



Elementos finitos en ortodoncia

Peraza-Martínez Martín,* Gutiérrez-Rojo Jaime Fabián.**

Resumen

El método de elementos finitos es una herramienta numérica útil en el área de ingeniería para resolver problemas estructurales complejos, se originaron en los años 60's, actualmente se ha extendido al área de biomecánica medica especialmente en ortodoncia. Estos elementos simulan fenómenos físicos dividiendo un cuerpo en pequeñas partes, permitiendo modelar estructuras complejas como los dientes y huesos. Se utilizan para analizar tensiones, deformaciones y esfuerzos en modelos tridimensionales, siendo un aporte en los dispositivos ortopédicos y ortodónticos. En el área de ortodoncia van a permitir simular el efecto de las fuerzas aplicadas sobre los dientes, ligamento periodontal y huesos. También se han utilizado para optimizar la colocación de miniimplantes, estudiar la deformación de miniplacas y mejorar el control de movimientos dentales.

Palabras clave: Elementos finitos, ortodoncia.

Abstract

The finite element method is a useful numerical tool in engineering for solving complex structural problems. It originated in the 1960s and has now spread to the field of medical biomechanics, particularly in orthodontics. These elements simulate physical phenomena by dividing a body into small parts, allowing the modeling of complex structures such as teeth and bones. They are used to analyze stresses, deformations, and strains in three-dimensional models, providing a contribution to orthopedic and orthodontic devices. In orthodontics, they allow the simulation of the effect of forces applied to teeth, periodontal ligament, and bones. They have also been used to optimize the placement of mini-implants, study the deformation of mini-plates, and improve the control of tooth movements.

Keywords: Finite elements, orthodontics.

*Estudiante de la Especialidad de Ortodoncia de la Universidad Autónoma de Nayarit.

**Profesor de la Especialidad de Ortodoncia de la Universidad Autónoma de Nayarit.

Introducción

El método de elementos finitos (MEF) es un método numérico para resolver problemas mecánicos de estructuras complejas, transformando un cuerpo de naturaleza continua a un modelo llamado discretización del modelo.^{1,2} El MEF es una herramienta de análisis en ingeniería desde los años 70's, teniendo sus orígenes desde hace más de 150 años, su publicación más antigua donde se utilizó el termino de "elementos finitos" fue en el año 1960 por el autor Ray Clough.^{3,4} Inicialmente el MEF se utilizó para resolver problemas del campo, de las estructuras elásticas continuas, desde construcciones civiles, industriales o de presas. Al igual la construcción de barcos y naves espaciales.⁵

Actualmente la computadora ha llevado a que se amplie la utilización en más ramas, teniendo una utilidad amplia para la investigación sobre biomecánica médica, especialmente la de dispositivos ortopédicos bajo diversas condiciones de cargas.^{1,3,5} El MEF es un método numérico el cual simula un fenómeno físico real por medio de un modelo geométrico, discretizando los dibujos en pequeñas partes que se llaman elementos finitos, permitiendo modelar estructuras de geometría compleja como los dientes, ligamento periodontal y hueso para determinar con una fuerza ejercida los cambios de esfuerzo y deformación. Sus formas geométricas son triángulos, cubos cuadrados

y tetraedros, sus vértices se unen para formar nodos. Los nodos se encuentran interconectados por una serie de puntos por un medio continuo.^{2,6,7} La cantidad de elementos finitos al realizarse un modelo determina resultados con mayor precisión, y pueden realizarse en dos o tres dimensiones dependiendo lo complejo de las geometrías y lo que se desea a estudiar.⁶

Las estructuras planas se someten a un estado de tensión plana y dividida de forma imaginaria por líneas en elementos finitos triangulares obteniendo una malla que responde a las intuiciones físicas, siendo las zonas donde se concentren las tensiones, la discretización se realiza con más finura y los elementos de un menor tamaño a comparación del área que no ocurre tal concentración, buscando una forma geométrica lo más regular posible siendo el triángulo equilátero.⁸

La malla (*mesh* o *grid*) es el conjunto de todos los elementos con sus respectivos nodos siendo considerada la estructura central de datos en los análisis de elementos finitos. Actualmente existen diversos softwares libres y comerciales de MEF generadores de una malla con herramientas asistidas por computadora.^{1,9} Los programas de cómputo o cálculo utilizados en los MEF disponen de 3 módulos de trabajo. Primer módulo es un

pre-procesador con la preparación del modelo para el cálculo. En segundo está el calculador donde el componente del software que ejecuta el cálculo del MEF genera las soluciones. El último módulo es post-procesador siendo la herramienta que hace posible obtener una representación gráfica del resultado.¹⁰

En la especialidad de ortodoncia son utilizados para entender los efectos de las fuerzas que se aplican en distintos sistemas biomecánicos y el movimiento que este efecto puede provocar en los tres ejes del espacio. Esta evaluación también permite determinar las consecuencias del estrés y tensión en zonas del cuerpo con difícil acceso sin causar algún daño como lo es el ligamento periodontal y hueso alveolar.¹¹

Es una herramienta útil para especificar los aspectos mecánicos de biomateriales y tejidos humanos que no se pueden medir en vivo, con la ventaja de poder comparar con estudios sobre modelos reales y pruebas repetibles con precisión y sin la preocupación del aspecto ético. Como la ortodoncia utiliza fuerzas, los elementos finitos es una herramienta de las más precisas para los investigadores.¹² Esta metodología reduce las necesidades de experimentos en laboratorios y prototipos para permitir más opciones de diseño para ser probado de una determinada cantidad de tiempo.¹³

Los MEF son una gran herramienta para estudiar y analizar biomateriales y estructuras humanas, incluyendo variables de diseño de forma relevante en un esfuerzo por simular situaciones clínicas y resolver problemas que estén relacionados con el estrés.¹⁴ Es un método numérico para la proximidad de soluciones de ecuaciones diferenciales, al evidenciar el efecto de la aplicación de diferentes fuerzas, siendo de manera útil para la simulación de los procesos durante el movimiento dental, modelando las estructuras de los dientes, ligamento periodontal y hueso.^{15,16}

También es una herramienta útil en análisis de los Brackets sin la necesidad de prototipos o experimentos de laboratorio permitiendo más opciones de diseños que pueden probarse en un determinado tiempo.¹⁷ Al simular el complejo del diente con ligamento periodontal bajo las cargas de ortodoncia. Se permite la construcción de modelos estandarizados para simular el desempeño biomecánico de dientes y tejido de soporte. Al tener simulaciones no lineales del ligamento periodontal proporcionan cálculos más precisos y confiables en la tensión y deformación durante el movimiento dental.¹⁸ Los modelos tridimensionales de forma completa de los elementos finitos de un sistema bracket-cemento y diente llegan a constar de 40,000 enlaces y de 49,000 elementos finitos.¹⁹

En el uso de un software se pueden simular varias características clínicas utilizando los modelos tridimensionales de los elementos finitos, siendo analizadas la distribución y magnitud de tensión inducida por el microtornillo y el hueso periimplantario. La distribución y magnitud de tensión en el hueso dictan la eficacia de los microtornillos y predicen el riesgo de fracaso.^{20,21,22} Araujo y cols, y Cadavid y cols. utilizaron una malla para la evaluación y optimización del diseño de miniimplantes con titanio o acero. Modelando los miniimplante se demostró que la mayor concentración de esfuerzo se encuentra en su parte coronal.^{22,23} Se evaluaron diferentes angulaciones donde se apreciaron los que fueron colocados entre 45° y 80° tuvieron problemas óseos, mientras que angulaciones menores de 45° o iguales a 90° tienen una respuesta ósea adecuada.²⁴

Al evaluar los miniimplantes se encontraron fallas relacionadas con una mayor tensión principal máxima por tres factores, siendo la calidad de hueso cortical, la angulación vertical y su proximidad al diente en la dirección de la fuerza. Teniendo así que la posición y angulación del miniimplante son factores que lo afectan.²⁵ Lin y cols. observaron mayor estrés en el hueso al colocar los miniimplantes con mayor exposición de su longitud fuera del hueso.²⁶ Tan y cols. En su estudio con elementos finitos sugieren que debe existir una integración ósea del 15% antes de realizar cualquier fuerza en el mini tornillo.²⁷

Los elementos finitos dinámicos reflejan una manera más precisa y completa el efecto del movimiento de los dientes, siendo un enfoque cada vez más recurrente al poder integrar gracias a los elementos finitos las dimensiones de la ranura y altura del bracket, el juego que tiene el slot con el alambre y la forma de utilizar ligadura. Así las investigaciones futuras podrán la deformación y expresión con las fuerzas ejercidas durante los tratamientos de ortodoncia.²⁸

Se han realizado estudios para comparar la resistencia al deslizamiento que se expresa con la tensión de alambres, y así poder optimizar la mecánica de deslizamiento en los distintos grosores y materiales de arcos.^{29,30} Con los elementos finitos en los arcos NiTi y NiTiCu en el bracket, se observó una reducción de esfuerzo siendo del 45.78% donde la mayor concentración fue el modelo de NiTi.³¹ Hay una gran diversidad de estudios relacionados con la ortodoncia donde se comparan el cierre de espacios en diferentes tamaños de ranura de bracket incluyendo un brazo de poder con diferentes tamaños, la respuesta biomecánica del complejo dentoalveolar al aplicarse fuerzas en un molar con sobre erupción, indicado las zonas de mayor esfuerzo y efectos colaterales, evaluación de los aparatos ortodóncos.^{32,33,34}

Los elementos finitos en el área de ortodoncia han sido de mucha utilidad con el estudio de comportamiento de varios dientes bajo las diferentes condiciones de carga bucolingual, con modelos bidimensionales, teniendo como resultado que una angulación aumentada si influye en el esfuerzo y deflexión. También ayudan a determinar la distribución tridimensional de los esfuerzos del ligamento periodontal al igual que la longitud radicular y altura ósea en los desplazamientos dentales.³⁴

Los elementos finitos también realizan modelos de tensiones en el ligamento periodontal luego de la aplicación de fuerzas ortodóncicas. Se utiliza el modelo Mooney Rivlin del ligamento periodontal para simular y analizar las distribuciones de tensión que se asocian cuando las aplican fuerzas ortodóncicas.³⁵ Los elementos finitos son un modelo auxiliar para comparar el efecto del plano de arco y sus tamaños sobre los movimientos dentales durante el cierre de espacios en diferentes mecánicas de deslizamiento.^{36,37,38} En algunas investigaciones con elementos finitos y cierre de espacio han encontrado que cuando el grosor del alambre es delgado en el cierre de espacios puede haber extrusión de los incisivos,³⁹ el cierre de espacios con loop en el torque se preserva más que con un loop en hélice,⁴⁰ la fricción es mayor en los Brackets convencionales que en los de autoligado, pero no hay diferencias clínicas significativas al momento del cierre de espacios.⁴¹

También han aportado modelos de raíces dentales con diferentes curvaturas, en el caso un incisivo superior con raíz recta, curvatura dirigida a vestibular y curvatura a lingual. Donde se comprobó un estrés y tensión en el ápice con dirección lingual, existe diferencia de reabsorción radicular dependiendo la altura de colocación del bracket, al igual influye la carga de fuerza ortodóncica y en qué sentido se encuentra la curvatura de la raíz.⁴² En 2001 Rudolph, Willes y Sameshima encontraron que en los movimientos de intrusión, extrusión y rotación se producía más estrés en el ápice y en los movimientos en cuerpo y de tipping la fuerza se concentra en la cresta alveolar.⁴³

Los elementos finitos en las miniplacas evalúan la deformación total por tensión producida en el hueso y miniplaca al aplicarse fuerzas con diferentes direcciones y magnitudes.⁴⁴ Hay estudios con modificaciones de las miniplacas como el de Nalbantgeil y cols. en donde le agregaron picos a las miniplacas encontrando menos estrés en los tornillos y hueso alveolar.⁴⁵ Neves y cols. realizaron prototipos mediante tomografía computarizada y se construyen de manera tridimensional con las características del modelo físico. Al obtener los resultados concluyo que la mini placa mostro mejores rendimientos cuando se aplican múltiples vectores en 2 puntos simultáneos en comparación con la fuerza aplicada en uno solo.⁴⁴

Park y cols. encontraron que el uso de mini placas para retracción del segmento posterior aplicando la fuerza a nivel de la unión cemento esmalte puede ayudar a obtener mejores resultados.⁴⁶ Somaskandhan y cols. compararon el uso de mini placas contra el de mini implantes, encontrando que las mini placas producen una mayor distalización y los mini tornillos producen mas intrusión.⁴⁷

En los alineadores esta la discrepancia a considerar al comparar un estudio experimental contra una simulación idealizada de elementos finitos, debatiendo si mejoraría la calidad del material.⁴⁸ Alhasyimi y cols. por medio de elementos finitos encontraron que el mejor attachment para la retracción del segmento anterior era del tipo elipsoidal.⁴⁹ Gómez y cols. utilizando elementos finitos observaron que si no se utilizan attachments se pueden producir movimientos no controlados de inclinación.⁵⁰ Savignano y cols. realizaron un estudio sobre la extrusión de los incisivos observando que para poder realizar este movimiento es necesario utilizar un attachment, dependiendo de la forma y posición del attachments puede afectar el movimiento dental.⁵¹

En el caso de los pacientes con labio y paladar hendido, los elementos finitos han sido utilizados como herramienta para estudiar los puntos de aplicación de las fuerzas y tener un mejor control de expansión.^{52,53, 54}

También se ha utilizado en diferentes aparatos ortopédicos como el arco extraoral en donde se evaluó la distalización de los molares,^{55,56} en la mentonera se evaluó el efecto de las fuerzas en la mandíbula y en la articulación temporomandibular,^{57,58} en la máscara facial se ha evaluado las zonas de estrés en la piel en la frente y el mentón observando que es igual con la máscara facial de Petit que con la de Delaire, la dirección de la tracción, efecto del anclaje intraoral y el uso de la máscara con la expansión rápida.^{59,60}

Con la llegada de la inteligencia artificial se ha puesto en comparación con la simulación por elementos finitos, siendo ambos de ayuda para reducir el número de prueba y error. Teniendo ventaja los modelos de machine-learning sobre las simulaciones de los elementos finitos y reduciendo el tiempo para la generación de base de datos.⁶¹

Referencias

- Lai L, Huang C, Zhou F, Xia F, Xiong G. Finite elements analysis of the temporomandibular joint disc in patients with intra-articular disorders. BMC Oral Health. 2020; 20: 93. <https://doi.org/10.1186/s12903-020-01074-x>
- Frias E. Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos. [tesis doctoral]. Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya; 2004. 352p. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93606>
- Napoles E, González R, Olivares E. Una introducción al análisis por elementos finitos: aplicaciones y ejemplos. 1th. ed. México: Publisher: Editorial Universitaria; 2015. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Raide-Gonzalez-Carbonell/publication/283151622_Una_introduccion_al_Analisis_por_Elementos_Finitos_aplicaciones_y_ejemplos/links/595a83e145851511773d2b04/Una-introduccion-al-Analisis-por-Elementos-Finitos-aplicaciones-y-ejemplos.pdf
- Azevedo A. Método dos elementos finitos [internet]. Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto Portugal; 2003 [consultado 22 octubre 2023]. Disponible en: http://www.alvaroazevedo.com/publications/books/livro_mef_aa_1ed/doc/Livro_MEF_AA.pdf
- Katta M, Petrescu S, Dragomir L, Popescu M, Georgescu R, Tuculina M, Popa D, Duta A.; Diaconu O, Dascalu I. Using the Finite Element Method to Determine the Odonto-Periodontal Stress for a Patient with Angle Class II Division 1 Malocclusion. Diagnostics. 2023;13 (9): 1567. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2075-4418/13/9/1567>
- Pacheco D, Malaver P, Forero C, Girón A, Sánchez D. Comparación de la distribución de esfuerzos y deformaciones en la unidad DentoAlveolar, el alambre y el bracket utilizando arco de GUMMetal y Nitinol. Odontos. 2014;28-34.
- Otero Pereiro L. Aprendiendo sobre el Método de los Elementos Finitos. Ingeniería Mecánica [Internet]. 2006;9(3):7-13. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=225117945001>
- Fornons J. El método de los elementos finitos en la ingeniería de estructuras [internet]. Barcelona: Universidad Politècnica De Barcelona; 1982 [consultado 20 oct 2023]. Disponible en: [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=OcR9vG8oe9QC&oi=fnd&pg=PA1&dq=elementos+finitos++&ots=Z4YHU0-Mtd&sig=FBPPaNi4eeWpW88j\]-bHKFXccpU#v=onepage&q=elementos+finitos&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=OcR9vG8oe9QC&oi=fnd&pg=PA1&dq=elementos+finitos++&ots=Z4YHU0-Mtd&sig=FBPPaNi4eeWpW88j]-bHKFXccpU#v=onepage&q=elementos+finitos&f=false)
- Villacis M. Modelo matemático para el análisis del comportamiento térmico en el proceso de soldadura de un acero estructural mediante un software con base en el método de elementos finitos. [dissertation]. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo; 2022. 70 p. Recuperado de: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/17283/1/20T01587.pdf>
- López L. Intrusión molar en ortodoncia: elementos finitos. [Dissertation]. Puebla, Puebla: Benemérita Universidad Autónoma De Puebla; 2021. 51 p. Recuperado de: <https://docs.google.com/viewer/g?url=https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/08a1bd63-5926-4e17-8261-5064d1938ceb/content>
- Marquez G, Oliveira C. Verticalización de molares con sistema de cantilever doble: análisis de elementos finitos. Odont Inves [internet] 2017 [consultado 20 oct 2023]; 3 (2): 25-39. Disponible en: <https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/odontoinvestigacion/issue/view/69/41>
- Pagar V, Toshniwal N, Vikram S, Chako L, Mahajan B, Tanaji S. Application of the finite element method In orthodontics. Jour of Pharma. 2022; 13(10): 2562-2567.
- Gómez-Gómez SL, Montoya-Góez Y, González-Flórez DM, Restrepo-Narváez LM, Ardila CM. Resistencia friccional entre brackets cerámicos y brackets de autoligado usando un análisis de elementos finitos. Rev CES Odont 2020; 33(2): 72-85.
- Ghorab H, Ramadan A, Nadim M, Sharaf T. Finite Element Study to Evaluate the Stress Around Mini-implant during Canine Retraction using Continuous and Interrupted Orthodontic Forces. Open Access Maced J Med Sci. 2023; 11(D):36-43.
- Ácome F, Ramos F, Romero G, Zarta A, Pacheco D, Barrera J. Esfuerzos y deformaciones en el arco, bracket y unidad dentoalveolar, utilizando arcos de Elgiloy azul y Gummetal, con y sin elásticos: análisis de elementos finitos. Journal Odont Col. 2016;9(17):34-45
- Jiang T, Wu R, Wang J, Wang H, Tang G. Clear aligners for maxillary anterior en masse retraction: a 3D finite element study. Sci Rep. 2020; 10: 10.
- Gómez-Gómez S, Montoya-Góez Y, González-Flórez D, Restrepo-Narváez Leydi Marcela, Ardila Carlos Martín. Resistencia friccional entre brackets cerámicos y brackets de autoligado usando un análisis de elementos finitos. CES odontol. [Internet]. 2020 Dec [cited 2023 Nov 09]; 33(2): 72-85.
- Bucchi C, Del Fabbro M, Marcé-Nogué J. Orthodontic Loads in Teeth after Regenerative Endodontics: A Finite Element Analysis of the Biomechanical Performance of the Periodontal Ligament. Appl Sci. 2022; 12: 7063. Recuperado de: <https://doi.org/10.3390/>
- Shyagali TR, Bhayya DP, Urs CB, Subramanian S. Finite element study on modification of bracket base and its effects on bond strength. Dental Press J Orthod. 2015; 20(2):76-82. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.1590/2176-9451.20.2.076-082.oar>
- Sakamaki T, Watanabe K, Iwasa A, Deguchi T, Horiuchi S, Tanaka E. Thread shape, cortical bone thickness, and magnitude and distribution of stress caused by the loading of orthodontic miniscrews: finite element analysis. Sci Rep 12, 12367 (2022) Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16662-w>
- Giraldo V, Valencia M, Vargas M, Velloza A, Jara L. Comparación entre dos tipos de mini-implantes, en maxilar inferior, por medio de análisis de elementos finitos. Journ Odonto Col. 2010; (5): 5-23.
- Magaña A, Martínez A, Zavala N, Armas O, Cárdenas GM, González García E, Salas Orozco M. Comparación de tensiones y desplazamientos entre mini-implantes de acero y titanio insertados con diferentes angulaciones: análisis de elementos finitos. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar. 2023; 7(1): 7585-7596. Disponible en: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.4992
- Araujo-Monsalvo V, González-Aréas M, Martínez-Coria E, Flores-Cuamatzi E, Araujo-Monsalvo B, Domínguez-Hernández V. Effect of insertion angle on the stability of orthodontic mini-implants in a rabbit tibia model: A finite element analysis. Cir. cir. [revista en la Internet]. 2019 Abr [citado 2023 Nov 10]; 87(2): 190-195. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2444-054X2019000200190&lng=es. Epub 29-Nov-2021. <https://doi.org/10.24875/ciru.18000437>
- Cadavid D, Duque L, Correa S, Buschang P, Roldán S. Estabilidad de los miniimplantes en Ortodoncia. "Biología ósea y Biomecánica". Rea CES Odont. [internet] 2014 [consultado noviembre 2023]; 27(2): 93-103. Disponible en: <http://dialnet-estabilidaddelosminiimplantesenortodonciabiologiao-4993188.pdf>
- Gil-Ramos L, Maestre-Polanco V, Herrera-Herrera A, Rebolledo-Cobos M. Factores que inciden sobre el éxito y/o fracaso de mini-implantes en ortodoncia: una revisión sistemática exploratoria. Duazary. 2022 julio; 19(3): 229 - 242. Recuperado de: <https://doi.org/10.21676/2389783X.4839>
- Lin T, Tsai F, Chen C, Lin L. Factorial analysis of variables affecting bone stress adjacent to the orthodontic anchorage mini-implant with finite element analysis. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2013; 143(2): 182-9.
- Tan F, Wang C, Yang C, Huang Y, Fan Y. Biomechanical effects of various bone implant interfaces on the stability of Orthodontic miniscrews: a finite element study. Journal of Healthcare Engineering. 2017; 2017:1-10.
- Yang PZ, Bai LY, Zhang HX, Zhao W, Liu Y, Wen X. Efficacy of a four-curvature auxiliary arch at preventing maxillary central incisor linguoocclusion during orthodontic treatment: a finite element analysis. BMC Oral Health. 2023; 23(144). Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s12903-023-02833-2>
- Iriarte Armando J, Ortiz Susana, Cubides-Flechas Katherine, Olaya Catalina, Jaimes-Monroy Gustavo. Sliding resistance of rectangular vs. beveled archwires in two self-ligating brackets: a finite element study. Acta odontol. latinoam. [Internet]. 2018 Dic [citado 2023 Nov 09]; 31(3): 149-155. Disponible en: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-48342018000300005&lng=es.
- Di Mauro P, Cisilino P, Pelossi P. Modelado por elementos finitos de aleaciones con memoria de forma para su aplicación en odontología. Asoc Arg Mec Comp. [internet] 2008 [consultado noviembre 2023]; (XXVII): 3318-3337.
- Lopez R, Ortega R, Pacheco D, Soler J, Pantoja F, Naranjo F. Comportamiento biomecánico de la unidad dentoalveolar (UDA) de un incisivo central bajo un tratamiento de ortodóntico, utilizando arcos de NiTi Y NiTiCu: simulación 3D mediante elementos finitos. Rev Bistua [Internet] 2019 [consultado noviembre 2023]; 17(3): 22-33. Disponible en: <https://repositorio.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/32101/2019rafaelortega.pdf?sequence=1>
- González-Andrade M, Lima-Illescas M. Fricción de brackets autoligado y convencionales en el cierre de espacios: revisión de la literatura. 593 Digital Publisher CEIT. 2022; 7(3-2): 94-103 <https://doi.org/10.33386/593dp.2022.3.2.1197>
- https://repositorio.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/59161/Articulo%20cientifico_ORTO-PUJ_Maiky-Juan%20Esteban_Versión%20.pdf?sequence=1
- Calao E, Vázquez M, Becerra F, Ossa J, Enríquez C, Fresneda E. El método de elementos finitos y su aplicación en la investigación odontológica. Rev Facul Odonto UA. [internet] 1999 [consultado noviembre 2023]; 11(1): 44-49.
- Eugenio M, David G. Finite element analysis of orthodontic force application on the periodontal ligament of the human maxillary first molar. AIP conf proce. [internet] 2022 [consultado 27 octubre 2023]; 2471(1): p. 1-5. Disponible en: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2471/1/020017/2825703/Finite-element-analysis-of-orthodontic-force?redirectedFrom=fulltext>
- Wu J, Wang X, Jiang Y, Wu Z, Shen Q, Chen Y, Meng Q, Ye N. Effect of archwire plane and archwire size on anterior teeth movement in sliding mechanics in customized labial orthodontics: a 3D finite element study. BMC Oral Health. 2022; 22, 33. <https://doi.org/10.1186/s12903-022-02066-9>

37. Liu D, Yan B, Lei F, Li J, Wang X, Rong Q, Zhou Y. Different sliding mechanics in space closure of lingual orthodontic: a translational study by three-dimensional finite element method. *Am J Trans Res*. 2019; 11 (1): 120-130.
38. Hamanaka R, Yamaoka S, Nguyen T, Tominaga J, Yoshida N. Numeric simulation model for long-term orthodontic tooth movement with contact boundary conditions using the finite element method. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2017; 152 (5):601-612.
39. Kawamura J, Tamaya N. A finite element analysis of the effects of archwire size on orthodontic tooth movement in extraction space closure with miniscrew sliding mechanics. *Progress in Orthodontics*. 2019; 20 (3):1-6.
40. Chacko A, Tikku T, Pratap R, Srivastava K. Comparative assessment of the efficacy of helical loop and T-loop for space closure in lingual orthodontics, a finite element study. *Progress in Orthodontics*. 2018; 19 (4): 1-8.
41. Gómez-Gómez S, Sanchez-Obando N, Álvarez-Castrillon M, Montoya-Goez Y, Ardilla C. Comparison of frictional forces during the closure of extraction spaces in passive self ligating brackets and conventionally ligated brackets using the finite element method. *J Clin Exp Dens*. 2019; 11 (5):e439-46.
42. Xiao S, Kong X, Yao J, Liu J, Li L, Jiang T, Wang L, Fan Y. Differences in root stress and strain distribution in buccal and lingual orthodontics: A finite element analysis study. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. [internet] 2022 [consultado 28 octubre 2023]; 14: p. 1-7. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590093522000667?via=ihub>
43. Rudolph D, Willes M, Sameshima G. A finite element model of apical force distribution from orthodontic tooth movement. *Angle Orthod*. 2001; 71 (2): 127-131.
44. Neves A, Carmo M, De Almeida M, Meloni F, Silva E, Tien-Li A. Finite element analysis of a newly designed miniplate for orthodontic anchorage in the maxillary anterior region. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2022; 162(5): 656-667.
45. Nalbantgil D, Tozlu M, Ozdemir F, Ogus M, Arun T. FEM analysis of a new miniplate: stress distribution on the plate, screws and the bone. *European Journal of Dentistry*. 2012; 6:9-15.
46. Park M, Na Y, Park M, Ahn J. Biomechanical analysis of distalization of mandibular molars by placing a mini-plate: a finite element study. *Korean J Orthod*. 2017; 47 (5):289-97.
47. Somaskandhan A, Kumar N, Vijayalakshmi D. Stress distribution and displacement in the maxillofacial complex during intrusion and distalization of the maxillary arch using miniplates versus mini-implants: a 3-dimensional finite element study. *Progress in Orthodontics*. 2023; 24 (8): 1-16.
48. Elshazly T, Salvatori D, Elattar H, Bourauiel C, Keilig L. Effect of trimming line design and edge extension of orthodontic aligners on force transmission: A 3D finite element study. *Jour Mech Beh of Bio Mat* [internet] 2023 [consultado 28 octubre 2023]; p. 140: 1-8. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751616123000942?via=ihub>
49. Alhasyimi A, Ayub A, Andusyana C. Effectiveness of the attachment design and thickness of clear aligners during orthodontic anterior retraction: finite element analysis. *Eur J Dent*. 2024; 18 (1): 174-181.
50. Gomez J, Peña F, Martínez V, Giraldo D, Cardona C. Initial force systems during bodily tooth movement with plastic aligners and composite attachments: A three-dimensional finite element analysis. *Angle Orthod*. 2015; 85 (3): 454-60.
51. Savignano R, Valentino R, Rationale A, Michelotti A, Barone S, Anto V. Biomechanical effects of different auxiliary-aligner designs for the extrusion of an upper central incisor: a finite element analysis. *Journal of Healthcare Engineering*. 2019; 1-9.
52. Marcin M, Katarzyna C. Stress and displacement patterns during orthodontic intervention in the maxilla of patients with cleft palate analyzed by finite element analysis: a systematic review. *BMC Oral Health*. 2023; 23, 93. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s12903-023-02714-8>
53. Lee H, Nguyen A, Hong C, Hoang P, Pham J, Ting K. Biomechanical effects of maxillary expansion on a patient with cleft palate: a finite element analysis. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2016; 150 (2): 313-323.
54. Olmez S, Dogan S, Pekedis M, Yildiz H. Biomechanical evaluation of sagittal maxillary internal distraction osteogenesis in unilateral cleft lip and palate patient and noncleft patients. A three-dimensional finite element analysis. *Angle Orthod*. 2014; 84 (5):815-24.
55. Geramy A, Hassanpour M, Emadian E. Asymmetric outer bow length and cervical headgear force system: 3D analysis using finite element method. *Journal of Dentistry*. 2013; 12 (5): 216-25.
56. Rougement L, Oliveira A, Penedo N, Elias C, Sant'anna E, Casaccia G, Gomes J, Gouveia J. Asymmetric headgear for differential molar movement: a study using finite element analysis. *Journal of Orthodontics*. 2009; 36: 145-151.
57. Mathew J, Mascarenhas R, Husain A. Evaluation of stress distribution in mandible during orthodontic and orthopaedic force application using finite element method. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*. 2017; 17: 269-82.
58. Siqueira F, Guimaraes A, Lucchesi M, Atsushi F. Distribution of stress on TMJ disc induced by use of chin cup therapy: assessment by the finite element method. *Dental Press J Orthod*. 2017; 22 (5):83-9.
59. Gazzin F, Pavoni C, Cozza P, Lione R. Stress on facial skin of class III subjects during maxillary protraction: a finite element analysis. *BMC Oral Health*. 2019; 19:31.
60. Arslan B, Tuncer C. Evaluation of finite element analysis studies related to maxillary protraction with facemask. *NEUDENTJ*. 2022; 4: 73-78.
61. Zingarelli C. Aplicación de una metodología de machine learning para optimizar el proceso de fabricación aditiva. [dissertation]. Argentina: Universidad Nacional de Mar del Plata; 2022. 45 p. Recuperado de: <http://rinfi.fi.mdp.edu.ar/xmliui/handle/123456789/734>