de la geometría (generación de nodos y elementos finitos).

3. Aplicación de las propiedades de los materiales (Módulo de elasticidad, Límite elástico, Relación de Poisson, Densidad y otros).
4. Definición de las condiciones de frontera (Hueso, LPD).

B. Procesamiento

5. Aplicación de las cargas (Fuerzas, Momentos, Temperaturas, etc.).
6. Proceso computacional de resolver las ecuaciones para hallar la solución de la variable.

C. Post-Procesamiento:

7. Visualización de los resultados (Esfuerzos, Deformaciones, Presiones).

La confiabilidad de los resultados obtenidos puede llegar a ser hasta de un 97%, dependiendo de que la geometría del modelo a simular se reproduzca con un alto grado de precisión (Luna JC, 2017).

2.2. Digitalización de imágenes

Las aplicaciones del Método de elementos finitos en Odontología, implica la creación de un modelo virtual por computadora, con geometría y propiedades del material correctamente definidas, cargas precisas y condiciones de contorno. Estos cuatro parámetros definen esencialmente el modelo numérico y la precisión de los resultados estará directamente relacionada con ellos (Grbović et al, 2017).

Los modelos tridimensionales (3D), al ser más definidos que un modelo bidimensional (2D), se han vuelto dominantes con el desarrollo de las nuevas técnicas de imagen digital, se dispone de métodos más eficientes para la transformación directa de la información 3D de una Tomografía Computarizada (TC) (Figura 3) o la imagen de una Resonancia Magnética en modelo de elementos finitos. Los modelos sólidos de la mandíbula o dientes se pueden obtener

directamente de escáneres 3D o se pueden construir utilizando un software de diseño asistido por computadora (Grbović et al, 2017).

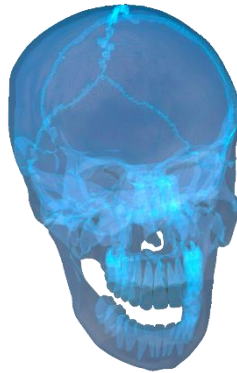


Figura 3. Tomografía de cráneo (Fuente Propia)

2.3. Análisis de Elementos Finitos en Ortodoncia

El objetivo principal de la ortodoncia es obtener la posición adecuada de los dientes en el arco dental para obtener la oclusión correcta con las mejores características funcionales y estéticas (Cai Y et al, 2015).

El análisis de elementos finitos en ortodoncia tiene como objetivo a nivel anatómico determinar los niveles de tensión y esfuerzo de los dientes, ligamentos y estructuras óseas como respuesta de los diferentes movimientos ortodónticos, es decir, nos permite conocer los límites de dichos movimientos sin la producción de daño tisular (Piccioni MAR, 2015).

La ortodoncia está cambiando gradualmente de una práctica basada en la opinión a una práctica basada en la evidencia. Es necesario tener una justificación científica para cualquier modalidad de tratamiento y la evidencia de la respuesta del tejido a la misma. El mayor progreso radica en percibir conceptos unificadores en la abundante evidencia e ideas (Luna JC, 2017).

El estudio más confiable y avanzado es el método de elementos finitos, para llevar a cabo este método experimental, es necesario utilizar un recurso con registros anatómicos y modificaciones en el software de diseño asistido por computadora (CAD) para construir modelos geoméricamente superiores y precisos (Figura 4). Para ello, es necesario construir un modelo virtual utilizando un software de procesamiento de imágenes y reconstrucción digital. En general, con respecto al complejo maxilomandibular, estas reconstrucciones se llevan a cabo mediante tomografía computarizada (Rajvinder et al 2016).

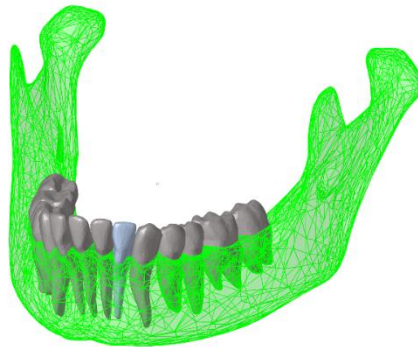


Figura 4. Proceso de segmentación de geometría a partir de una Tomografía de cráneo, donde se aislarán las piezas dentales inferiores (Abacus/CAE 2000)

2.4. Propiedades biomecánicas de los materiales

Dentro de las ciencias biológicas, muchos de los procesos son promovidos por un estímulo mecánico al hueso, ligamento y diente, estructuras complejas sometidas a estímulos mecánicos que desencadenan una respuesta biológica posterior. En ortodoncia este es uno de los principios fundamentales para poder ejercer un movimiento, por lo que estudiar la capacidad de respuesta biomecánica de las estructuras involucradas en el movimiento dental, es de suma importancia para poder sugerir una mecánica ortodóncica adecuada (Gerre, 1998).

Cada una de las estructuras dentarias (Esmalte, dentina, ligamento periodontal y hueso alveolar) tienen propiedades de la materia específicas, sus valores promedios están reportados en la literatura. Cada tipo de tejido se define como Homogéneo e Isotrópico (Tabla 1). (Begum et al, 2015).

Material	Módulo de Young, MPa	Coefficiente de Poisson
Esmalte	65.00	0.32
Dentina	15.00	0.28
Ligamento Periodontal	0.05	0.30
Hueso Alveolar	10	0.33

Tabla 1. Propiedades de las estructuras dentarias (Begum et al, 2015).

2.5. Aplicación de Fuerzas

El movimiento ortodóntico tiene lugar cuando se suministran sistemas de fuerza a los dientes, lo que da lugar a diferentes tipos de desplazamiento en el periodonto. El esfuerzo en el ligamento periodontal inicia la reacción celular, lo que resulta en la reabsorción y la aposición del hueso alveolar y conduce al desplazamiento de los dientes (Figura 5) (Rajvinder SJ et al, 2016).

Para alcanzar un movimiento ortodóntico controlado y eficiente es importante conocer el sistema de fuerzas (fuerza/momento). Si se conoce la ubicación del centro de resistencia de un diente o grupo de dientes, se puede aplicar la relación momento - fuerza correcta al sistema ortodóntico para obtener centros de rotación específicos o controlar el tipo de movimiento dental requerido. No obstante, el movimiento dental podría verse comprometido por condiciones anatómicas, tales como el volumen radicular, la implantación ósea, la edad del paciente, su complejidad ósea y su metabolismo (Geramy A et al 2016).

Existen dos teorías principales sobre el movimiento dental ortodóncico:

- Teoría bioeléctrica que atribuye el movimiento dental a cambios en el metabolismo óseo, controlados por las señales eléctricas que se generan cuando el hueso alveolar se flexiona y deforma.
- Teoría de la Presión - Tensión que comprende tres fases: Alteración del flujo sanguíneo asociado con zonas de presión y tensión en el ligamento periodontal, formación y/o liberación de mediadores químicos y la activación celular (Proffit WR et al, 2007).

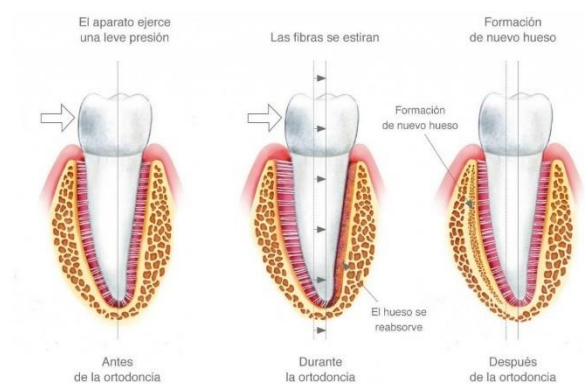


Figura 5. Secuencia de eventos provenientes de una fuerza ortodóncica aplicada sobre un diente (Carranza et al, 2003).

2.5.1. Clasificación de las fuerzas

La aplicación de fuerzas en ortodoncia se puede clasificar según su magnitud y su frecuencia:

- Según su magnitud:
 - a) Fuerzas Inocuas: Son fuerzas tan ligeras que no generan movimiento dental alguno.
 - b) Fuerzas Leves: Es aquella que, aunque mínima, produce movimiento dental. Es la ideal.

c) **Fuerzas Pesadas:** Son aquellas que, por ser tan intensas, producen hialinización en la zona de presión del ligamento periodontal inhibiendo la reabsorción ósea y evitando el movimiento dental por un largo periodo (Bica C et al, 2015).

- Según su frecuencia:

a) **Fuerzas Continuas:** Estas fuerzas son generadas por los aparatos fijos, su acción es apreciable entre cada periodo de intervalo de la visita del paciente.

b) **Fuerzas Intermitentes:** Son generadas por los aparatos removibles, la intensidad en este caso varía entre el valor deseado y la ausencia de presión.

Las fuerzas ideales para generar movimiento dentario en ortodoncia son las fuerzas ligeras y continuas (Figura 6), debido a que inhiben la formación del tejido osteoide, que es más resistente que el hueso normal y que si se generara un movimiento ortodóntico desencadenaría reabsorción radicular. Es así, que gracias a este tipo de fuerza hay una menor resistencia al movimiento y por consecuencia menor tiempo de tratamiento (Chavez SJ, 2017).

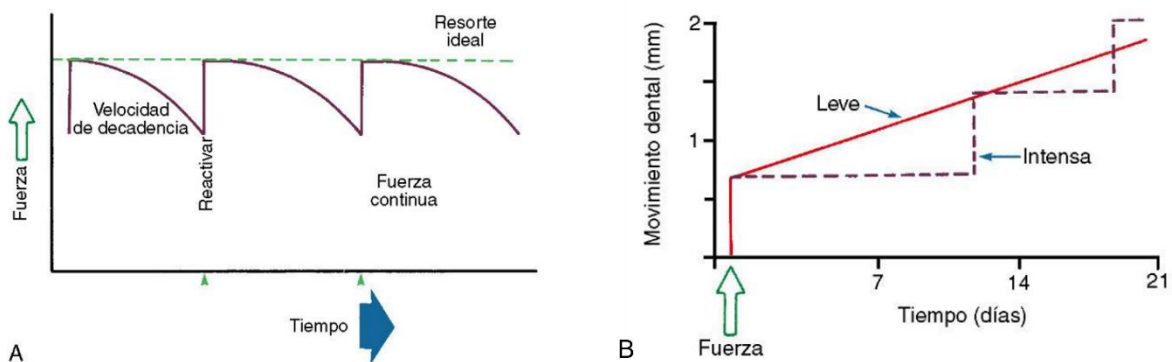


Figura 6. Representación esquemática de la decadencia de fuerzas (A) y de la evolución del tiempo del movimiento dental (B) (Proffit WR et al, 2007).

2.6 Tipos de Movimientos en Ortodoncia

2.6.1. Torque

El término de “Torque” se refiere a la inclinación buco-lingual/palatina de la raíz. Existen dos movimientos de torque: torque positivo y el torque negativo. El torque positivo (Labial) es el movimiento que inclina la raíz de un órgano dentario hacia la cortical palatina o lingual y el torque negativo (Lingual o Palatino) es el movimiento que inclina la raíz de un órgano dentario hacia la cortical vestibular (Figura 7) (Major T et al, 2011).

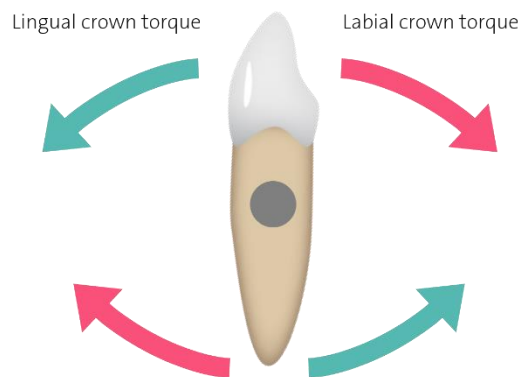


Figura 7. Torque positivo (Rojo) y Torque negativo (Verde). (Jamie L.S, 2020).

2.6.2. Rotación

Consiste en girar un diente alrededor de su eje longitudinal. La rotación pura de un diente requiere una cupla, consiste en dos fuerzas de igual magnitud que actúan en direcciones opuestas y separadas por una distancia. La dirección de la rotación se determina siguiendo la dirección de una de las fuerzas en torno del centro de resistencia, hasta el origen de la fuerza opuesta (Figura 8) (Nanda R, 1998).

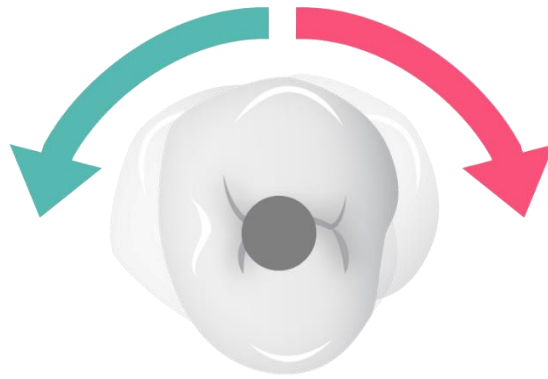


Figura 8. Movimiento de rotación, puede ser en dos sentidos. (Jamie L.S, 2020).

2.6.3. Extrusión

Es el movimiento de una pieza dentaria fuera de las estructuras de soporte (hacia el exterior del hueso). La extrusión dentaria puede llevarse a cabo con técnicas de Ortodoncia o mediante erupción forzada (Figura 9) (Nanda R, 1998).

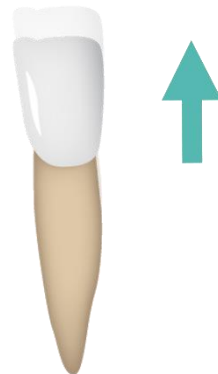


Figura 9. Movimiento de Extrusión (Jamie L.S, 2020).

2.6.4. Intrusión

Es el movimiento del diente hacia las estructuras de soporte (hacia el interior del hueso). Este tipo de movimiento ortodóncico es muy útil para mejorar la estética y también está indicada en los dientes que exista una pérdida de hueso horizontal (Figura 10) (I Torrent, J.M.U 2011).

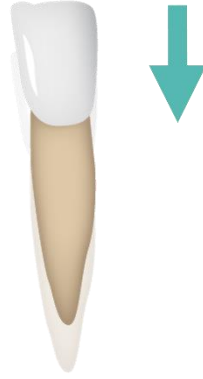


Figura 10. Movimiento de Intrusión (Jamie L.S, 2020).

2.6.5. Tipping

También llamada “Inclinación controlada” o “Tip”, es un tipo de movimiento muy deseable y se obtiene por la aplicación de una fuerza para desplazar la corona y la aplicación de un momento para controlar o mantener la posición del ápice radicular (Nanda R, 1998). La angulación varía de acuerdo con la pieza que se trate, en los órganos dentales superiores es mayor en caninos y mínima en los premolares, y en inferior es también mayor en los caninos y mínima en las piezas restantes. Se habla de una angulación positiva cuando la porción gingival del diente está situada a distal de incisal y una angulación es negativa cuando esta misma porción está situada a mesial de incisal (Figura 11) (Andrews L.F, 1972).

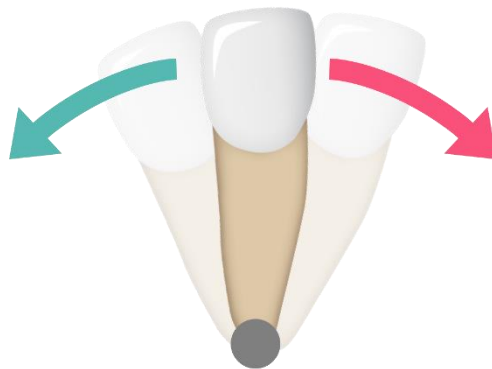


Figura 11. Inclinación positiva e Inclinación negativa (Jamie L.S, 2020).

2.6.6. Movimiento de traslación

Este tipo de movimiento se produce cuando la fuerza horizontal pasa por el centro de resistencia (punto a través del cual debe pasar una fuerza para mover un diente en forma lineal, sin rotación) de determinado diente o grupo de dientes. Se denomina movimiento de cuerpo en la dirección de la fuerza aplicada, en el cual todas las partes del cuerpo (diente), se mueven en la misma dirección (Figura 12) (Chiavini et al, 2008).

La literatura menciona que es extremadamente difícil que la fuerza atraviese exactamente por el centro de resistencia, por lo tanto, para lograr un movimiento de traslación, es importante establecer un sistema equivalente de fuerzas, es decir, que produzca el mismo efecto en el centro de resistencia de un diente incluso si se aplica directamente a la corona (Figura 13) (Caldas et al, 2014).

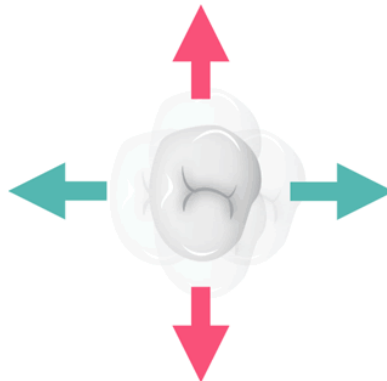


Figura 12. La traslación es mover el diente a lo largo del plano oclusal sin cambiar la orientación de su eje longitudinal (Jamie L.S, 2020).

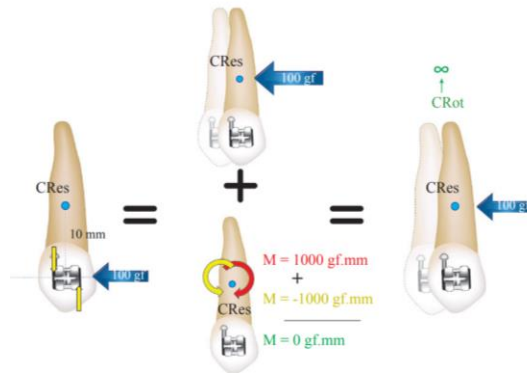


Figura 13. Ejemplo de un sistema equivalente (Caldas et al 2014).

2.7. Ortodoncia Invisible

Es una técnica ortodóncica que utiliza una serie de alineadores de plástico termoformado, personalizados y generados por un ordenador para guiar gradualmente a los dientes a su alineación adecuada (Figura 14) (Graber et al, 2006). El concepto en el que se basa este sistema data de la década de 1940. En 1945, H. D. Kesling sugirió el uso de una serie de posicionadores dentales para producir los tipos de movimientos necesarios para el tratamiento ortodóncico (Kesling, 1945). Algunos años después, Nahoum describió un método para cambiar los contornos de los dientes utilizando un plástico termoformado (Nahoum, 1964). En 1971, Pontiz introdujo un aparato de plástico termoformado afirmado que este aparato podía producir un movimiento dental limitado (Pontiz, 1971). Se continuaron introduciendo y modificando técnicas hasta que Hilliard y Sheridan desarrollaron técnicas con una serie de alicates especiales termoformados diseñados para mejorar movimientos específicos (Hilliard et al 2000).



Figura 14. Alineador plástico termoformado (Graber et al, 2006)

2.7.1. Características del sistema

Los alineadores son extraíbles y están hechos de Poliuretano de 0.75 mm de grosor. Los pacientes deben usar un alineador por un periodo aproximado de 2 semanas (dependerá de las indicaciones del Doctor) y luego cambiar al siguiente. Cada alineador está programado para producir un movimiento preciso en un diente de aproximadamente 0.25 – 0.33 milímetros. El Sistema utiliza aditamentos para permitir un correcto anclaje y alcanzar los movimientos ortodóncicos deseados. (Marzieh 2013).

El tratamiento comienza con la toma de impresiones precisas o con el escaneo 3D de modelos de estudio o de la boca del paciente. Los estudios (Modelos, radiografías panorámica y cefálica lateral y fotografías) se envían a una plataforma digital con un formulario de planificación. Después de realizar un minucioso análisis sobre la posición final propuesta, los movimientos dentales intermedios y los ajustes, se procede a la aprobación del tratamiento. Una vez aprobado, se fabrica un conjunto de alineadores de plástico transparente. Estos alineadores se empaquetan y marcan individualmente para luego ser enviados al ortodoncista respectivo (Meyer et al, 2003).

2.7.2. Aditamentos

Los aditamentos son pequeñas prominencias de composite pegadas a las superficies de los dientes que aumentan las áreas retentivas o facilitan movimientos específicos (Figura 15) (Graber et al 2006).

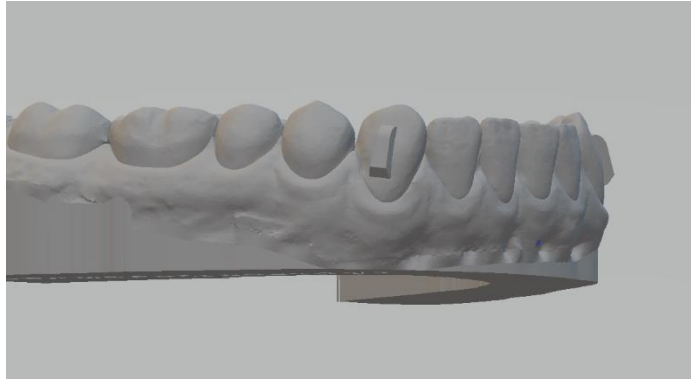


Figura 15. Archivo STL donde se observa un canino inferior derecho con aditamento rectangular de 5 milímetros (Aliwell®, 2021).

2.7.3 Tipos de aditamentos convencionales

2.7.3.1 Elipsoidales

Se utilizan para desrotaciones cuando se indican solos y para movimientos de raíz cuando se usan en pareja. Tienen 3 mm de alto, 2 mm de ancho, 0,75 a 1 mm de grosor y están disponibles para incisivos, caninos y premolares (Figura 16) (Hennessy et al, 2016)



Figura 16. A. Double Round Wedge **B.** Round Wedge (Aliwell®, 2021)

2.7.3.2. Rectangulares

Estos aditamentos se usan cuando se solicitan movimientos mesio – distales grandes. Estos son de 3, 4 o 5 mm de alto, 2 mm de ancho y 0.5 a 1 mm de espesor. Además, también pueden ser biselados para favorecer que se produzca un movimiento en concreto y para facilitar la desinserción de los alineadores si fuese necesario en algún caso concreto (Figura 17) (Hennessy et al, 2016).



Figura 17. A. Rectangular 3 mm **B.** Rectangular 5 mm (Aliwell®, 2021)

2.7.4. Limitaciones del tratamiento con alineadores

Aunque los alineadores se han citado como un procedimiento de Ortodoncia seguro, estético y cómodo para los pacientes desde edades tempranas, pocas

investigaciones se han centrado en la previsibilidad del movimiento dental, ya que hay datos limitados sobre la cantidad de discrepancia entre los movimientos logrados previstos y reales con los alineadores (Rossini et al, 2015).

Entre las limitaciones para corregir ciertos movimientos se encuentran la extrusión, corrección de rotaciones severas, la verticalización de los molares y el cierre de espacios de extracción, siendo más difíciles de lograr, esto asociado a la complejidad de la maloclusión (Guerra et al, 2014).

Otra limitación que puede afectar el éxito del tratamiento es la experiencia del profesional, ya que se debe seleccionar el caso ideal según la pericia del clínico para determinar los objetivos, por ende, que estén dentro de las posibilidades biomecánicas prescritas por el sistema. Así como también la forma y la continuidad del uso de los alineadores están relacionados con el compromiso que tiene el paciente con su tratamiento, ya que a menor uso menor efectividad (Robertson, 2020).

3. MARCO DE REFERENCIA.

3.1. En este estudio, se evaluó la eficacia del movimiento dental con alineadores removibles. La muestra se conformó por 37 pacientes, donde se midieron un total de 400 piezas dentales en modelos virtuales. Se comparó la cantidad de movimiento dental predicha con la lograda después del tratamiento. Se estudiaron 7 diferentes tipos de movimiento (expansión, constricción, intrusión, extrusión, inclinación mesiodistal, torque labiolingual y rotación). En sus resultados, obtuvieron que el movimiento más exacto fue la constricción lingual y el movimiento menos exacto fue la extrusión, seguido de la inclinación mesiodistal de caninos mandibulares. En su momento concluyeron que hay mucho que aprender acerca de la biomecánica y eficacia de los alineadores, ya que, al tener una mejor comprensión, se puede guiar correctamente la secuencia de movimientos y reducir la necesidad de refinamientos. (Kravitz et al, 2009).

3.2. Este estudio evaluó la predictibilidad de los alineadores invisibles para mover a los dientes a las posiciones planificadas. Se seleccionaron 16 pacientes adultos y se analizaron un total de 345 piezas en pre y post tratamiento como se previó en el Set Up digital. Los movimientos que se analizaron para cada tipo de diente fueron: rotación, inclinación mesiodistal e inclinación vestibulolingual, para identificar la precisión de cada tipo de movimiento. En los resultados, la rotación y el movimiento de inclinación mesiodistal fue la menos eficaz en caninos inferiores. Se concluyó que, sin el uso de auxiliares, los alineadores no pueden lograr un movimiento programado con una previsibilidad del 100%. (Lombardo et al, 2017).

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

¿Cuál tipo de aditamento da una mayor predictibilidad de generar un movimiento de inclinación mesial en un canino inferior?

5. JUSTIFICACIÓN.

Actualmente los dos aspectos más importantes para los pacientes que están por iniciar un tratamiento de ortodoncia, son que este sea discreto y el tiempo. Es fundamental que la duración del tratamiento sea lo más breve posible para garantizar la cooperación y satisfacción del paciente. Los alineadores transparentes han sido un gran avance para el tratamiento ortodóncico, ya que permiten aplicar fuerzas y realizar movimientos sobre los dientes que queremos tratar de la misma forma que los aparatos convencionales; con la diferencia que estos mejoran el estilo de vida de los pacientes.

Un tema que se explora con frecuencia en la literatura es el movimiento de los caninos inferiores, ya que por sus características anatómicas (raíz larga y fuerte, desgaste progresivo por la edad o hábitos) los hacen las piezas dentales con menor predictibilidad de movimiento al momento de planear un tratamiento de ortodoncia con alineadores. Para el profesional, es vital conocer la predictibilidad de los movimientos ortodóncicos que puede conseguir en el paciente con la ayuda de los alineadores, para así garantizar un éxito del tratamiento de ortodoncia. Además, debe distinguir que movimientos muestran una mayor eficiencia y saber cuáles necesitarían una sobre corrección durante el tratamiento, cuáles necesitarían el apoyo de elementos auxiliares para obtener una mayor eficacia del movimiento y, por ende, reducir el tiempo de tratamiento.

El método de elementos finitos contribuye a la comprensión de la biomecánica de los dispositivos de ortodoncia, ya que permite estimar las tensiones generadas dentro de las diferentes estructuras tisulares, como el hueso alveolar, el ligamento periodontal y los dientes durante el tratamiento.

El propósito de este estudio será evaluar el efecto biomecánico de los caninos inferiores al aplicar un movimiento de inclinación mesial, utilizando cuatro diferentes tipos de aditamentos en el tratamiento con alineadores, por medio de un análisis de elementos finitos. Con el objetivo de encontrar la mejor manera de realizar este movimiento y que la predictibilidad del movimiento en estas piezas, sea lo menos limitado posible, contribuyendo a futuros diagnósticos y planificaciones de tratamiento.

6. OBJETIVO.

Evaluar el comportamiento biomecánico de un canino inferior al aplicar un movimiento de inclinación mesial utilizando cuatro diferentes tipos de aditamentos en un modelo de elementos finitos.

7. OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Elaborar un modelo de elementos finitos de un canino inferior derecho.
- Construir una serie de modelos con las diferentes configuraciones de aditamentos.
- Simular los modelos con un desplazamiento de 0.25 mm y una fuerza de 11.821 N.
- Identificar con qué tipo de aditamento se logra un mayor desplazamiento.

8. HIPÓTESIS.

8.1. Hipótesis Científica

Existen diferencias en el comportamiento biomecánico de los caninos inferiores utilizando cuatro diferentes aditamentos al aplicar un movimiento de inclinación mesial.

9. DISEÑO.

Estudio comparativo, abierto, observacional, prospectivo y longitudinal.

10. MATERIALES Y MÉTODO.

10.1. Universo de estudio.

Se utilizó un órgano dentario (canino inferior derecho) proveniente de una tomografía axial de cráneo de un paciente masculino ex vivo de entre 20 y 30 años, cuatro diseños distintos de aditamentos y un alineador por cada modelo, que fueron diseñados mediante el Software APEX 2021 y donde se llevó a cabo un análisis de estudios finitos.

10.2. Tamaño de la muestra.

Se realizó el estudio a partir de un órgano dentario (canino inferior derecho) proveniente de una tomografía axial de cráneo de un paciente masculino ex vivo de entre 20 y 30 años, con un adecuado nivel de hueso y proporción corona raíz.

Forma de asignación de los casos a los grupos de estudio:

Aleatorio Simple

Se realizaron 4 grupos de interacción alineador / órgano dentario (Tabla 2):

Órgano Dentario	Alineador	Fuerza
Canino inferior derecho	Double Round Wedge	11.821 N
	Simple Round Wedge	
	Rectángulo 3 mm	
	Rectángulo 5 mm	

Tabla 2. Grupos de interacción alineador / órgano dentario (Fuente propia)

10.3. Criterios de selección:

10.3.1. Criterios de Inclusión.

- Mapeo de la unidad dentoalveolar del canino inferior derecho.
- Mapeo de los cuatro diseños de aditamentos.
- Mapeo de los cuatro diseños de alineadores.

10.3.2. Criterios de exclusión.

- Mapeo deficiente de la unidad dentoalveolar del canino inferior derecho.
- Mapeo deficiente de los cuatro diseños de aditamentos
- Mapeo deficiente de los cuatro diseños de alineadores

10.3.3 Criterios de eliminación.

- Mapeo deteriorado de la unidad dentoalveolar del canino inferior derecho.
- Mapeo deteriorado de los cuatro diseños de aditamentos
- Mapeo deteriorado de los cuatro diseños de alineadores

10.4. Definición de variables (Tabla 3).

Independientes		Dependientes	
<i>Variable</i>	<i>Escala</i>	<i>Variable</i>	<i>Escala</i>
Órgano dentario	Nodo Cuantitativa Discreta	Tensión	MPa Cuantitativa Continua
Aditamentos	Nodo Cuantitativa Discreta	Desplazamiento	URES mm Cuantitativa Continua

Tabla 3. Definición de variables Independientes y Dependientes (Fuente propia)

10.5. Descripción de procedimientos.

Se ingresó la tomografía de cráneo en formato STL al Software ABAQUS/CAE 2020, este formato es necesario para poder ingresar las imágenes 3D en la simulación y análisis de elementos finitos (Figura 18).



Figura 18. Archivo STL de Cráneo ex vivo (ABAQUS/CAE 2020)

Una vez ingresado, se procedió a aislar los órganos dentarios inferiores de la tomografía de cráneo (Figura 19).

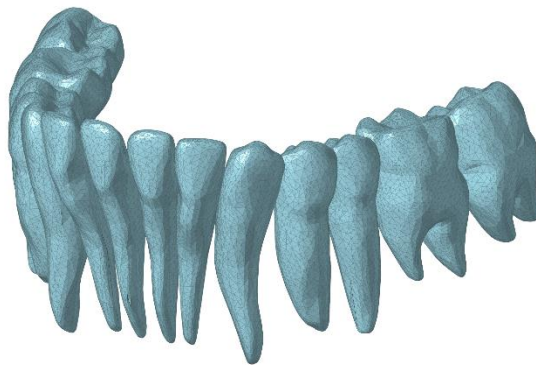


Figura 19. Órganos dentarios inferiores aislados (ABAQUS/CAE 2020)

Se realizó el aislamiento del órgano dentario (Canino inferior derecho), ya que en esta pieza se llevará a cabo la investigación (Figura 20).



Figura 20. Canino inferior derecho aislado.

Los aditamentos utilizados para el estudio se trabajaron en conjunto con la compañía Aliwell SA de CV (Aliwell®), donde mediante su Software se posicionaron en el lugar más preciso para generar un movimiento de inclinación mesial. Los aditamentos utilizados son: Double Round Wedge (Figura 21), Rectangular 3 mm (Figura 22), Rectangular 5 mm (Figura 23) y Simple Round Wedge (Figura 24).

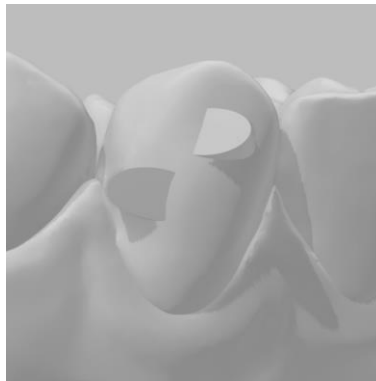


Figura 21. Canino inferior derecho con aditamento Double Round Wedge (Aliwell®, 2021)



Figura 22. Canino inferior derecho con aditamento Rectangular 3 mm
(Aliwell®, 2021)

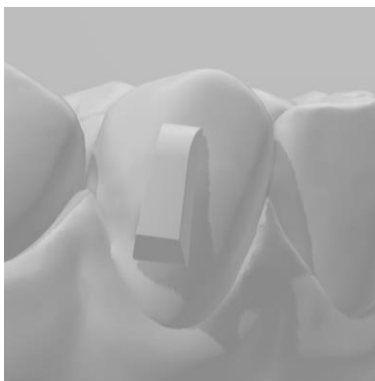


Figura 23. Canino inferior derecho con aditamento Rectangular 5 mm
(Aliwell®, 2021)



Figura 24. Canino inferior derecho con aditamento Simple Round Wedge
(Aliwell®, 2021)

Se procesaron las geometrías convirtiéndolas de formato STL a formato Parasolid x_t. Dichas geometrías fueron procesadas en el paquete APEX 2021 (Figura 25).



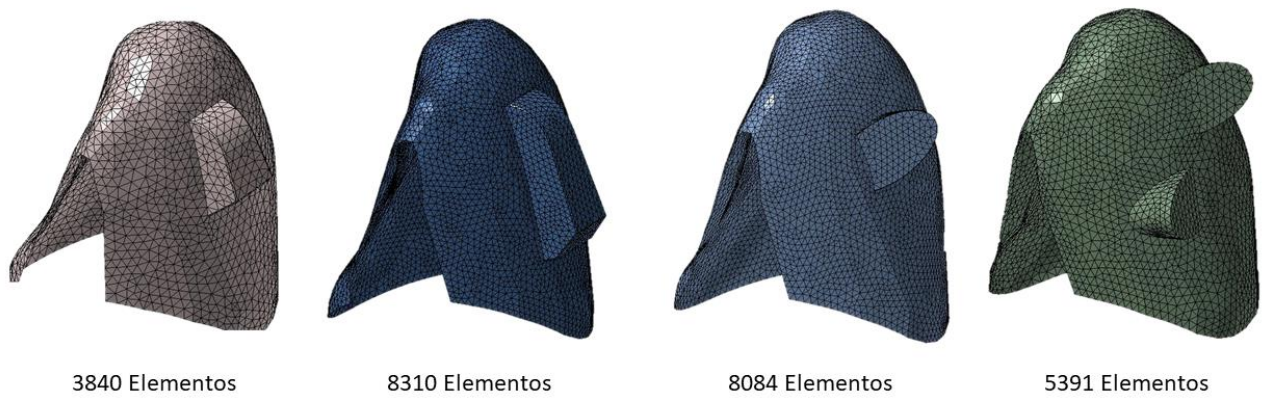
Figura 25. Modelos procesados en formato Parasolid (APEX, 2021)

A continuación, se realizó el mallado de cada uno de los componentes. Debido a la complejidad de las piezas, se utilizaron mallados tetraédricos de segundo orden, para el canino inferior se obtuvieron 9621 elementos. (Figura 26).



Canino Inferior derecho

Figura 26. Mallado de Canino inferior derecho (APEX, 2021)



En el mallado de los aditamentos, el número de elementos para cada aditamento fue de 21727 elementos para el Rectangular de 3 mm, 73413 para el Rectangular de 5 mm, 23050 para el Simple Round Wedge y 22589 para el Double Round Wedge (Figura 27).

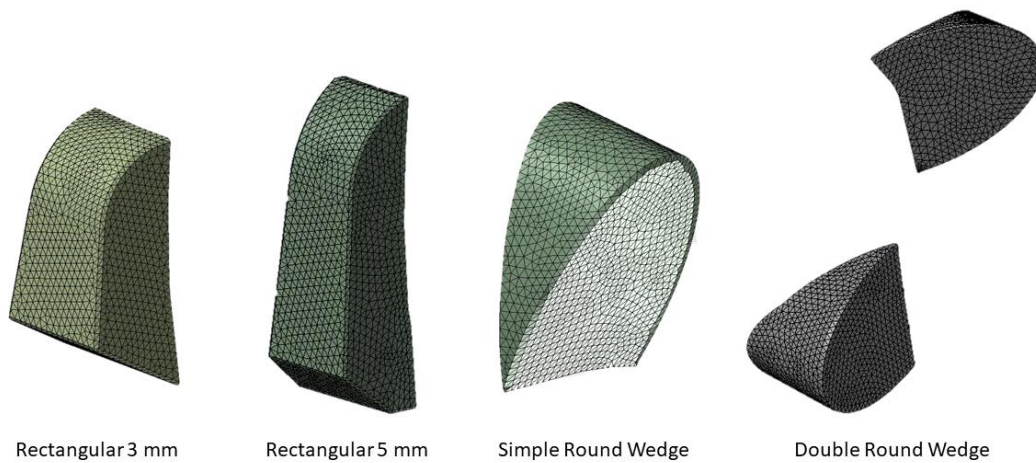


Figura 27. Mallado de aditamentos (APEX, 2021)

El alineador fue mallado con elementos tipo Shell para simplificar el estudio (Figura 28).

Figura 28. Mallado de alineadores con sus respectivos elementos (APEX, 2021)

Se asignaron las propiedades mecánicas a los materiales para ingresarlos al sistema de simulación (Tabla 4):

Material	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson
Diente	19600.00	0.30
Alineador	528.00	0.36
Aditamento	12500	0.36

Tabla 4. Propiedades mecánicas de los materiales.

Se establecieron las condiciones de frontera a cada uno de los ensambles (Figura 29).

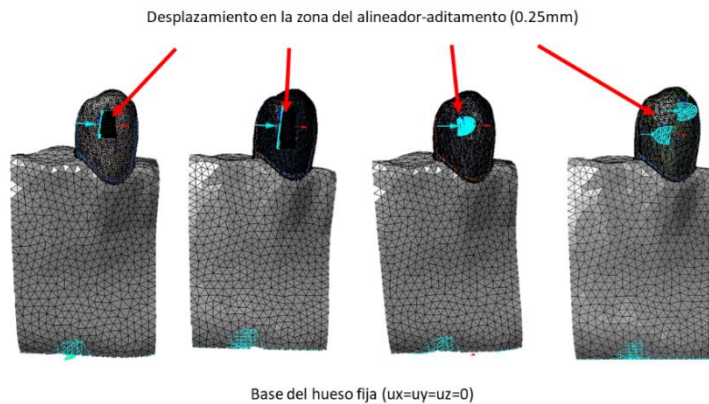


Figura 29. Establecimiento de condiciones frontera (Apex, 2021)

La investigación fue sin riesgo por lo que no fue necesario hacer un consentimiento informado.

13. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Se realizaron las simulaciones en las que a cada canino se le aplicó una fuerza de 11.821 N a los aditamentos diseñados (Figura 30, 31, 32, 33).

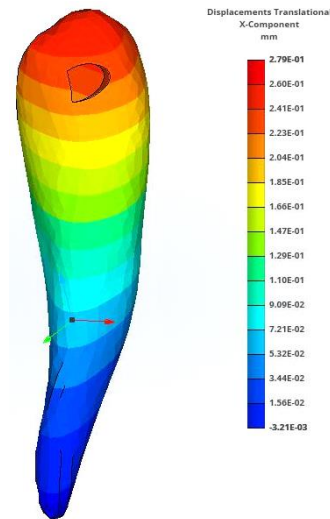


Figura 30. Resultados de desplazamiento con aditamento Simple Round Wedge (Apex, 2021)

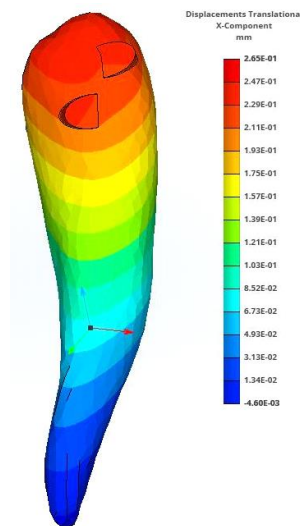


Figura 31. Resultados de desplazamiento con aditamento Double Round Wedge (Apex 2021)

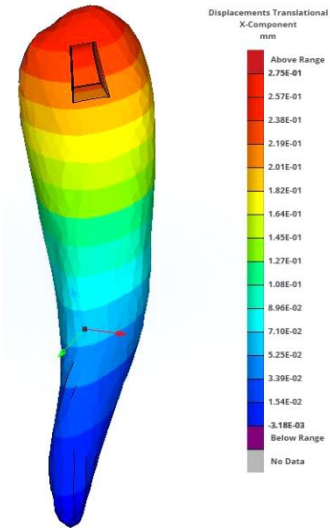


Figura 32. Resultados de desplazamiento con aditamento Rectangular 3 mm
(Apex, 2021)

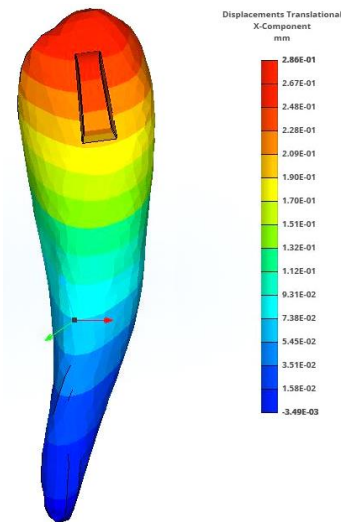


Figura 33. Resultados de desplazamiento con aditamento Rectangular 5 mm
(Apex, 2021)

Se utilizó estadística descriptiva, mediante la evaluación de los valores máximos y mínimos obtenidos resultantes de la simulación de APEX 2021, los cuales fueron descritos y expresados en tablas por grupos para su posterior análisis. (Tabla 5, 6 y 7).

Órgano Dentario	Aditamento	Desplazamiento Positivo (mm)
Canino Derecho Inferior	Simple Round Wedge	0.279
	Double Round Wedge	0.265
	Rectangular 3 mm	0.275
	Rectangular 5 mm	0.286

Tabla 5. Resultados máximos de desplazamiento (Fuente propia)

Órgano Dentario	Aditamento	Desplazamiento Negativo (mm)
Canino Derecho Inferior	Simple Round Wedge	-0.321
	Double Round Wedge	-0.460
	Rectangular 3 mm	-0.318
	Rectangular 5 mm	-0.349

Tabla 6. Resultados mínimos de desplazamiento (Fuente propia)

Órgano Dentario	Aditamento	Diferencia entre desplazamientos (mm)
Canino Derecho Inferior	Simple Round Wedge	-0.042
	Double Round Wedge	-0.195
	Rectangular 3 mm	-0.043
	Rectangular 5 mm	-0.063

Tabla 7. Diferencia que existe entre lo obtenido en desplazamiento positivo y desplazamiento negativo (Fuente propia).

El aditamento Rectangular de 5 mm obtuvo un desplazamiento mesial de 0.286 mm, siendo el máximo resultante en comparación de los otros aditamentos, en segundo lugar, 0.279 mm con el aditamento Simple Round Wedge, seguido sin mucha diferencia por el aditamento Rectangular de 3 mm que genero un desplazamiento de 0.275 mm y en último lugar 0.265 mm con el aditamento Double Round Wedge.

En los resultados negativos de desplazamiento, el aditamento Double Round Wedge obtuvo un resultante de -0.460 mm, -0.349 mm con el aditamento Rectangular 5 mm, el aditamento Simple Round Wedge -0.321 mm y por último el aditamento Rectangular 3 mm generó un desplazamiento negativo de -0.318.

Se calculó la diferencia que existe entre los desplazamientos positivos y negativos, dando como resultado -0.195 mm con el aditamento Double Round Wedge, -0.063 mm con el aditamento Rectangular de 5 mm, -0.43 mm con el aditamento Rectangular 3 mm y -0.42 mm con el aditamento Simple Round Wedge.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la simulación de modelos, el aditamento Rectangular de 5 mm fue el que logró generar un mayor desplazamiento mesial en el tercio coronal, pero en cuanto al desplazamiento negativo fue el que obtuvo el segundo valor más elevado, esto quiere decir que, aunque haya presentado un desplazamiento coronal superior a los demás aditamentos, en su extremo apical se

muestra una pérdida de anclaje considerable, aun así podría ser el aditamento más preciso para el movimiento de traslación mesial en conjunto con auxiliares que limiten el movimiento negativo de la raíz o que generen también un movimiento mesial de la raíz, esto dependiendo de los objetivos de tratamiento del Ortodoncista.

El aditamento Double Round Wedge fue en donde se obtuvo un mayor desplazamiento negativo apical (-0.460 mm) y menor desplazamiento coronal positivo (0.265 mm) generando la mayor diferencia entre ambos desplazamientos y lo pudimos considerar el aditamento menos preciso para movimiento de tipo mesial. Ya que no cumpliría con el objetivo de generar un movimiento de mesialización en los caninos mandibulares, su uso podría destinarse en situaciones que se desee distalizar o generar una inclinación distal.

En cuanto a los aditamentos Simple Round Wedge y Rectangular 3 mm, se obtuvieron resultantes promedio, se generó un movimiento mesial considerable (0.275 mm y 0.279 mm respectivamente) y el movimiento de desplazamiento negativo fue medio (-0.321 mm y -0.318 mm respectivamente), generando una diferencia de desplazamientos mínima, de -0.42 mm para Simple Round Wedge y -0.43 mm para Rectangular 3 mm, lo que podría hacerlos aditamentos de elección para realizar este movimiento al hacerlo de manera más controlada.

Analizando el efecto que tiene la distribución de la fuerza aplicada en cada aditamento y como se trasmite al tercio coronal del órgano dentario correspondiente de cada modelo, podemos observar como en el modelo del aditamento Rectangular de 5 mm (Figura 34) existe una mayor distribución de la fuerza a lo largo de la corona, precisando así que el movimiento se reproduzca de una manera más limpia, sin generar mayor tensión y permitiendo generar un movimiento más predecible.



Figura 34. Zonas de tensión en el modelo del aditamento Rectangular 5 mm
(Apex 2021)

Por otro lado, al momento de hacer la simulación en el modelo del aditamento Double Round Wedge, que es donde hubo menor predictibilidad de movimiento y generación de este, los aditamentos están rodeados de un mayor estrés, provocando así que el órgano dentario no pueda reproducir por completo el movimiento prescrito y dando por resultado un mayor movimiento negativo al deseado.



Figura 35. Zonas de tensión en el modelo del aditamento Double Round Wedge
(Apex, 2021)

En los dos modelos restantes, de los aditamentos Rectangular de 3 mm y Simple Round Wedge, los aditamentos están en una zona media de tensión. En los

resultantes de desplazamiento, ambos obtuvieron niveles similares, en el cual a menor cantidad si generó un movimiento de inclinación mesial, pero sin ser considerable, ya que también causo un movimiento apical de la raíz de igual manera sin ser considerable. Esto puede ser por la poca retención que existe entre el aditamento, el alineador y la cantidad de órgano dentario a mover.

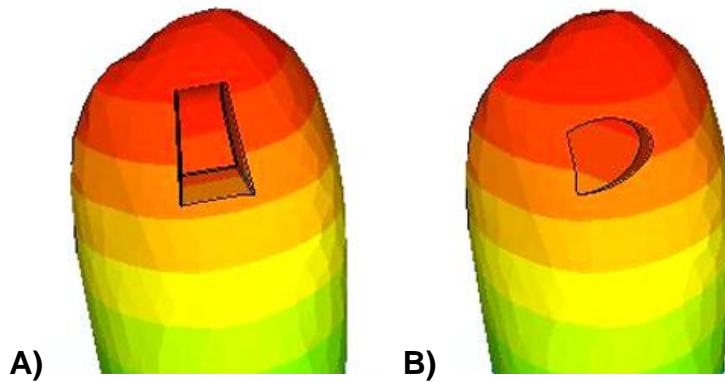


Figura 36. Zonas de tensión en los modelos de los aditamentos
A) Rectangular 3 mm y **B)** Simple Round Wedge (Apex, 2021)

14. DISCUSIÓN

Kravitz et al (2009) y Lombardo et al (2017), en sus investigaciones obtuvieron que el movimiento de inclinación mesial y rotaciones en caninos inferiores son los menos precisos, haciendo referencia a que podría ser por el tamaño de su raíz, ya que es la más larga en la cavidad oral. Esto se pudo observar en el análisis de los modelos, ya que a mayor aditamento sobre la superficie coronal del órgano se genera un mayor movimiento dental. En los modelos de los aditamentos pequeños tal como el Rectangular de 3 mm y el Simple Round Wedge, fue donde hubo menor cantidad de movimiento dental y lo atribuyo a que es por la poca retención que existe entre el aditamento, alineador y cantidad de órgano dentario, un aditamento más amplio, en este caso como el Rectangular de 5 mm que cubre más superficie dentaria podría ser más proporcional para aumentar la predictibilidad de movimiento en estas piezas que cuentan con una raíz más alargada.

Otro punto que hay que resaltar de estos estudios, es que mencionan que sin el uso de aditamentos optimizados lo alineadores no pueden lograr un movimiento programado, o si lo generan tardaran más del tiempo deseado en hacerlo. Estas observaciones difieren por los autores mencionados, ya que el aditamento que más movimiento nos genero fue un aditamento convencional Rectangular de 5 mm, pudiera ser que no se produzca en el tiempo estimado por las cuestiones que pueden influir en el movimiento dental antes descritas, pero en la actualidad existen aditamentos accesorios (elásticos, botones, mini implantes, etc.) con los cuales se puede hacer estrategia y lograr que el movimiento se realice en un menor tiempo de lo planeado, dentro de los límites biológicos.

Kravitz et al (2008) realizó una investigación donde comparaba el uso de reducción interproximal (IPR) y sin aditamentos, así como utilizando únicamente aditamentos específicos. Como resultado obtuvo que no existían diferencias significativas en la precisión del movimiento en caninos inferiores al utilizar ya sea un aditamento o suficiente IPR. Menciono que en su estudio el aditamento elipsoidal vertical fue el que marco una mayor mejoría en el movimiento a comparación de no utilizar ningún aditamento o los otros mencionados en su estudio. En este estudio de igual manera

se obtuvo que con un aditamento elipsoidal (Simple Round Wedge) y sin ayuda de algún auxiliar se puede conseguir un movimiento de tipo mesial considerable sin presentar mayor movimiento indeseable en la zona apical. Esto dependerá de las prescripciones del Doctor, ya que en ocasiones también es necesario generar algo de movimiento apical para cumplir con los objetivos de tratamiento.

15. CONCLUSION

Se comprueba la Hipótesis Científica que “Existen diferencias en el comportamiento biomecánico de los caninos inferiores utilizando cuatro diferentes aditamentos al aplicar un movimiento de inclinación mesial”.

Se elaboro un modelo de elementos finitos de un canino inferior derecho, con el cual se construyó una serie de cuatro modelos con las diferentes configuraciones de aditamentos y cada uno con su alineador correspondiente.

Se realizo la simulación en el Software APEX 2021, con un desplazamiento de 0.25 mm y aplicando una fuerza de 11.821 N a cada uno de los cuatro modelos, obteniendo así los valores máximos y mínimos resultantes para su análisis.

El aditamento menos preciso para movimiento de inclinación mesial es el Double Round Wedge, ya que genero el menor desplazamiento positivo de la corona y mayor desplazamiento apical negativo.

El aditamento Rectangular de 5 mm obtuvo el mayor desplazamiento mesial de la corona, su uso en conjunto con un aditamento auxiliar podría incrementar exponencialmente la predictibilidad del movimiento y en caso de querer generar un movimiento mesial controlado, sería la mejor opción.

16. IMPORTANCIA DEL ESTUDIO

Como se mencionó anteriormente, actualmente se busca rapidez y éxito en los tratamientos planeados con softwares de alineadores, es de suma importancia transmitir desde un principio como es que queremos lograr un movimiento sin que este pudiera complicarse o alentarse y tener que usar aditamentos accesorios para poder compensar la falta de movimiento y así reducir el número de refinamientos en casos que no pueden concluirse, ya que esto genera un costo extra, tiempo de consulta y en ocasiones molestias a los pacientes.

Actualmente existen herramientas muy sofisticadas de estudio en tercera dimensión, las cuales se pueden aprovechar para investigar y mejorar las técnicas de trabajo en la Ortodoncia.

El movimiento en Ortodoncia es un tema multifactorial. Hay muchos parámetros que pueden afectar la capacidad de alcanzar un objetivo planeado durante el tratamiento. En este estudio, no se pudieron tomar en cuenta diversas anatomías de coronas, longitudes de raíces y densidades óseas, que son parámetros muy importantes de evaluar al momento de aplicar una fuerza deseada. Además, las características del material, grosor y el protocolo de tratamiento, pueden afectar la eficiencia del movimiento de Ortodoncia. El estudio se hubiera beneficiado al tener una muestra más amplia en donde se pudieran comparar los parámetros descritos anteriormente. También, solo se analizó el comportamiento del órgano dentario a una sola aplicación de fuerza, el darle mayor tiempo de exposición a la transición del movimiento y la fuerza habría dado una respuesta mayor fundamentada sobre el funcionamiento de cada uno de los aditamentos y la respuesta del órgano dentario a cada uno de ellos. Se sugiere tomar en cuenta estos parámetros para futuras investigaciones.

17. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

Academy A, Rest E. Regeneration of periodontal tissues : cementogenesis revisited. 2006;41(244):196–217.

Andersen K. L., Pedersen E.H., Melsen B. Material parameters and stress profiles within the periodontal ligament. Am J Orthod Dentof Orthop 1991; 99: 427-444

Andrews, L. F. (1972). The six keys to normal occlusion. Am J Orthod, 62(3), 296-309.

Arismendi E, Ocampo ZM, Morales M, González FJ, Jaramillo PM, Sánchez A. Evaluación de la estabilidad de los mini implantes como anclaje óseo para intrusión de molares superiores/ Evaluation of stability of mini implants as bony anchorage for upper molar intrusión. Rev Fac Odontol Univ Antioq. 2007; 19 (1): 60-74.

Begum MS, Dinesh MR, Kenneth FH, Vani J, Khalid K, Varun PS. Construction of a threedimensional finite element model of maxillary first molar and it's supporting structures. J Pharm Bioallied Sci. 2015; 7(2): 443–450.

Bica C, Brezeanu L, Bica D, Suciú M. Biomechanical reactions due to orthodontic forces. A finite element study. Procedia Tech. 2015;19:895–900.

Boyd, RL., (2007) Predictability of successful orthodontic treatment using Invisalign. The Greater Philadelphia Society of Orthodontists page. Available at: http://www.gpsso.org/events/2003_outline.pdf. Accessed September 1, 2007

Cai Y, Yang X, He B, Yao J. Finite element method analysis of the periodontal ligament in mandibular canine movement with transparent tooth correction treatment. BMC Oral Health. BMC Oral Health; 2015;15(1):106.

Caldas SGFR, Ribeiro AA, Simplício H, Machado AW. Segmented arch or continuous arch technique? A rational approach. Dental Press J Orthod. 2014;19(2):126-141.

Chavez SJ. Análisis de Elementos Finitos en Ortodoncia. Monografía. Lima: Universidad Inca Garcilaso de la Vega; 2017.

Chiavini paulo cesar raveli, Ortellado G. Manual da Técnica do Arco Segmentado. 2008:348.

Chisari, Justin R.; McGorray, Susan P.; Nair, Madhu; Wheeler, Timothy T. (2014). Variables affecting orthodontic tooth movement with clear aligners. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 145(4), S82–S91.

Geramy A, Tanne K, Moradi M, Golshahi H, Farajzadeh Jalali Y. Finite element analysis of the convergence of the centers of resistance and rotation in extreme moment-to-force ratios. *Int Orthod. Elsevier Masson SAS*; 2016;14(2):161–70.

Gerre y Timoshenko; “Resistencia de Materiales”; 1998. International Thomson editores.

Gómez de F, Campos M. *Periodoncia de Protección: Encía y unión dentogingival*, 2009

Gottlieb B: *Biology of the cementum*. *J Periodontol* 1942; 17:7.

Graber, Thomas M.; Vanarsdall, Robert L.; VIG, Katherine WL. *Ortodoncia: principios y técnicas actuales*. 2006.

Grbović A, Mihajlović D. Practical Aspects of Finite Element Method Applications in Dentistry. *Balk J Dent Med*. 2017; 21: 69-7

Guerra, J. F. P., Marin, H., & Echeverri, N. (2014). Alineadores una opción en ortodoncia estética, revisión de literatura. *Ortodoncia*, 7(8), 14

Harzer W, Bourauel C, Gmyrek H. Torque capacity of metal and polycarbonate bracket with and without a metal slot. *European Journal of Orthodontics* 26 (2004)435-441.

Hennesy J, Al-Awadhi EA: 2016. Clear aligners generations and orthodontic tooth movement. *Journal of Orthodontics*. Vol 43(1):68-76.

Hignio A, Margarita Z. Cementum proteins: role in periodontium formation and regeneration. *Periodontology* 2000, 2015;67:211–233.

Hilliard K, Sheridan JJ. Adjusting Essix appliance at chairside. *J Clin Orthod*. 2000;34(4):236.

I Torrent, J. M. U. (2011). *Manual de ortodoncia (Vol. 46)*. Edicions Universitat Barcelona.

Jimenez PA. *Principios del Método de Análisis por Elementos Finitos y Descripción de Algor Fea* (2019). Universidad de las Américas Puebla. P 19-52.

Kesling HD. The philosophy of tooth positioning appliance. *Am J Orthod.* 1945;31:297-304.

Knop, L., Gandini, L. G., Jr, Shintcovsk, R. L., & Gandini, M. R. (2015). Scientific use of the finite element method in Orthodontics. *Dental press journal of orthodontics*, 20(2), 119–125.

Könönen M, Klemetti E, Waltimo A, Ahlberg J, Evälahti M, Kleemola-Kujala E, Nyström M. Tooth wear in maxillary anterior teeth from 14 to 23 years of age. *Acta Odontol Scand.* 2006 Feb;64(1):55-8.

Kravitz, Neal & Kusnoto, Budi & Agran, Brent & Viana, Maria. (2008). Influence of Attachments and Interproximal Reduction on the Accuracy of Canine Rotation with Invisalign. *The Angle orthodontist.* 78. 682-7.

Kravitz ND, Kusnoto B, BeGole E, Obrez A, Agran B: 2009. How well does Invisalign work? A prospective clinical study evaluating the efficacy of tooth movement with Invisalign. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics.* Vol 135

Kuo, E., and T. Duong. T.,(2007) *The Invisalign System.* Quintessence Publishing, London 2007 ISBN: 91–98

LINDE. *Periodontologia Clinica.* Editorial Medica Panamericana. Argentina 1992.

Lombardo, L., Arreghini, A., Ramina, F., Huanca Ghislanzoni, L. T., & Siciliani, G. (2017). Predictability of orthodontic movement with orthodontic aligners: a retrospective study. *Progress in orthodontics*, 18(1), 35.

Luna JC. Características de fuerzas y momentos en los tejidos de soporte durante la retracción de dientes anteriores superiores por medio de resortes. Simulación por medio de elementos finitos. [Tesis de posgrado en Ortodoncia y Ortopedia Maxilar]. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia; 2017.

Major T, Carey J, Nobes D, Heo G, Major P. Mechanical effects of third-order movement in self-ligated brackets by the measurement of torque expression. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* January 2011; 139: (1), e31-e44.

Marzieh Karkhanech:2013. Periodontal status of adult patients treated with fixed buccal appliances and removable aligners over one year of active orthodontic therapy. *Angle Orthodontist.* Vol 83, No 1.

Meier B, Wiemer KB, Miethke R-R: 2003. Invisalign®—patientprofiling. *Journal of Orofacial Orthopedics.* Vol 64(5):352-8.

Milčić, D., Keros, J. & Bosnjak, A. Analysis of bone tissue mechanical properties. *Collegium antropologicum*, 2003; 27 (2): 9–15.

Nahoum H. The vacuum-formed dental contour appliance. *N Y State Dent J*. 1964;30:385-390.

Nanda, R. (1998). *Biomecánica en ortodoncia clínica*. Ed. Médica Panamericana.

Newman, Takei, Carranza. *Periodontología Clínica*. Caps. 36 al 42, 47 y 49. Mc Graw Hill. 9na. Edición. México, 2003

Piccioni MAR V. Application of the finite element method in Dentistry. *Rev Sul-Brasileira Odontol*. 2013;10(4):369–77.

Ponitz RJ. Invisible retainers. *Am J Orthod*. 1971;59(3):266-272.

Proffit WR, Fields HW, Sarver DM. *Contemporary orthodontics*. 4th ed. St Louis: Mosby Elsevier; 2007.

Ptolomeo. Conceptos básicos del método por elemento finito. [Internet].UNAM. Recuperado 22 de enero 2023, a partir de www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/...248.../011-MPM-Cap8-Final.pdf

Piccioni MA, Campos EA, Saad JR, Andrade MF, Galvão MR, Rached AA. Application of the Finite Element Method in Dentistry. *RSBO*. 2013;10: 369–77

Rajvinder SJ, Prabhuraj K, Megha J, Piyush K. Revolution in Orthodontics: Finite element analysis. *J Int Soc Prev Community Dent*. 2016; 6(2): 110–114.

Robertson L. Effectiveness of clear aligner therapy for orthodontic treatment: A systematic review. *Orthod Craniofac Res*. 2020;23(2):133-142.

Rossini, G., Parrini, S., Castroflorio, T., Deregibus, A., & Debernardi, C. L. (2015). Efficacy of clear aligners in controlling orthodontic tooth movement: a systematic review. *The Angle orthodontist*, 85(5), 881–889.

Stevens BH, Levine RA. Forced eruption: a multidisciplinary approach for form, function, and biologic predictability. *Compend Contin Educ Dent*. 1998 Oct;19(10):994- 8, 1000, 1002-4 passim.

Takahashi N., Kitagami T., komori T. Behavior of teeth under various loading conditions with fine element method. *J Oral Rehab* 1980; 7: 453-461

Trivedi S. (2014). Finite element analysis: A boon to dentistry. *Journal of oral biology and craniofacial research*, 4(3), 200–203.

Wang K, Johnstone MA, Xin C, Song S, Padilla S, Vranka JA, et al. Estimating Human Trabecular Meshwork Stiffness by Numerical Modeling and Advanced OCT Imaging. *Investig Ophthalmol Vis Sci*. 2017;58(11):4808–17.

Zhao Z. The adaptive response of periodontal ligament to orthodontic force loading – A combined biomechanical and biological study. 2008;23:59–66.