

ORIGINAL ARTICLE

Comparación de tensiones y desplazamientos entre mini-implantes de acero y titanio insertados con diferentes angulaciones: análisis de elementos finitos.

Comparison of stresses and displacements between steel and titanium mini-implants inserted with different angles: finite element analysis.

Ana Gabriela Magaña Lamas ¹  | Alan Martínez Zumarán ²  | Norma Verónica Zavala Alonso ¹  | Oscar Sánchez-Armass Cappello ¹  | Gylmar Mariel Cárdenas ¹  | Enrique González García ²  | Marco Felipe Salas Orozco ¹ 

OPEN ACCESS

Afiliación Institucional

¹ Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Estomatología, Especialidad en Ortodoncia y Ortopedia Dentomaxilofacial, San Luis Potosí, México.

Citation:

Magaña Lamas A.G., Martínez Zumarán A., Zabala Alonso N.V., Sánchez-Armass Cappello O., Cárdenas G.M., González García E., Salas Orozco M.F. Comparación de tensiones y desplazamientos entre mini-implantes de acero y titanio insertados con diferentes angulaciones: Análisis de elementos finitos. *Rev Estomatol.* 2023; 31(1):e12743. DOI: 10.25100/re.v31i1.12743

Received: 30 Enero 2023

Evaluated: 12 Mayo 2023

Accepted: 20 Noviembre 2023

Published: 30 Diciembre 2023

Corresponding author: Marco Felipe Salas Orozco. Av. Dr. Manuel Nava No. 2, Zona Universitaria, Facultad de estomatología, 78290 San Luis Potosí, S.L.P, México. Telephone / Mobile: +52 4448111193 Email: marco.salas@uaslp.mx

Palabras Clave:

Orthodontics; Materials Testing; In Vitro Techniques.

Keywords:

Orthodontics; mini-implants; finite elements; tension; displacement.

Copyright:

© Universidad del Valle.



RESUMEN

Objetivo: Evaluar cuantitativamente las tensiones y desplazamientos de los mini-implantes de acero y titanio insertados bajo diferentes ángulos y aplicando una fuerza de retracción.

Materiales y métodos: Se creó un modelo CAD del mini-implante de la marca TD Orthodontics, con un diámetro de 1.3 mm y 8 mm de longitud. Posteriormente, se asignaron las características de los materiales a evaluar (acero o aleación de titanio). Se creó una figura tridimensional con dos componentes que simulan el espesor y las características de los huesos cortical y trabecular (2 mm de ancho de hueso cortical y 18 mm de profundidad de hueso trabecular). Se utilizó el software SolidWorks para hacer la malla de los modelos de mini-implante y hueso, y así realizar el análisis de elementos finitos en los mini-implantes con ángulos de inserción de 30°, 60°, 90° y se aplicó una fuerza de retracción ortodóncica simulada de 2 N en cada uno de estos modelos de elementos finitos.

Resultados: No se encontró una diferencia significativa entre los mini-implantes de acero inoxidable y los mini-implantes de titanio en las tres angulaciones evaluadas en términos del estrés máximo de von Mises. En cuanto al desplazamiento, los mini-implantes de titanio sufrieron mayor desplazamiento en las tres angulaciones evaluadas en comparación con los mini-implantes de acero inoxidable.

Conclusión: Independientemente de los ángulos, la diferencia en la tensión generada y la deformación en los mini-implantes de acero inoxidable y los mini-implantes de titanio bajo una fuerza de retracción de 2N no parece ser significativa. Por lo tanto, la angulación de inserción de los mini-implantes parece jugar un papel primordial en la cantidad de estrés y deformación generados en los aditamentos usados.

ABSTRACT

Objective: The objective of this study was to quantitatively evaluate the stresses and displacements of steel and titanium mini-implants inserted under different angles and applying a retraction force.

Materials and Methods: A CAD model of the TD Orthodontics brand mini-implant, with a diameter of 1.3 mm and 8 mm length, was created. Afterwards, the characteristics of the materials to be evaluated (steel or titanium alloy) were assigned. A three-dimensional figure was created with two components that simulate the thickness and characteristics of cortical and trabecular bone (2 mm width of cortical bone and 18 mm depth of trabecular bone). The SolidWorks software was used to mesh the mini-implant and bone models and to perform the finite element analysis on the mini-implants with insertion angles of 30°, 60°, 90° and a simulated orthodontic retraction force of 2 N was applied on each of these finite element models.

Results: In terms of the maximum von Mises stress in the different angles evaluated, it seems that there is no significant difference between the stainless steel mini-implants and the titanium mini-implants in the three angles evaluated. In terms of displacement, the titanium mini-implants in general suffered greater displacement in the three angles evaluated compared to the stainless steel mini-implants.

Conclusion: Regardless of the angles, the difference in the generated stress and deformation in the stainless steel mini-implants and the titanium mini-implants under a retraction force of 2 N does not seem to be significant. Therefore, the insertion angle of the mini-implants seems to play a primary role in the amount of stress and deformation generated in the attachments used.

RELEVANCIA CLÍNICA

Este estudio ayuda a determinar cuáles son los mejores criterios de colocación de mini implantes de ortodoncia de titanio y acero en, cuanto a su ángulo de inserción y sus características de longitud y diámetro. Con el fin de mejorar el pronóstico a largo plazo de este tipo de aditamentos.

INTRODUCCIÓN

En 2021, se celebró el 80 aniversario de la invención del análisis de elementos finitos por el científico ruso-canadiense A. Hrennikof. En las últimas décadas, el análisis de elementos finitos se ha convertido en una herramienta ampliamente utilizada en el campo de la ortodoncia. El análisis de elementos finitos consiste en obtener una solución matemática analítica a un problema de interés, ampliamente delimitado. Para obtener esta solución, la estructura estudiada debe dividirse en un gran número de elementos más pequeños cuyo comportamiento se estudiará individualmente, lo que simplifica el análisis de cada uno, para luego integrar todos los elementos en un solo conjunto a través de puntos nodales. Al analizar el estrés y la deformación de los elementos individuales, se puede conocer su comportamiento mecánico numéricamente.^{1,2}

Asimismo, los mini-implante ortodónticos se han convertido en elementos fundamentales para llevar a cabo movimientos dentales durante los tratamientos ortodónticos. Esto se debe a que tienen ventajas como proporcionar un anclaje absoluto, se utilizan para períodos de tiempo específicos y cortos, y su retención depende exclusivamente del anclaje mecánico proporcionado por las estructuras óseas circundantes, sin embargo; su efectividad reside principalmente en este último punto, ya que para que su uso sea exitoso deben tener un anclaje suficiente durante el período de tiempo necesario.³ Los factores de riesgo asociados a la falla del anclaje de los mini-implantes son diversos e incluyen tanto características de los mini-implantes como de los pacientes. Con respecto a los factores de riesgo asociados a la falla de los mini-implantes, se menciona la longitud, el diámetro y el ángulo de inserción.^{4,5}

Por lo tanto, el estudio de las tensiones presentes en el cuerpo del mini-implante ortodóntico, así como su distribución en las estructuras óseas circundantes es útil para mejorar el diseño de los mini-implantes, así como los protocolos de colocación y así reducir la tasa de fallos de estos dispositivos después de ser colocados en las bocas de los pacientes.^{6,7}

En estudios anteriores se han llevado a cabo análisis de elementos finitos en mini-implante ortodónticos, sin embargo, constantemente aparecen nuevos mini-implante con características mejoradas y diferentes aleaciones, por lo que es importante conocer el comportamiento de estos dispositivos para mejorar su tasa de éxito en la clínica.^{8,9}

Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar cuantitativamente las tensiones y desplazamientos de los mini-implantes de acero y titanio insertados bajo diferentes ángulos y aplicando una fuerza de retractación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se creó un modelo CAD del mini-implante de la marca TD Orthodontics, con un diámetro de 1.3 mm y 8 mm de longitud. Posteriormente, se asignaron las características de los materiales a evaluar (acero o aleación de titanio) (Tabla 1). Se creó una figura tridimensional con dos componentes que simulan el espesor y las características de los huesos cortical y trabecular (2 mm de ancho de hueso cortical y 18 mm de profundidad de hueso trabecular)(Figura 1). Se llevó a cabo el ensamblaje de las estructuras de hueso cortical y trabecular, así como el agujero en el que se inserta el mini-implante. Se asignaron densidades específicas de hueso cortical y trabecular de acuerdo a lo reportado por Kuroda et al.

(propiedades mecánicas heterogéneas basadas en la densidad de hueso masivo, que a su vez se derivan de la unidad Hounsfield).¹⁰

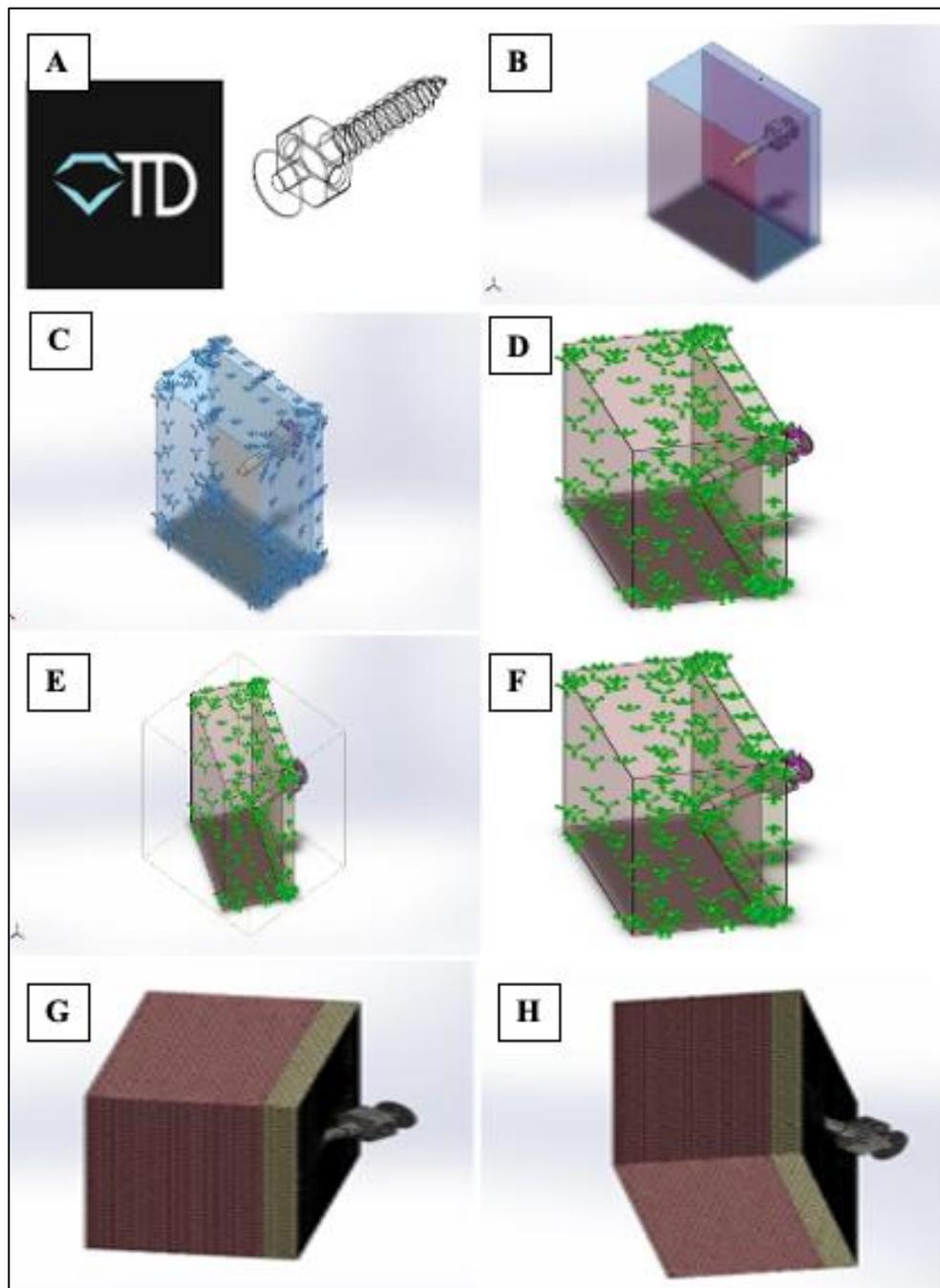


Figura 1. (A) Modelo virtual marca TD Orthodontics de 1.5 * 8 mm. (B) Ensamble mini implante- hueso con propiedades correspondientes. Ensamble de los mini-implantes de titanio a 30°, 60° y 90 ° (C,E,G). Ensamble de los mini-implantes de acero a 30°, 60° y 90 ° (D,F,H).

Tabla 1. Propiedades de los materiales usados

Material	Modulo de Young(MPa)	Relación de Poisson (v)
Acero	210.000	0.3
Titanio	110.000	0.35
Hueso cortical	15.000	0.3
Hueso trabecular	1.500	0.3

Se utilizó el software SolidWorks para hacer la malla de los modelos de mini-implante y hueso, y así realizar el análisis de elementos finitos en los mini-implantes con ángulos de inserción de 30°, 60°, 90° y se aplicó una fuerza de retracción ortodóncica simulada de 2 N en cada uno de estos modelos de elementos finitos. Por lo tanto, se generaron seis modelos de elementos finitos y se agruparon como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Lista de los modelos analizados en el estudio

Grupo	Descripción
1	Mini-implante de acero inoxidable 1.3 × 8 mm con inserción a 30°
2	Mini-implante de acero inoxidable 1.3 × 8 mm con inserción a 60°
3	Mini-implante de acero inoxidable 1.3 × 8 mm con inserción a 90°
4	Mini-implante de titanio 1.3 × 8 mm con inserción a 30°
5	Mini-implante de titanio 1.3 × 8 mm con inserción a 60°
6	Mini-implante de titanio 1.3 × 8 mm con inserción a 90°

RESULTADOS

En cuanto al estrés máximo de von Mises en las diferentes angulaciones evaluadas, podemos observar que parece no haber una diferencia significativa entre los mini-implantes de acero inoxidable y los mini implantes de titanio en las tres angulaciones evaluadas. La angulación en la cual se observa que el mini implante sufre mayor estrés tanto en el grupo de titanio como en el grupo de acero inoxidable es la de 60°. La angulación donde los mini implantes de ambos grupos sufren menor estrés es en la angulación de 90° (Tabla 3).

Tabla 3. Tensión máxima de von Mises (MPa)

Angulación	Acero	Titanio
30°	30.16 Mpa	30.49 Mpa
60°	50.72 Mpa	49.71 Mpa
90°	20.58 Mpa	20.71 Mpa

En cuanto al desplazamiento, los mini-implantes de titanio en general sufrieron mayor desplazamiento en las tres angulaciones evaluadas en comparación con los mini implantes de acero inoxidable. La angulación en la cual los mini implantes de ambos grupos sufrieron mayor desplazamiento fue la de 60°, seguida por la angulación de 30° y finalmente la angulación de 90° fue donde los mini-implantes sufrieron menor desplazamiento (Tabla 4). Finalmente, en cuanto a la deformación bajo carga el titanio fue el material que sufrió mayor deformación mientras que el material que sufrió menor deformación fue el hueso trabecular.

Table 4. Desplazamiento de los mini-implantes.

Angulación	Acero	Titanio
30°	0.3344 mm	0.5218 mm
60°	0.4000 mm	0.6214 mm
90°	0.2793 mm	0.3985 mm

DISCUSIÓN

El objetivo de este estudio fue evaluar cuantitativamente las tensiones, desplazamientos y deformaciones de los mini-implantes de acero y titanio insertados en diferentes ángulos y aplicando al mismo tiempo una fuerza de retractación de 2 N. Los esfuerzos y deformaciones entre los mini-implantes de acero y titanio no mostraron una diferencia importante, encontrándose valores muy similares entre los dos materiales.

En un estudio del 2019 también se evaluaron mini-implantes de titanio y acero inoxidable en diferentes angulaciones (30°, 45°, 60°, 75° and 90°) aplicando una fuerza torsional de 20 N y una fuerza lineal de 150 g. Al igual que en este estudio, los autores no reportaron diferencias significativas entre el estrés y la deformación generadas en los mini-implantes de titanio y acero inoxidable. A diferencia de nuestros resultados, los autores del estudio encontraron que la mayor cantidad de estrés y deformación se dio en el grupo de 90°, seguido por los grupos de 75° y 60°.¹¹ Machado et al., también reportaron que, la mayor cantidad de tensión se encontró en el grupo de mini-implantes insertados a 90°. Los autores aplicaron una fuerza de 200 g perpendicular al eje largo del mini-tornillo para simular la fuerza de reacción durante la retracción en masa.¹² Estas diferencias pueden deberse a las distintas fuerzas usadas, la dirección de la aplicación de la fuerza y los diferentes diseños de mini-implantes usados.

Nuestros resultados parecen coincidir con los de Kuroda et al., estos autores evaluaron la estabilidad de mini-implantes de titanio colocados en tres diferentes angulaciones soportando una fuerza de 2N. Las angulaciones que manejaron los autores fueron de 0, 15, 30 y 45 °. Los autores encontraron que la angulación en la cual los mini-implantes sufrían mayor desplazamiento fue la angulación de 45 ° seguida por la angulación de 30° con una fuerza aplicada hacia abajo de 2 N. En este estudio, encontramos que tanto los mini-implantes de titanio como los de acero sufrieron su mayor deformación en la angulación de 60° y 30°. En cuanto al estrés de von Mises, Kuroda et al., encontraron que el estrés máximo se aproximadamente en los 60 megapascuales (MPa) en la angulación de 45° aplicando fuerzas hacia la derecha, a la izquierda y hacia abajo sobre el mini-implante. En este estudio, el estrés máximo de von Mises (aproximadamente 50 MPa) se observó en la angulación de 60° tanto en los mini-implantes de acero como los de titanio aplicando una fuerza de tracción de 2 N.¹⁰ En el estudio de Arantes et al., los autores evaluaron a través del análisis de elementos finitos dos diferentes marcas de mini-implantes (SIN [Implant System, São Paulo/SP, Brazil] and RMO [Rocky Mountain Orthodontics, Seoul, South Korea]) de titanio insertados a 45° y 90° y aplicando una fuerza de tracción de 200 gf y una de torción de 20 N.cm. Los autores concluyeron que a mayor ángulo de inclinación los mini-implantes tenían menor resistencia a la deformación; siendo el ángulo de 45° el que generaba mayor deformación. Esto coincide con nuestros resultados en que la deformación se detectó entre los 30° y 60° de angulación.¹³ Así mismo, Perillo et al., usaron el análisis de elementos finitos para evaluar la colocación de mini-tornillos usando 5 angulaciones diferentes (30°, 60°, 90°, 120° y 150°) y aplicando una fuerza de 2 N. Los autores reportaron que las angulaciones mayores o menores a 90° tienden a generar mayor estrés y por lo tanto ponen en riesgo

la estabilidad de los mini-tornillos. Esto concuerda con lo observado en este estudio, ya que la angulación a la cual nosotros observamos menor estrés y desplazamiento fue en la angulación de 90°. ¹⁴

Nuestros resultados coinciden con los de Sivamurthy et al., en que los valores de tensión son mayores cuando el mini-implante se inserta en un ángulo de 60° en comparación con un ángulo de inserción de 30°. Es evidente que la distribución de la tensión se concentró en el cuello del mini-implante y el hueso cortical se sometió a mayores tensiones en comparación con el hueso esponjoso. Por lo tanto, mientras se reduce el ángulo de inclinación, la zona de contacto del mini-implante y el hueso cortical aumenta para mejorar la estabilidad de los mini-implantes. ¹⁵ El estudio de Brar and Dua también reporta que el máximo estrés se observó en los mini-implantes insertados con una angulación de entre 60° y 75°. ¹⁶

En el estudio realizado por Marcé-Nogué et al., en donde podemos ver la comparación de 10 micro tornillos de titanio con una carga a 1 N coincidimos en que la influencia del ángulo de inserción genera diferentes cantidades de desplazamiento en la cabeza del tornillo y diferentes valores de tensión en el cuello del micro tornillo; sin embargo, en nuestro estudio utilizamos una fuerza de 2N. Dicho autor nos menciona en su estudio que, en situaciones favorables (suficiente grosor de hueso cortical) el comportamiento de la mayoría de los tornillos fue bastante similar en cuanto a tensión y deformación, pero en situaciones desfavorables (hueso cortical fino) algunos de los micro tornillos tuvieron un mejor comportamiento que otros. ¹⁷

De acuerdo a estudios anteriores, se considera que el ángulo de inserción óptimo se encuentra entre 30° y 70°. Es inclinación permite que la superficie de contacto entre el mini-implante y el hueso aumente y permita un mejor anclaje. ^{18,19} Por lo tanto, la angulación de inserción de los mini-implantes parece jugar un papel primordial en la cantidad de estrés y deformación generados en los aditamentos usados. ²⁰

CONCLUSIÓN

Independientemente de los ángulos, la diferencia en la tensión generada y la deformación en los mini-implantes de acero inoxidable y los mini-implantes de titanio bajo una fuerza de retracción de 2 N no parece ser significativa.

REFERENCIAS

1. Liu WK, Li S, Park HS. Eighty years of the finite element method: Birth, evolution, and future. Arch Comput Methods Eng. 2022;1-23.
2. Stahl E, Keilig L, Abdelgader I, Jäger A, Bourauel C. Numerical analyses of biomechanical behavior of various orthodontic anchorage implants. J Orofac Orthop Kieferorthopädie. 2009;70(2):115-27.
3. Liu Y, Yang Z jin, Zhou J, Xiong P, Wang Q, Yang Y, et al. Comparison of anchorage efficiency of orthodontic mini-implant and conventional anchorage reinforcement in patients requiring maximum orthodontic anchorage: a systematic review and meta-analysis. J Evid Based Dent Pract. 2020;20(2):101401.
4. Casaña-Ruiz MD, Bellot-Arcís C, Paredes-Gallardo V, García-Sanz V, Almerich-Silla JM. Risk factors for orthodontic mini-implants in skeletal anchorage biological stability: a systematic literature review and meta-analysis. Sci Rep. 2020;10(1):1-10.
5. Tatli U, Alraawi M, Toroğlu MS. Effects of size and insertion angle of orthodontic mini-implants on skeletal anchorage. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2019;156(2):220-8.
6. Mešić E, Muratović E, Redžepagić-Vražalica L, Pervan N, Muminović AJ, Delić M, et al. Experimental & fem analysis of orthodontic mini-implant design on primary stability. Appl Sci. 2021;11(12):5461.
7. Redžepagić-Vražalica L, Mešić E, Pervan N, Hadžiabdić V, Delić M, Glušac M. Impact of implant design and bone properties on the primary stability of orthodontic mini-implants. Appl Sci. 2021;11(3):1183.

8. Asok N, Sing K, Tandon R, Chandra P. Retention of mini screws in orthodontics—a comparative in vitro study on the variables. *South Eur J Orthod Dentofac Res.* 2020;7(2):38-42.
9. Mazhari M, Khanehmasjedi M, Mazhary M, Atashkar N, Rakhshan V. Dynamics, Efficacies, and Adverse Effects of Maxillary Full-Arch Intrusion Using Temporary Anchorage Devices (Miniscrews): A Finite Element Analysis. *BioMed Res Int.* 2022;2022.
10. Kuroda S, Inoue M, Kyung HM, Koolstra JH, Tanaka E. Stress Distribution in Obliquely Inserted Orthodontic Miniscrews Evaluated by Three-Dimensional Finite-Element Analysis. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2017;32(2).
11. Sabley KH, Shenoy U, Banerjee S, Akhare P, Hazarey A, Karia H. Comparative Evaluation of Biomechanical Performance of Titanium and Stainless Steel Mini Implants at Different Angulations in Maxilla: A Finite Element Analysis. *J Indian Orthod Soc.* 2019;53(3):197-205.
12. Machado GL. Effects of orthodontic miniscrew placement angle and structure on the stress distribution at the bone miniscrew interface—A 3D finite element analysis. *Saudi J Dent Res.* 2014;5(2):73-80.
13. Arantes V de OR, Corrêa CB, Lunardi N, Boeck Neto RJ, Spin-Neto R, Boeck EM. Insertion angle of orthodontic mini-implants and their biomechanical performance: finite element analysis. *Rev Odontol UNESP.* 2015;44:273-9.
14. Perillo L, Jamilian A, Shafieyoon A, Karimi H, Cozzani M. Finite element analysis of miniscrew placement in mandibular alveolar bone with varied angulations. *Eur J Orthod.* 2015;37(1):56-9.
15. Sivamurthy G, Sundari S. Stress distribution patterns at mini-implant site during retraction and intrusion—a three-dimensional finite element study. *Prog Orthod.* 2016;17(1):1-11.
16. Brar LS, Dua VS. The magnitude and distribution pattern of stress on implant, teeth, and periodontium under different angulations of implant placement for en masse retraction: a finite element analysis. *J Indian Orthod Soc.* 2017;51(1):3-8.
17. Marcé-Nogué J, Walter A, Gil L, Puigdollers A. Finite element comparison of 10 orthodontic microscrews with different cortical bone parameters. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2013;28(4).
18. Kravitz ND, Kusnoto B. Risks and complications of orthodontic miniscrews. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2007;131(4):S43-51.
19. Liou EJ, Chen PH, Wang YC, Lin JCY. A computed tomographic image study on the thickness of the infrazygomatic crest of the maxilla and its clinical implications for miniscrew insertion. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2007;131(3):352-6.
20. Deguchi T, Nasu M, Murakami K, Yabuuchi T, Kamioka H, Takano-Yamamoto T. Quantitative evaluation of cortical bone thickness with computed tomographic scanning for orthodontic implants. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2006;129(6):721-e7.