

Biomecánica de la forma y ubicación de attachments en la extrusión de incisivos superiores con alineadores: análisis de elementos finitos

Biomechanics of different shapes and location of attachments for the extrusion movement of upper central incisors with aligners. finite element analysis

Angelica Marcela Ubaque Silva¹ Anny Ximena Quimbayo Montealegre² Astrid Eliana Albarracín Valderrama³ Luz Andrea Velandia Palacio⁴

1. Estudiante de Ortodoncia y Ortopedia Maxilar, Institución Universitaria Colegios de Colombia – UNICOC. aubaques@unicoc.edu.co
2. Estudiante de Ortodoncia y Ortopedia Maxilar, Institución Universitaria Colegios de Colombia – UNICOC. aquimbayo@unicoc.edu.co
3. Estudiante de Ortodoncia y Ortopedia Maxilar, Institución Universitaria Colegios de Colombia – UNICOC. aalbarracinv@unicoc.edu.co
4. Especialista en Odontología Legal y Forense, Especialista en Ortodoncia y Ortopedia Maxilar, Doctorado en Investigación, Docente Institución Universitaria Colegios de Colombia – UNICOC, Bogotá, Colombia. lvelandiap@unicoc.edu.co

RESUMEN

Introducción: La extrusión de incisivos con alineadores es uno de los movimientos menos predecibles en ortodoncia, lo que ha impulsado el uso de attachments para mejorar su eficiencia biomecánica.

Objetivo: Evaluar el efecto de la forma y la ubicación de attachments sobre la respuesta biomecánica del sistema alineador–diente–periodonto durante la extrusión simulada de un incisivo central superior mediante análisis de elementos finitos.**Método:** Se desarrolló un modelo tridimensional a partir de CBCT y escaneos STL, evaluando dos diseños de attachments (biselado y elipsoidal) en tres posiciones (gingival, central e incisal). Se

analizaron el desplazamiento, el área bajo la curva (AUC), el estrés de von Mises (MPa) y la deformación (mm) en el sistema alineador–diente–periodonto.

Resultados: Los attachments biselados mostraron mayor movimiento acumulado (AUC: 4,03 en incisal) en comparación con los elipsoidales (2,91), así como mayores valores de estrés (2,53 MPa vs 0,67 MPa en posición central). La deformación del alineador también fue superior en el diseño biselado ($1,89 \times 10^{-3}$ mm) frente al elipsoidal ($1,43 \times 10^{-3}$ mm).

Conclusiones: La forma y ubicación del attachment influyen significativamente en la biomecánica de la extrusión, siendo el diseño biselado en posición incisal el más eficiente, aunque asociado a mayores concentraciones de estrés.

Palabras clave: Técnicas de Movimiento Dental; Ortodoncia; Análisis de elementos finitos; Aparatos Ortodóncicos Removibles; Incisivos

ABSTRACT

Introduction: The extrusion of incisors with aligners is one of the least predictable movements in orthodontics, which has led to the use of attachments to improve biomechanical efficiency.

Objective: Evaluate the effect of the shape and location of attachments on the biomechanical response of the aligner-tooth-periodontium system during simulated extrusion of a maxillary central incisor using finite element analysis. **Methods:** A three-dimensional model was developed from CBCT and STL scans, evaluating two attachment designs (beveled and ellipsoidal) in three positions (gingival, middle, and incisal). Displacement, area under the curve (AUC), von Mises stress (MPa), and deformation (mm) were analyzed in the aligner–tooth–periodontium system.

Results: Beveled attachments showed greater cumulative movement (AUC: 4.03 in the incisal position) compared to ellipsoidal ones (2.91), as well as higher stress values (2.53 MPa vs 0.67 MPa in the middle position). Aligner deformation was also higher in the beveled design (1.89×10^{-3} mm) compared to the ellipsoidal design (1.43×10^{-3} mm).

Conclusions: The shape and location of attachments significantly influence extrusion biomechanics, with the beveled design in the incisal position being the most efficient, although associated with higher stress concentrations.

Keywords: Dental Movement Techniques; Orthodontics; Finite Element Analysis; Removable Orthodontic Appliances; Incisors

INTRODUCCION

La evolución de la Ortodoncia en las últimas décadas se ha visto influenciada por el desarrollo de la tecnología la cual ha transformado el abordaje de los tratamientos ortodónticos. Entre estos cambios, los alineadores han surgido como una alternativa frente a los brackets convencionales. Estos dispositivos, caracterizados por su estética y comodidad, han ganado aceptación tanto entre pacientes como en ortodoncistas. Los alineadores surgieron a través del sistema Invisalign, introducido por Align Technology en 1999, esta tecnología ha mejorado gracias a los avances en el diseño asistido por computadora (CAD/CAM) y la tecnología de impresión 3D. ¹⁻²

Los alineadores representan un avance en términos estéticos, así como el cambio hacia un enfoque más personalizado en el tratamiento de las maloclusiones, aunque este tipo de terapéutica se ha expandido rápidamente en los últimos años no ha ocurrido lo mismo con la calidad de la evidencia científica que apoya su biomecánica, la cual sigue siendo limitada. Diversos estudios señalan que ciertos movimientos dentales continúan presentando retos importantes con alineadores, entre ellos la extrusión ortodóntica, considerada uno de los movimientos dentales menos predecibles especialmente en centrales superiores.²⁻⁴

Para mejorar la eficacia biomecánica de los alineadores, se han desarrollado aditamentos auxiliares como los attachments los cuales se cementan a la superficie dental y permiten mejorar la transmisión de fuerzas desde el alineador hacia el diente. Estos attachments presentan diferentes formas y su diseño está indicado para movimientos dentales

específicos. Diversos estudios sugieren que la posición, tamaño y diseño de los attachments influyen la eficacia del movimiento dental ortodóntico con los alineadores.⁵⁻⁷

El método de elementos finitos (Finite Element Method, FEM) se ha convertido en una herramienta importante para comprender la mecánica de los alineadores y attachments al permitir modelar y simular su comportamiento bajo diferentes condiciones. Este método ha sido utilizado en la literatura científica como medio para evaluar las interacciones entre alineadores, attachments y estructuras dentoalveolares permitiendo optimizar el diseño de estos dispositivos.⁸⁻⁹

El análisis de la biomecánica de los attachments en el caso de la extrusión de incisivos centrales superiores es importante ya que es un movimiento frecuentemente requerido en la corrección de diferentes tipos de maloclusiones y presenta limitaciones biomecánicas al ser realizado con alineadores. Comprender cómo las diferentes formas y ubicaciones de los attachments pueden influir en la transmisión de fuerzas y generación de movimientos contribuye a mejorar la eficiencia y pronóstico de este movimiento. A pesar de los avances en el estudio de la biomecánica de los alineadores aún existe información limitada respecto a la influencia específica del diseño y ubicación de attachments en la generación de fuerzas durante la extrusión dental, algunos estudios experimentales in vitro han evaluado diferentes geometrías de attachments observando que variaciones en su diseño pueden generar cambios importantes en la magnitud y dirección de las fuerzas producidas por los alineadores lo cual puede afectar la eficiencia del movimiento ortodóntico y generar fuerzas no deseadas en otros ejes. Sin embargo, la mayor parte de estos estudios se han centrado en la medición de fuerzas iniciales o en modelos experimentales específicos, como tipodontos o dispositivos de medición de fuerza, sin analizar de forma detallada la distribución tridimensional de tensiones en las estructuras dentoalveolares. Además de la geometría del attachment, también la ubicación puede influir en la dirección, magnitud y eficiencia de las fuerzas producidas por los alineadores por lo que el análisis combinado de la forma y ubicación de los attachments resulta importante para la comprensión y optimización de movimientos complejos como la extrusión de incisivos superiores.

Por lo tanto, el objetivo de la presente es Evaluar el efecto de la forma y la ubicación de attachments sobre la respuesta biomecánica del sistema alineador–diente–periodonto durante la extrusión simulada de un incisivo central superior mediante análisis de elementos finitos.

MÉTODO

Se implementó un flujo de trabajo basado en análisis por elementos finitos (Finite Element Analysis, FEA) para evaluar el comportamiento biomecánico del sistema diente–ligamento periodontal (LPD)–hueso alveolar–alineador durante el movimiento de extrusión de incisivos centrales superiores bajo diferentes diseños y posiciones de attachments. Los modelos tridimensionales se reconstruyeron a partir de tomografía computarizada de haz cónico (CBCT, formato DICOM) y escaneos intraorales (formato STL), los cuales fueron segmentados, procesados y registrados para generar un modelo integrado que incluyó dientes, LPD y hueso alveolar. El LPD se modeló como una capa uniforme de 0,2 mm de espesor, y el hueso se diferenció en cortical y trabecular.

Se diseñaron mediante CAD dos tipos de attachments: uno biselado (convencional) de geometría prismática (1,0 mm de altura, 3,0 mm de ancho y 1,0 mm de profundidad) con un bisel incisal de 45°, y uno elipsoidal (optimizado) (2,0 mm de altura, 3,0 mm de ancho y 1,0 mm de profundidad). Cada diseño se evaluó en tres posiciones sobre la superficie vestibular del incisivo central superior (gingival, medio e incisal), generando un total de seis configuraciones de análisis.

El alineador se modeló como una lámina de material termoplástico PET-G de 0,75 mm de espesor. La activación ortodóntica se simuló mediante un set-up virtual de extrusión, generando una interferencia geométrica inicial entre el alineador y el sistema diente–attachment, responsable de inducir el sistema de fuerzas iniciales.

El modelo de elementos finitos se construyó utilizando elementos sólidos tetraédricos de 10 nodos para dientes, hueso y attachments, y elementos tipo cascarón para el alineador, con refinamiento de malla en las zonas de contacto. Se verificó la independencia de malla (<5% de variación). Los materiales se consideraron elásticos lineales e isotrópicos, con módulos de Young de 20.000 MPa para el diente, 13.800 MPa para el hueso, 2.050 MPa para el PET-G y 0,059 MPa para el LPD. La relación de Poisson fue de 0,30 para todos los materiales, excepto el LPD (0,49). Las interacciones de contacto se modelaron mediante una formulación geométricamente no lineal utilizando un solver implícito.

Se evaluaron como variables de salida la distribución del esfuerzo de von Mises y la deformación total en el alineador, con énfasis en la interfase alineador–attachment; así como el esfuerzo y la deformación en el LPD y la distribución de esfuerzos en el hueso cortical y trabecular. Adicionalmente, se registró la magnitud de la fuerza inicial inducida

(N). La progresión del movimiento se analizó mediante el cálculo del área bajo la curva (AUC), utilizando el método trapezoidal a partir de los valores obtenidos en los puntos de simulación.

Los materiales se consideraron elásticos lineales e isotrópicos, y sus propiedades mecánicas se presentan en la Tabla 1.

Consideraciones éticas: Este estudio se clasificó como una investigación sin riesgo de acuerdo con la Resolución 8430 de 1993 del Ministerio de Salud de Colombia, dado que se basó en modelación computacional mediante análisis de elementos finitos sin intervención directa en seres humanos. Por lo tanto, no requirió consentimiento informado ni aprobación por comité de ética.

Los autores utilizaron ChatGPT (OpenAI) como herramienta de apoyo para la revisión lingüística y mejora de la redacción académica del manuscrito. Los autores revisaron y aprobaron el contenido final, asumiendo plena responsabilidad por su contenido

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los materiales utilizados en el modelo FEM

Material	Módulo de Young (MPa)	Relación de Poisson
Diente	20 000	0,30
Hueso	13 800	0,30
Alineador (PET-G)	2 050	0,30
Attachment	20 000	0,30
Ligamento periodontal	0,059	0,49
Ligamento periodontal	0,059	0,49

Nota: El PET-G se modeló como un material elástico lineal dentro del rango de pequeñas deformaciones, acorde con condiciones clínicas de activación.

RESULTADOS

La simulación de la extrusión del diente 11 mostró que la magnitud del desplazamiento vertical varió según la posición del attachment en ambos diseños evaluados. En el diseño biselado, la mayor extrusión se observó en la posición incisal, seguida de la posición central

y gingival. Un comportamiento similar se evidenció en el diseño elipsoidal, con mayores valores en la posición incisal, intermedios en la central y menores en la gingival, lo que indica un patrón consistente en el que la posición del attachment influye en la magnitud del movimiento de extrusión. Al comparar ambos diseños, los attachments biselados mostraron mayores valores de extrusión en las tres posiciones evaluadas en comparación con los elipsoidales, siendo esta diferencia más evidente en la posición incisal.

Se realizó un modelado teórico del desplazamiento en función del tiempo el cual evidenció un comportamiento sigmoideo en todas las configuraciones evaluadas, con un incremento progresivo del movimiento a partir de las semanas intermedias de la simulación. El cálculo del área bajo la curva (AUC) permitió cuantificar el movimiento acumulado, evidenciando mayores valores en el diseño biselado en comparación con el elipsoidal. El mayor valor de AUC se observó en la posición incisal del diseño biselado, seguido de la posición central y gingival mientras que en el diseño elipsoidal, los valores fueron menores en todas las posiciones. Tabla 2.

Tabla 2. Área bajo la curva (AUC) del desplazamiento según diseño y posición del attachment

Diseño	Posición	AUC (mm·semana)
Biselado	Incisal	4,03
Biselado	Central	3,06
Biselado	Gingival	1,55
Elipsoidal	Incisal	2,91
Elipsoidal	Central	2,27
Elipsoidal	Gingival	1,24

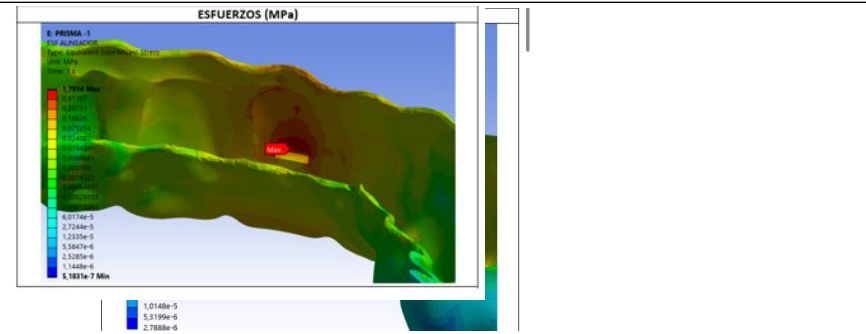
Los valores máximos de estrés de von Mises en el alineador fueron diferentes acordes al diseño y la posición del attachment, mostrando valores más altos en la posición central del diseño biselado y en la posición incisal con el diseño elipsoidal. Tabla 3. En todos los casos la concentración de esfuerzos estuvo localizada en la interfase alineador-attachment, mostrando una distribución más difusa en el diseño elipsoidal. En ambos diseños, la concentración de esfuerzos se localizó en la interfase alineador–attachment; sin embargo,

en el diseño elipsoidal se observó una distribución más difusa en comparación con el biselado. Figura 1.

Tabla 3. Estrés de von Mises (MPa) según diseño y posición del attachment

Diseño	Posición	Estrés (MPa)
Biselado	Gingival	1,30
Biselado	Central	2,53
Biselado	Incisal	1,79
Elipsoidal	Gingival	0,28
Elipsoidal	Central	0,67
Elipsoidal	Incisal	0,96

Figura 1. Comparación de la distribución del estrés (MPa) entre el diseño biselado y el elipsoidal en posición incisal.



1a.Distribución del estrés (MPa) en el diseño biselado en posición incisal. 1b.Distribución del estrés (MPa) en el diseño elipsoidal en posición incisal

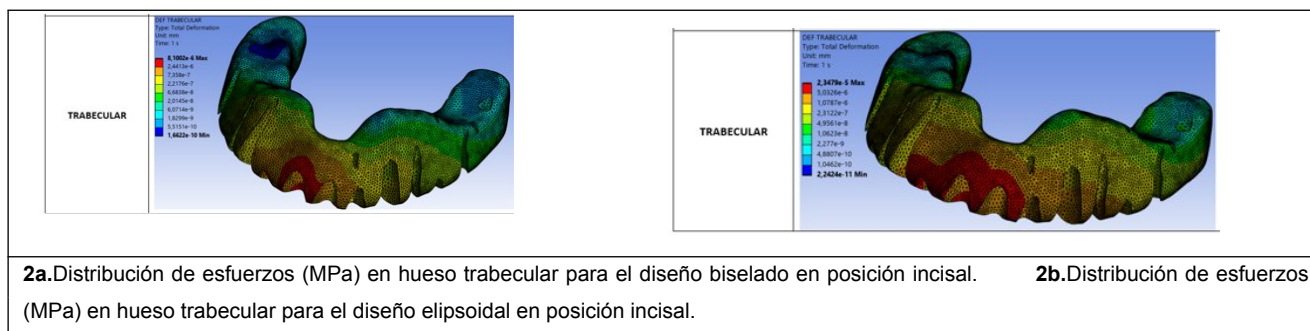
La deformación del alineador mostró un incremento progresivo desde la posición gingival hacia la incisal en ambos diseños. En el attachment biselado, los valores aumentaron desde 9.3×10^{-4} mm en posición gingival hasta 1.89×10^{-3} mm en posición incisal, con valores intermedios en la posición central (1.75×10^{-3} mm). En el diseño elipsoidal, se observó un patrón similar, con valores menores en todas las posiciones, que aumentaron desde 3.5×10^{-4} mm en gingival hasta 1.43×10^{-3} mm en incisal, con valores intermedios en la posición central (9.1×10^{-4} mm).

El análisis del complejo diente–ligamento periodontal–hueso alveolar evidenció que tanto el diseño como la posición del attachment influyen en la magnitud y distribución de la deformación y el esfuerzo, así como en la transmisión de fuerzas hacia los tejidos de soporte. En el diseño biselado, la posición incisal mostró los mayores valores de deformación en el ligamento periodontal (2.20×10^{-5} mm) y esfuerzo de von Mises (3.59×10^{-4} MPa), acompañados de la mayor fuerza inducida (2.695 N), con una activación más amplia del ligamento periodontal hacia el tercio medio radicular. A nivel óseo, el hueso cortical registró una deformación de 2.20×10^{-5} mm y un esfuerzo máximo de 0.72 MPa, mientras que el hueso trabecular presentó valores de 1.25×10^{-5} mm y 0.05 MPa.

En la posición central del mismo diseño, se observaron valores intermedios en el ligamento periodontal (1.55×10^{-5} mm; 3.03×10^{-4} MPa), junto con una distribución más uniforme de esfuerzos en el hueso cortical (1.38×10^{-5} mm; 0.76 MPa) y trabecular (8.1×10^{-6} mm; 0.02 MPa). Por el contrario, la posición gingival presentó los valores más bajos de deformación (1.20×10^{-5} mm) y esfuerzo (1.14×10^{-4} MPa) en el ligamento periodontal, con la menor fuerza inducida (1.05 N) y una respuesta más localizada a nivel apical.

En el diseño elipsoidal, se observó en general una menor magnitud de esfuerzos y una distribución más homogénea en comparación con el biselado. En la posición incisal, el ligamento periodontal presentó una deformación de 3.36×10^{-5} mm y un esfuerzo de 1.79×10^{-4} MPa, con fuerzas inducidas entre 1.52 y 1.94 N. El hueso cortical registró 3.36×10^{-5} mm y 1.98 MPa, mientras que el hueso trabecular mostró 2.34×10^{-5} mm y 0.03 MPa. En la posición central, se observaron valores de deformación de 7.44×10^{-5} mm y esfuerzo de 0.53 MPa en el ligamento periodontal, con una distribución homogénea en los tejidos óseos. Finalmente, la posición gingival presentó los valores más bajos de activación tisular, con deformación de 6.53×10^{-5} mm y esfuerzo de 7.01×10^{-5} MPa en el ligamento periodontal, así como bajos niveles de esfuerzo en hueso cortical y trabecular.

Figura 2. Distribución de esfuerzos en el ligamento periodontal, hueso cortical y trabecular para los diseños biselado y elipsoidal en posición incisal



Los resultados evidencian que tanto el diseño como la posición del attachment influyen en el comportamiento mecánico del sistema alineador–diente–periodonto. Las configuraciones incisales y el diseño biselado se asociaron con una mayor respuesta biomecánica y mayor movimiento acumulado en el tiempo, mientras que el diseño elipsoidal mostró una distribución de cargas más homogénea y de menor magnitud en los tejidos de soporte.

DISCUSIÓN

El movimiento de extrusión con alineadores continúa siendo uno de los movimientos menos predecibles, y la evidencia disponible sugiere que su comportamiento depende en gran medida del diseño del attachment. En el presente estudio, tanto la forma como la posición del attachment modificaron el desplazamiento vertical, el movimiento acumulado en el tiempo, la distribución del estrés en el alineador y la respuesta biomecánica de los tejidos de soporte. En general las configuraciones en posición incisal y el diseño biselado mostraron la mayor eficiencia mecánica, mientras que el diseño elipsoidal presentó una distribución de cargas más homogénea.

Estos hallazgos concuerdan con lo observado por Costa et al., quienes encontraron que diferentes geometrías de attachments generan distintos patrones de fuerza durante la extrusión, y que los diseños de bordes redondeados producen fuerzas menores y una distribución más controlada, mientras que los diseños más retentivos generan fuerzas extrusivas más altas, aunque con componentes no deseados en otros ejes. De manera

similar, en el presente estudio el diseño biselado mostró mayor desplazamiento y mayor AUC, mientras que el elipsoidal, similar al diseño de Costa, exhibió una distribución de estrés más difusa y homogénea. Esto sugiere que la mayor capacidad de movimiento del diseño biselado podría estar relacionada con una transmisión más concentrada de fuerzas, mientras que el diseño elipsoidal favorecería una disipación más uniforme de las cargas.

Los resultados también coinciden con el ensayo clínico aleatorizado de Groody et al.⁴ en el que los attachments horizontales convencionales fueron más eficaces que los optimizados para lograr la extrusión de incisivos laterales superiores; en ese estudio, la extrusión lograda fue en promedio 76% con attachments horizontales frente a 62% con attachments optimizados. De forma concordante, el análisis realizado mostró que el diseño biselado presentó mayores valores de movimiento acumulado que el elipsoidal en todas las posiciones. Sin embargo, este estudio FEM permitió el análisis de un componente biomecánico no evaluado en el ensayo clínico aleatorizado, evidenciando que esta mayor eficiencia se acompañó de mayores concentraciones de estrés en la interfase alineador–attachment y en los tejidos de soporte. Esto sugiere que los diseños más eficaces clínicamente no necesariamente corresponden a los más favorables desde el punto de vista de la distribución de tensiones.

En el análisis de la forma y la posición del attachment en el presente estudio la configuración más eficiente en términos de movimiento acumulado fue la biselada en posición incisal, lo cual contrasta con lo hallado en el estudio de Borjab et al.¹⁴ donde se observó que el attachment rectangular en posición de tercio medio generó la mayor fuerza extrusiva y el menor momento no deseado en contraste con los hemi- elipsoidales en posición cervical los cuales fueron más favorables para minimizar las fuerzas reciprocas indeseadas en los dientes adyacentes o de anclaje. Esta diferencia sugiere que la configuración que optimiza el control biomecánico no siempre coincide con la que maximiza el desplazamiento. En otras palabras, el control del movimiento y la eficiencia del movimiento no son equivalentes, y probablemente representan dos dimensiones biomecánicas complementarias.

Esta interpretación se confirma con hallazgos que demuestran que los attachments aumentan consistentemente las fuerzas extrusivas, pero que todos los sistemas generan también fuerzas y momentos no deseados¹⁵. De manera coincidente, los resultados del presente estudio mostraron que las configuraciones más activas, especialmente el diseño biselado, se asociaron con mayores concentraciones de estrés y mayor deformación del alineador. Sin embargo, a diferencia de enfoques centrados en la evaluación de fuerzas y

momentos generales, el presente análisis permitió el análisis de la respuesta tisular, evidenciando cómo estas cargas se transmiten hacia el ligamento periodontal, el hueso cortical y el trabecular. Desde esta perspectiva, el diseño elipsoidal no elimina la complejidad biomecánica del sistema, pero si parece modularla hacia una distribución más homogénea y probablemente mas fisiológica.

El análisis del AUC aportó una medida integrada del movimiento acumulado en el tiempo y permitió complementar la interpretación del desplazamiento final. Bajo este criterio, el diseño biselado en posición incisal mostró la mayor eficiencia mecánica, seguido por el biselado en posición central y el elipsoidal en incisal. Este patrón fue coherente con la mayor activación observada en el alineador y en el complejo dentoalveolar. Sin embargo, los mayores valores de AUC no se asociaron con una mejor distribución de tensiones, sino con una mayor concentración de cargas. Por ello, los resultados sugieren que el aumento en la eficiencia mecánica del movimiento implica una disminución en la uniformidad de la distribución de fuerzas.

En términos clínicos, estos hallazgos podrían interpretarse como indicativos de que los diseños biselados, especialmente en posición incisal, favorecen la extrusión cuando se prioriza la eficiencia mecánica, mientras que los elipsoidales podrían ser preferibles cuando se busca una distribución de cargas más uniforme. Sin embargo, esta interpretación requiere un análisis cuidadoso, ya que el modelo no reproduce de manera completa la respuesta biológica dinámica de los tejidos, ni permite extrapolar directamente estos resultados a escenarios clínicos específicos. Más bien, los datos sugieren que la selección del attachment podría depender del equilibrio deseado entre magnitud de movimiento y control biomecánico del sistema. Siendo que el metodo FEM fue estatico, se genero la curva tiempo-desplazamiento como una modelacion matematica de tipo complementario tomada a partir de las condiciones mecanicas iniciales del modelo , y no como una simulacion dinamica directa del movimiento dentario .

Los resultados de este estudio sugieren que la selección del diseño y la ubicación del attachment debe individualizarse según el objetivo biomecánico del tratamiento. Los attachments biselados en posición incisal podrían ser preferibles en casos donde se requiera maximizar la extrusión de incisivos centrales, debido a su mayor eficiencia mecánica. Sin embargo, el incremento en las concentraciones de estrés asociado a este diseño indica la necesidad de un control cuidadoso para evitar efectos indeseados sobre los tejidos de soporte. Por otro lado, los attachments elipsoidales podrían ser una alternativa

en situaciones donde se priorice una distribución más homogénea de las fuerzas, favoreciendo un comportamiento biomecánico más controlado.

El presente estudio tiene algunas limitaciones a considerar. El FEM se realizó bajo un enfoque estático, por lo que los resultados representan condiciones mecánicas iniciales y no la evolución biológica del movimiento dentario. Asimismo, la simulación de la progresión del movimiento corresponde a una modelación teórica y no a una predicción clínica directa. Adicionalmente, el PET-G se modeló como un material elástico lineal, sin considerar su posible comportamiento viscoelástico o elastoplástico, lo cual podría influir en la respuesta mecánica del alineador a lo largo del tiempo.

CONCLUSIÓN

La respuesta observada en el complejo dentoalveolar dependió del tejido analizado, donde los mayores valores de deformación se dieron principalmente en diseño elipsoidal mientras que los mayores esfuerzos se dieron en el ligamento periodontal con diseños biselados.

En el sistema alineador–attachment, los attachments biselados generaron mayores valores de deformación y esfuerzo, mientras que los elipsoidales presentaron una distribución más homogénea de las tensiones en la interfase alineador–attachment.

El movimiento acumulado estimado fue mayor en la posición incisal que en la central y gingivales, y superior en los attachments biselados respecto a los elipsoidales. Estos hallazgos sugieren que el diseño y la posición del attachment influyen en el comportamiento mecánico del sistema durante la extrusión simulada de incisivos centrales superiores.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses relacionado con este trabajo.

FINANCIACIÓN

Esta investigación se realizó sin financiación externa; fue apoyada íntegramente con recursos propios y las instalaciones de la institución.

REFERENCIAS

1. Weir T. Clear aligners in orthodontic treatment. *Aust Dent J.* 2017;62(Suppl 1):58–62. DOI: **10.1111/adj.12480.**
2. Papadimitriou A, Mousouleas S, Gkantidis N, Kloukos D. Clinical effectiveness of Invisalign® orthodontic treatment: a systematic review. *Prog Orthod.* 2018;19(1):37. DOI: **10.1186/s40510-018-0235-z.**
3. Castroflorio T, Parrini S, Rossini G. Aligner biomechanics: where we are now and where we are heading. *J World Fed Orthod.* 2024;13(2):57–64. DOI: **10.1016/j.ejwf.2023.12.005.**
4. Groody JT, Lindauer SJ, Kravitz ND, Carrico CK, Madurantakam P, Shroff B, et al. Effect of clear aligner attachment design on extrusion of maxillary lateral incisors: a multicenter, single-blind randomized clinical trial. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2023;164(5):618–627. DOI: **10.1016/j.ajodo.2023.07.011.**
5. Costa R, Calheiros FC, Ballester RY, Gonçalves F. Effect of three different attachment designs in the extrusive forces generated by thermoplastic aligners in the maxillary central incisor. *Dental Press J Orthod.* 2020;25(3):46–53. DOI: **10.1590/2177-6709.25.3.046-053.oar.**
6. Laohachaiaroon P, Samruajbenjakun B, Chaichanasiri E. Initial displacement and stress distribution of upper central incisor extrusion with clear aligners using three-dimensional finite element analysis. *Dent J (Basel).* 2022;10(6):114. DOI: **10.3390/dj10060114.**
7. Savignano R, Valentino R, Rationale AV, Michelotti A, Barone S, D'Antò V. Biomechanical effects of different auxiliary-aligner designs for the extrusion of an upper central incisor: a finite element analysis. *J Healthc Eng.* 2019;2019:9687127. DOI: **10.1155/2019/9687127.**
8. Robertson L, Kaur H, Fagundes NCF, Romanyk D, Major P, Flores-Mir C. Effectiveness of clear aligner therapy for orthodontic treatment: a systematic review. *Orthod Craniofac Res.* 2020;23(2):133–142. DOI: **10.1111/ocr.12353.**
9. Elshazly TM, Bourauel C, Aldesoki M, Ghoneima A, Abuzayda M, Talaat W, et al. Computer-aided finite element model for biomechanical analysis of orthodontic aligners. *Clin Oral Investig.* 2023;27(1):115–124. DOI: **10.1007/s00784-022-04692-7.**

10. Ho CT, Huang YT, Chao CW, Huang TH, Kao CT. Effects of different aligner materials and attachments on orthodontic behavior. *J Dent Sci.* 2021;16(3):1001–1009. DOI: **10.1016/j.jds.2021.01.011.**
11. Fiorillo G, Campobasso A, Croce S, Hussain U, Battista G, Lo Muzio E, et al. Accuracy of clear aligners in the orthodontic rotational movement using different attachment configurations. *Orthod Craniofac Res.* 2024;27(6):996–1003. DOI: **10.1111/ocr.12846.**
12. Upadhyay M, Arqub SA. Biomechanics of clear aligners: hidden truths & first principles. *J World Fed Orthod.* 2022;11(1):12–21. DOI: **10.1016/j.ejwf.2021.11.002.**
13. Rossini G, Parrini S, Castroflorio T, Deregibus A, Debernardi CL. Efficacy of clear aligners in controlling orthodontic tooth movement: a systematic review. *Angle Orthod.* 2015;85(5):881–889. DOI: **10.2319/061614-436.1.**
14. Bojrab A, Akbari A, Broyles D, Magura J, Lear M, Eckert G, et al. In Vitro Comparison of the Effectiveness of Different Attachment Shapes and Locations on Extrusion of the Upper Left Lateral Incisor Using Thermoplastic Aligners. *Orthod Craniofac Res.* 2025;28(2):371–378. DOI: **10.1111/ocr.12887.**
15. Ryu JH, Kwon JS, Jiang HB, Cha JY, Kim KM. Effects of thermoforming on the physical and mechanical properties of thermoplastic materials for transparent orthodontic aligners. *Korean J Orthod.* 2018;48(5):316–325. DOI: **10.4041/kjod.2018.48.5.316.**
16. Skaik A, Wei XL, Abusamak I, Iddi I. Effects of time and clear aligner removal frequency on the force delivered by different polyethylene terephthalate glycol-modified materials determined with thin-film pressure sensors. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2019;155(1):98–107. DOI: **10.1016/j.ajodo.2018.03.017.**

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Comparación de la distribución del estrés (MPa) entre el diseño biselado y el elipsoidal en posición incisal.

Figura 1a. Distribución del estrés (MPa) en el diseño biselado en posición incisal.

Figura 1b. Distribución del estrés (MPa) en el diseño elipsoidal en posición incisal.

Figura 2. Distribución de esfuerzos en el ligamento periodontal, hueso cortical y trabecular para los diseños biselado y elipsoidal en posición incisal

Figura 2a. Distribución de esfuerzos (MPa) en hueso trabecular para el diseño biselado en posición incisal.

Figura 2b. Distribución de esfuerzos (MPa) en hueso trabecular para el diseño elipsoidal en posición incisal.