






## Artículo original

# Resistencia friccional entre brackets cerámicos y brackets de autoligado usando un análisis de elementos finitos

*Frictional resistance between conventional ceramic brackets and self-ligating ceramic brackets using a finite element analysis*

*Resistência ao atrito entre braquetes cerâmicos e braçadeiras autoligáveis usando análise de elementos finitos*

Sandra Liliana Gómez-Gómez<sup>1</sup> , Yesid Montoya-Góez<sup>2</sup> , Diana Marcela González-Flórez<sup>3</sup> ,  
Leidy Marcela Restrepo-Narváez<sup>3</sup> , Carlos Martín Ardila<sup>4</sup> 

1. Ortodoncista, Mg. en Epidemiología, Profesor Asociada Universidad de Antioquia.

2. Ingeniero Biomédico, Profesor Escuela de Ingeniería de Antioquia, Universidad CES. Medellín Colombia.

3. Ortodoncista Universidad de Antioquia.

4. Ph.D en Epidemiología, Grupo de Estomatología Biomédica, Profesor Titular. Departamento de Periodoncia, Universidad de Antioquia. Medellín Colombia.

## Fecha correspondencia:

Recibido: enero de 2020.

Aceptado: abril de 2020.

## Forma de citar:

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.

## Open access

© Derecho de autor

Licencia creative commons

Ética de publicaciones

Revisión por pares

Gestión por Open Journal System

DOI: [http://dx.doi.org/10.21615/](http://dx.doi.org/10.21615/cesodon.33.2.7)

cesodon.33.2.7

ISSN 0120-971X

e-ISSN 2215-9185

## Resumen

**Introducción y objetivo:** La fricción en la ortodoncia se produce por contacto directo entre el bracket, el alambre y la ligadura. La fricción reduce la eficiencia en los tratamientos de ortodoncia. Esta investigación comparó la resistencia a la fricción entre los brackets cerámicos convencionales y los brackets cerámicos de autoligado pasivos utilizando un método de elementos finitos (MEF). **Materiales y métodos:** Se realizó un total de 810 deslizamientos, combinando brackets cerámicos convencionales y autoligados, y alambres de ortodoncia de acero inoxidable, níquel-titanio y de la aleación  $\beta$ -titanio de 0.016 pulgadas, 0.017x0.025 pulgadas y 0.019 x0.025 pulgadas. La media máxima de resistencia a la fricción estática (MRF) se comparó entre las diferentes combinaciones de brackets, alambre, ligadura y angulación del bracket de 0 °, 7 ° y 13 °. **Resultados:** Las variables con el comportamiento de fricción más alto fueron 13 °, aleación  $\beta$  titanio, 0.017x0.025 pulgadas, y brackets cerámicos convencionales con ligaduras elásticas. **Conclusión:** MEF es una alternativa adecuada para la predicción de la MRF en varias combinaciones de brackets, alambres, ligaduras y angulaciones. El método permitió definir una menor resistencia a la fricción para los brackets de autoligado, así como una relación directa entre el aumento del ángulo y el área de contacto entre el bracket y el alambre, con valores más altos de resistencia al deslizamiento. Se estableció que un alambre de mayor calibre no implica un área de mayor contacto con el bracket.

**Palabras clave:** fricción de ortodoncia, brackets de ortodoncia, cerámica, aleaciones dentales, análisis de elementos finitos.

## Abstract

**Introduction and objective:** Friction in orthodontics is produced by direct contact between the bracket, the wire, and the ligature. Friction reduces efficiency in orthodontic treatments. This research aims to compare the frictional resistance between conventional ceramic brackets and passive self-ligating ceramic brackets using a finite element method (FEM). **Materials and methods:** A total of 810 slidings were performed, combining conventional and self-ligating ceramic brackets, and stainless steel, nickel-titanium, and b-titanium alloy orthodontic wires of 0.016inch, 0.017x0.025inch, and 0.019x0.025inch. The maximum static frictional resistance (MSFR) mean was compared between the different brackets, wire, ligature, and bracket angulation combinations of 0°, 7°, and 13°. **Results:** The variables with the highest frictional behavior were 13°, b-titanium alloy, 0.017x0.025inch, and conventional ceramic brackets with an elastic ligatures. **Conclusion:** FEM is an adequate alternative for the prediction of MSRF in a various brackets, wire, ligating, and angulation combinations. The method allowed defining lower frictional resistance for self-ligating brackets, as well as a direct relationship between the increase in the angle and contact area between bracket and wire, with higher values of sliding resistance. It was established that a larger wire size does not imply a higher area of contact with the bracket.

**Keywords:** orthodontic friction, orthodontic brackets, ceramic, dental alloys, finite element analysis.

## Resumo

**Introdução e objetivo:** O atrito na ortodontia é produzido pelo contato direto entre braquetes, fios e ligaduras. O atrito reduz a eficiência em tratamentos ortodônticos. Esta pesquisa tem como objetivo comparar a resistência ao atrito entre braquetes cerâmicos convencionais e braquetes cerâmicos autoligáveis paacero inoxidáveis usando um método de elementos finitos (MEF). **Materiais e métodos:** Foram realizados 810 deslizamentos de terra, combinando braquetes de cerâmica convencionais e autoligáveis e fios ortodônticos de aço inoxidável, liga de níquel-titânio e  $\beta$ -titânio em 0,016 polegadas, 0,017 x 0,025 polegadas e 0,019 0,025 polegadas. A máxima resistência média ao atrito estático (MRF) foi comparada entre as diferentes combinações de braquetes, fios, ligaduras e angulações de braquetes de 0 °, 7 ° e 13 °. **Resultados:** As variáveis com maior comportamento de atrito foram 13 °, liga  $\beta$ -titânio, 0,017x0,025 polegadas e braquetes cerâmicos convencionales com ligadura elástica. **Conclusão:** MEF é uma alternativa adequada para previsão de MRF em várias combinações de braquetes, fios, ligaduras e angulações. O método permitiu definir uma menor resistência ao atrito para braquetes autoligáveis, bem como uma relação direta entre o aumento do ângulo e a área de contato entre os braquetes e o fio, com maiores valores de resistência ao escorregamento. Foi estabelecido que um tamanho de cabo maior não implica uma área de contato mais alta com o suporte.

**Palavras-chave:** fricção ortodôntica, braquetes ortodônticos, cerâmica, ligas dentárias, análise de elementos finitos.

## Introducción

La fricción en ortodoncia se produce por el contacto directo entre el bracket, el alambre y la ligadura. La fricción reduce la eficiencia en los tratamientos ortodónticos debido a que del total de fuerza entregada gran parte se invierte en vencer la fricción bracket/alambre/ligadura, por lo que se requiere aplicar una mayor fuerza para lograr el movimiento dental (1).

Los brackets de autoligado son aditamentos libres de ligadura ya que poseen un dispositivo mecánico para encajar el alambre en la ranura; es decir, tienen un componente fijo y un componente móvil que sujeta el arco (2). Los brackets metálicos de autoligado reducen sustancialmente la fricción en las primeras etapas del tratamiento de alineación y nivelación (3); se presentan como una alternativa al sistema de brackets metálicos convencionales, y ofrecen una mayor eficiencia en el tratamiento al generar una significativa reducción de la fuerza friccional en la interfase bracket-alambre, y por lo tanto disminuyen la duración del tratamiento, así como el tiempo en el sillón odontológico (4, 5).

Los brackets cerámicos están compuestos por cristales de óxido de aluminio, ya sea en forma policristalina o monocristalina (6). Los brackets policristalinos se componen de partículas de óxido de aluminio irregulares fusionadas a temperaturas de 1860°C. Los brackets monocristalinos se componen en su mayoría del mismo material de los policristalinos, pero el proceso de fabricación se hace con técnicas de corte ultrasónico o corte de diamante, procedimientos más especializados y costosos. El material se fusiona por encima de los 2400°C pero a diferencia de los policristalinos su atemperamento se produce en un medio controlado para formar un solo cristal de óxido de aluminio, sin imperfecciones y con apariencia de cristal traslúcido (7).

Los brackets cerámicos de autoligado (8) se desarrollaron con el propósito de mantener la característica de autoligado de los brackets metálicos convencionales, pero con el agregado estético que ofrece la cerámica (5), sin embargo, poco se conoce de sus propiedades físicas. En consecuencia, es necesario investigar acerca de la resistencia que ofrecen a la fricción. Teniendo en cuenta la relación entre autoligado y menor resistencia friccional, se debe establecer la diferencia en resistencia friccional de los brackets cerámicos de autoligado y los convencionales cerámicos.

El método de elementos finitos ha demostrado ser una herramienta útil en el análisis de estrés de los brackets cerámicos sometidos a diversas fuerzas. Además, esta metodología reduce la necesidad de prototipos y experimentos de laboratorio y permite más opciones de diseño para ser probado en una determinada cantidad de tiempo (9).

Por lo tanto, esta investigación tuvo como objetivo determinar la diferencia en la resistencia friccional entre los brackets cerámicos convencionales y brackets cerámicos de autoligado, cuando se utilizan diferentes inclinaciones del bracket y diversas aleaciones y dimensiones del alambre, a través del método de elementos finitos, de modo que pueda predecirse su aplicabilidad y pertinencia.

## **Materiales y métodos**

### **Método Experimental**

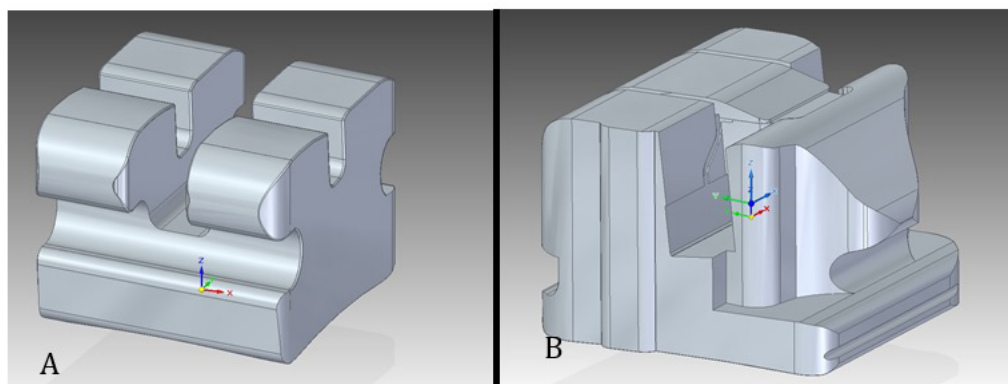
Se usaron dos tipos de brackets para dientes laterales superiores, cerámicos convencionales (zafiro monocristalino) (Inspire Ice®; Ormco, Orange, CA, USA) con ranura de 0,022" x 0,028" y brackets cerámicos (alúmina policristalina) de autoligado de torque estándar (Damon Clear®; Ormco, Orange, CA, USA) con ranura de 0,022" x 0,028", dado que tienen características de prescripción similares (bracket convencional: torque +8°, angulación +9°, y rotación 0°; bracket autoligado: torque +6°, angulación +9°, y rotación 0°). Se utilizaron además alambres Ormco de acero inoxidable, níquel titanio (NiTi) y beta-titanio, cada aleación en las dimensiones 0,016", 0,017" x 0,025" y 0,019" x 0,025". Para los brackets cerámicos convencionales se utilizaron ligaduras de la casa comercial Ormco, elásticas y metálicas (0.010").

Las combinaciones se montaron en un dispositivo reportado previamente (10), y adaptado a una máquina INSTRON 3345 con una celda de carga de  $10\text{ N} \pm 0.01$  a cero grados, a una velocidad de  $5\text{ mm/min}$  durante 2 min. Se realizaron 810 deslizamientos en total, con 27 combinaciones posibles de alambre, bracket y ligadura. La calibración del modelo es descrita en una publicación realizada por el mismo grupo de investigación (10). Resumiendo, se midieron brackets convencionales pre-ajustados, arcos redondos de acero inoxidable, y ligaduras metálicas inoxidables usando un estereoscopio con una magnificación de 8X y 80X y una tolerancia de  $\pm 5\text{ mm}$ , asistida por un programa de análisis de imagen (NIS 3.1 Element, Nikon). Se construyó un modelo asistido por computador del bracket con medidas microscópicas (Solid Edge 18). Igualmente, con un microscopio (Eclipse X20 LV100) se midió la rugosidad de superficie del slot y el arco, calculando la rugosidad promedio entre los picos y valles observados sobre la superficie de los materiales. El FEM se validó comparando su resistencia friccional con la del modelo experimental con una confiabilidad del 95% mediante una prueba Z. No se observó diferencia estadísticamente significativa entre los dos métodos ( $p = 0.7493$ ). De esta manera, se validó el FEM para estudiar fuerzas friccionales en diferentes combinaciones de brackets y arcos. Las propiedades mecánicas de los brackets y alambres tenidas en cuenta en el modelo fueron 205 y 190 GPa, 200 y 193 MPa, y 0,31 y 0,3 (Poisson's Ratio), respectivamente (10, 11).

El montaje de los brackets y los deslizamientos realizados durante este estudio fueron realizados por un sólo operador, previa calibración mediante una prueba piloto de fijación del bracket, forma y fuerza de ligado. Los datos se procesaron por medio del programa Excel y se calcularon medidas descriptivas (media e intervalo de confianza de 95%, de todas las mediciones realizadas). Las pruebas estadísticas se realizaron por medio de un programa estadístico (SPSS version 24.0, Chicago, IL).

### Modelación asistida por computador (CAD)

Se elaboraron modelos CAD de los brackets a partir de fotografías obtenidas por medio de un estereoscopio (Nikon, Japón) SMZ 1000 a 20X, una cámara y un software para análisis de imágenes NIS-Elements-D (Nikon, Japón). Por medio de estas fotografías, que representaron los diferentes lados de los brackets, se construyeron los modelos CAD, utilizando el software SOLIDEDGE (versión 18) como se muestra en la Figura 1. Estos modelos fueron posteriormente simulados por elementos finitos.

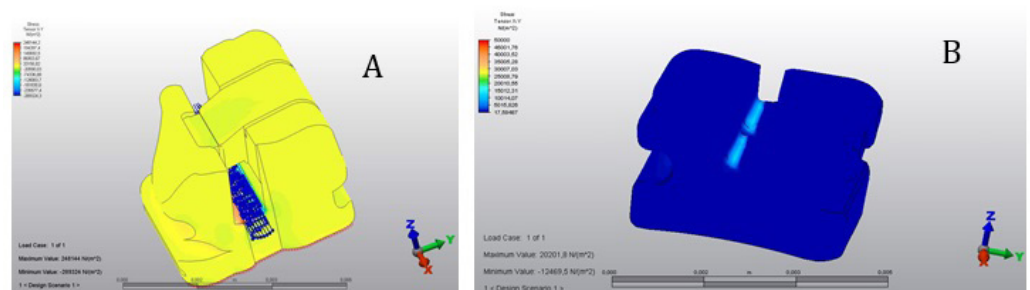


**Figura 1. A.** Diseño CAD bracket estético convencional. **B.** Diseño CAD bracket estético autoligado.

### Simulación por el método de elementos finitos (MEF).

Cada una de las combinaciones bracket, alambre, ligadura fueron simuladas por MEF usando el software Autodesk Simulation de Multyphysics con mallas tetragonales y haciendo fijación de todos los grados de libertad en los puntos en la base del bracket (Figura 2).

La medida de la resistencia friccional se asumió como el esfuerzo cortante en las paredes y/o fondos del bracket de acuerdo con la simulación por MEF que arroja valores en megapascuales (Mpa). Se aplicó el valor de la media máxima de la resistencia a la fricción (MRF) del método experimental sobre las paredes y/o fondos del slot con angulaciones de 0°, 7° y 13°.



**Figura 2.** Simulaciones típicas por MEF. A. Bracket autoligado. B. Bracket convencional

Este estudio experimental in vitro realizado en modelos no requiere aprobación de un comité de ética institucional.

## Resultados

### Fase Experimental

En la tabla 1 se presentan los resultados experimentales de los deslizamientos, señalando la fuerza friccional promedio acompañada de la desviación estándar y el intervalo de confianza del 95%. La mayor resistencia friccional se encontró en la combinación bracket convencional con ligadura elástica y alambre beta-titanio 0,019" x 0,025" (0,737 N), y la menor en la combinación bracket convencional con ligadura elástica y alambre de acero inoxidable 0,019" x 0,025". (0,002 N). En términos generales, la aleación de mayor resistencia friccional fue beta-titanio y la de menor fue la de acero inoxidable.

**Tabla 1.** Distribución de la resistencia friccional según las diferentes combinaciones durante la fase experimental.

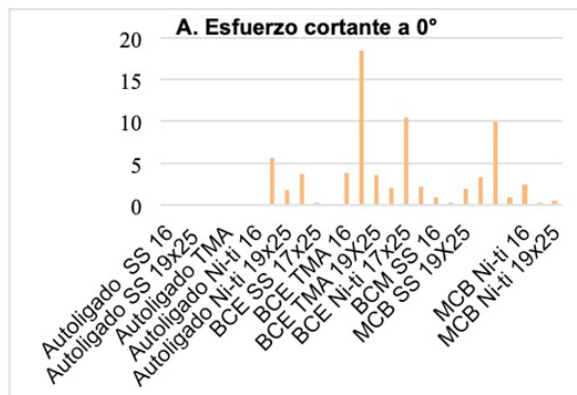
<b>Combinación bracket/ligadura/alambre</b>	<b>Promedio resistencia friccional (N) (DE)</b>	<b>Intervalo de confianza del 95%</b>
Autoligado acero inoxidable 0,016"	0,015 (0,003)	(0,013 - 0,016)
Autoligado acero inoxidable 0,017"x0,025"	0,003 (0,001)	(0,003 - 0,004)
Autoligado acero inoxidable 0,019"x0,025"	0,002 (0,001)	(0,002 - 0,003)
Autoligado beta-titanio 0,016"	0,006 (0,002)	(0,004 - 0,006)
Autoligado beta-titanio 0,017"x0,025"	0,009 (0,140)	(0,287 - 0,292)
Autoligado beta-titanio 0,019"x0,025"	0,012 (0,008)	(0,008 - 0,015)
Autoligado ni-ti 0,016"	0,007 (0,004)	(0,006 - 0,009)
Autoligado ni-ti 0,017"x0,025"	0,198 (0,074)	(0,170 - 0,225)
Autoligado ni-ti 0,019"x0,025"	0,377 (0,153)	(0,320 - 0,434)
BCE acero inoxidable 0,016"	0,443 (0,077)	(0,414 - 0,472)
BCE acero inoxidable 0,017"x0,025"	0,007 (0,020)	(0,001 - 0,014)
BCE acero inoxidable 0,019"x0,025"	0,002 (0,001)	(0,001 - 0,002)
BCE beta-titanio 0,016"	0,455 (0,078)	(0,425 - 0,484)
BCE beta-titanio 0,017"x0,025"	0,655 (0,147)	(0,599 - 0,710)
BCE beta-titanio 0,019"x0,025"	0,737 (0,197)	(0,663 - 0,811)
BCE Ni-Ti 0,016"	0,242 (0,036)	(0,228 - 0,255)
BCE Ni-Ti 0,017"x0,025"	0,369 (0,051)	(0,349 - 0,388)
BCE Ni-Ti 0,019"x0,025"	0,442 (0,077)	(0,412 - 0,470)
BCM acero inoxidable 0,016"	0,221 (0,073)	(0,193 - 0,248)
BCM acero inoxidable 0,017"x0,025"	0,006 (0,003)	(0,006 - 0,007)
BCM acero inoxidable 0,019"x0,025"	0,422 (0,180)	(0,375 - 0,468)
BCM beta-titanio 0,016"	0,396 (0,084)	(0,365 - 0,428)
BCM beta-titanio 0,017"x0,025"	0,353 (0,079)	(0,323 - 0,383)
BCM beta-titanio 0,019"x0,025"	0,187 (0,069)	(0,161 - 0,213)
BCM Ni-Ti 0,016"	0,292 (0,115)	(0,248 - 0,335)
BCM Ni-Ti 0,017"x0,025"	0,007 (0,003)	(0,005 - 0,008)
BCM Ni-Ti 0,019"x0,025"	0,107 (0,037)	(0,093 - 0,121)

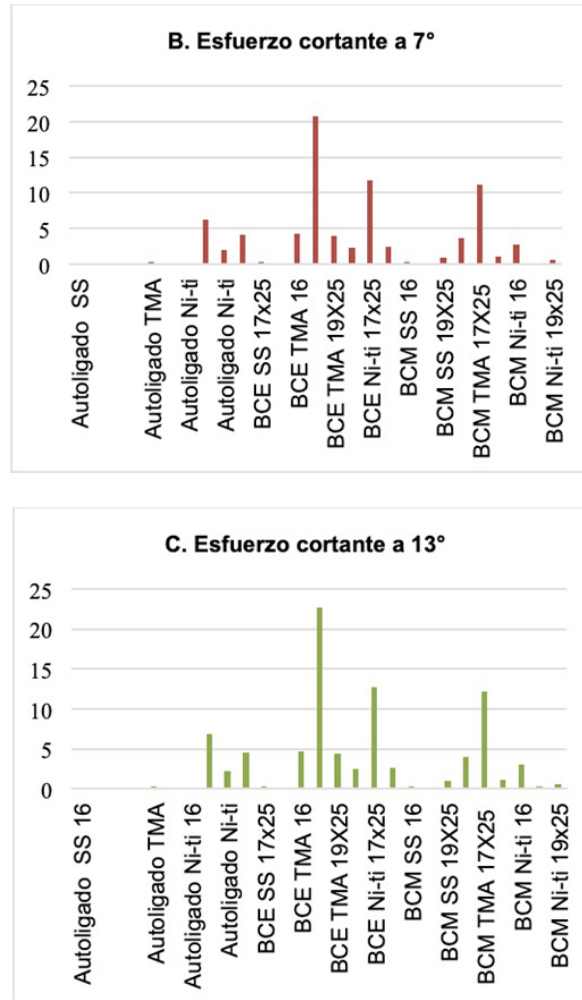
**N:** Newton **D.E.:** desviación estándar. **BCE:** bracket convencional con ligadura elástica. **BCM:** bracket convencional con ligadura metálica.

Simulaciones por el método de elementos finitos.

**Angulación**

En la figura 3 se presentan los resultados de simulación por MEF para cada angulación.





**Figura 3.** (A, B,C). Distribución de la máxima resistencia friccional en términos de esfuerzo cortante (megapascales) en las diferentes angulaciones y combinaciones bracket/alambre/ligadura.

**BCE:** bracket convencional con ligadura elástica. **BCM:** bracket convencional con ligadura metálica.

Desde el punto de vista de las tres angulaciones (0°, 7° y 13°), la angulación de 13° fue la que presentó mayores valores de MRF, seguido por la de 7°.

En las tres angulaciones, la combinación con mayor resistencia friccional fue el bracket convencional con ligadura elástica y alambre beta-titanio 0,017" x 0,025"; en la angulación de 0°, la combinación bracket autoligado con beta-titanio 0.017" x 0.025" resultó con el menor comportamiento friccional, mientras que en las angulaciones de 7° y 13° la menor resistencia friccional se encontró al combinar el bracket convencional con ligadura elástica y acero 0,019" x 0,025".

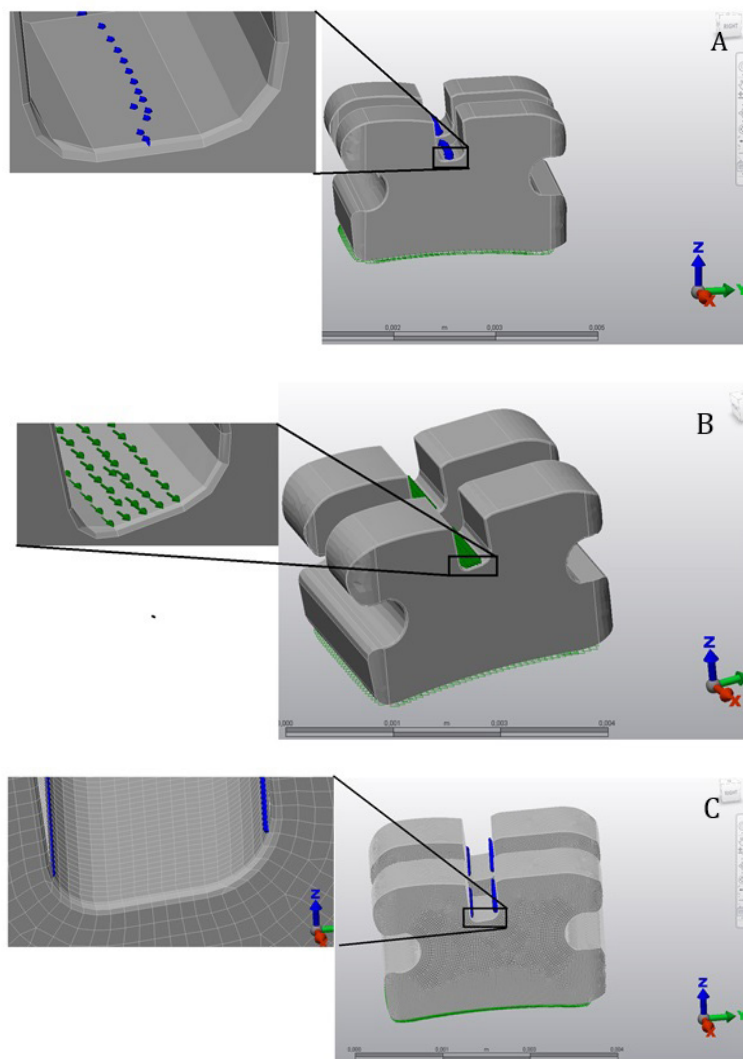
### Calibre

De los tres calibres analizados (0,016", 0,017" x 0,025", 0,019" x 0,025") la mayor resistencia friccional la presentó el calibre 0,017" x 0,025" seguido por el calibre 0,016".

Con los tamaños 0,016" y 0,017" x 0,025" la combinación con mayor resistencia friccional fue el bracket convencional con ligadura elástica y aleación de beta-titanio a 13° de angulación. La menor fue la combinación bracket autoligado con aleación beta-titanio a 0°.

Con el calibre 0,019" x 0,025" la combinación con mayor comportamiento friccional también fue el bracket convencional con ligadura elástica y aleación beta-titanio a una angulación de 13°, pero la menor fue la combinación bracket convencional con ligadura elástica y aleación de acero a 0°.

La figura 4 presenta los puntos de aplicación de la fuerza en los calibres de alambre estudiados. Se observa que un mayor calibre de alambre (0,019" x 0,025"), no es igual a mayor área de contacto entre bracket y alambre.



**Figura 4.** Puntos de aplicación de la fuerza para la simulación por MEF. **A.** Calibre 0,016". **B.** Calibre 0,017" x 0,025". **C.** Calibre 0,019" x 0,025".



### **Aleación**

De acuerdo al tipo de aleación, beta-titanio presentó la mayor resistencia friccional seguido por NiTi.

Con el alambre de acero inoxidable la mayor resistencia friccional fue encontrada al combinar bracket convencional con calibre 0,016" a 13° de angulación; y la menor se presentó con la combinación convencional, calibre 0,019" x 0,025" a 0°.

Con las aleaciones beta-titanio y NiTi el mayor comportamiento friccional fue similar; en los dos se presentó al combinar bracket convencional/calibre 0,017" x 0,025"/ angulación 13°, sin embargo, la menor resistencia friccional varió entre las dos aleaciones. En la categoría beta-titanio el menor valor lo presentó la combinación bracket autoligado/ calibre 0,017" x 0,025" /angulación 0° y para NiTi el menor resultado se obtuvo al combinar autoligado/calibre 0,016" /0° de angulación.

### **Bracket**

Comparando el comportamiento friccional entre los tipos de brackets, el mayor resultado lo obtuvo el bracket convencional /ligadura elástica, mientras que el menor fue para autoligado.

Al insertar ligadura elástica al convencional el mayor valor friccional resultó con beta-titanio 0,017" x 0,025" a 13° de angulación y el menor con acero 0,019" x 0,025" a 0°. De otro lado, cuando dicho bracket se coordinó con ligadura metálica, la mayor resistencia friccional se logró con beta-titanio 0,017" x 0,025" a 13° y la menor con acero 0,017" x 0,025" a 7°.

En la categoría de autoligado la mayor resistencia friccional resultó con Ni-Ti 0,017" x 0,025" y 13° de angulación, mientras que la menor se registró con beta-titanio 0,017" x 0,025" a 0°.

En términos generales, el mayor comportamiento friccional se observó en la coordinación bracket convencional/ ligadura elástica/ beta-titanio 0,017" x 0,025"/ 13° y la menor, en la combinación bracket de autoligado/ beta-titanio 0,017 x 0,025/ 0°.

### **Discusión**

Los estudios que evalúan la fricción producida por brackets y alambres de ortodoncia divergen ampliamente debido a diversos aspectos: variedad en los métodos de estudio, materiales de diferentes casas comerciales, diversas combinaciones bracket-alambre-método de ligado, medios de prueba (ambiente seco, saliva o sustitutos), y la suma de angulaciones (10, 12). Esto hace que sea difícil comparar los resultados observados en el presente estudio. Además, si se trata de investigaciones "in vitro," es difícil garantizar las mismas condiciones en cada uno de los experimentos, incluyendo la posición específica del alambre con respecto a las paredes de la ranura del bracket y que esta posición sea reproducible en cada deslizamiento, aumentando la susceptibilidad a sesgos (13-16). Todo lo anterior, dificulta contrastar detalladamente los resultados de este estudio con referentes ya publicados. Sin embargo, se realizaron comparaciones con estudios que de alguna manera tuvieron relación con los resultados encontrados en esta investigación.

Con respecto al ángulo los mayores resultados friccionales observados en el presente estudio fueron arrojados por la angulación 13°, seguida por 7°. Hallazgos similares fueron reportados previamente (17,18), señalando que el aumento en la angulación

umenta significativamente la resistencia al deslizamiento. Este concepto se fundamenta en la fricción clásica indicada por algunos autores que argumentan que cuando no hay rotaciones o inclinaciones dentales sólo se observa fricción clásica entre el alambre y el bracket (19). Cuando se introducen angulaciones en esta interfase, la resistencia al deslizamiento es el resultado de este tipo de fricción, sinergizado por la deformación elástica y la deformación plástica (20), que se reporta tres veces mayor en brackets cerámicos (21).

En el presente estudio se encontraron los menores valores de resistencia friccional en la aleación de acero inoxidable 0,019" x 0,025", resultados similares a los obtenidos por Krishnan y Kumar (21). Este menor comportamiento friccional en la interfase bracket/alambre se puede explicar a partir de la alta rigidez y superficie lisa del acero inoxidable comparado con otro tipo de aleaciones (22).

En el presente trabajo se encontró mayor valor friccional para la aleación beta-titanio. Resultados similares fueron observados por Doshi y Bhad (11) cuando evaluaron la resistencia friccional de tres tipos de aleaciones (acero inoxidable, NiTi y beta-titanio) en brackets metálicos, cerámicos convencionales y cerámicos con ranura de oro paladio. Sus resultados muestran que el alambre más friccional fue beta-titanio y el de menor fricción el acero inoxidable. Estos hallazgos también son parecidos a los encontrados por Cacciafesta y colaboradores (22), quienes luego de comparar comportamientos friccionales en brackets metálicos convencionales, de autoligado, y cerámico de autoligado, reportaron mayores valores para la aleación beta titanio. Este fenómeno se podría explicar a partir de la textura superficial rugosa de la aleación, cuyos valores fueron determinantes en los deslizamientos experimentales, con consecuentes resultados en las correspondientes simulaciones por MEF.

El presente estudio muestra que de los tres calibres evaluados la mayor resistencia friccional la presentó el calibre 0,017" x 0,025" y la menor el 0,019" x 0,025". Este resultado podría explicarse (teniendo en cuenta el MEF) a partir del área de contacto entre el alambre y la ranura del bracket, ya que en la simulación la categoría alambre 0,019" x 0,025", sólo tuvo contacto en las paredes del slot y no con el fondo del bracket. De igual manera en un alambre redondo, la fuerza se concentró en un área relativamente pequeña del slot del bracket; mientras que el alambre 0,017" x 0,025" aplicó la fuerza sobre las paredes y el fondo de la ranura, aumentando de esta manera el área de contacto, favoreciendo el esfuerzo generado sobre cada una de las posibles combinaciones. Estos resultados pueden estar relacionados con la estructura geométrica de ángulos redondeados y el fondo de la ranura del bracket en forma de semiluna, analizados a partir de las imágenes arrojadas por el estereoscopio. Por lo tanto, se puede decir que visto con MEF, un mayor calibre de alambre (0,019" x 0,025"), no es igual a mayor área de contacto entre bracket y alambre, siendo esto último un factor determinante en la resistencia friccional resultante del sistema ortodóncico (Figura 4). En este sentido, diversos autores (23-26), a partir de pruebas de deslizamiento "in vitro," y usando diferentes combinaciones de alambres y brackets, han logrado probar que donde existe una mayor área de contacto entre el bracket y el alambre, existe una mayor zona para el desarrollo de fenómenos asociados con la fricción como "stick slip" (5, 11), que se refiere al aumento de la resistencia friccional debido al bloqueo mecánico entre las rugosidades de dos superficies en contacto durante el deslizamiento. En contraste, Voudourisa y colaboradores (27) reportaron que el tamaño del alambre asociado con mayor fricción fue el calibre 0,019" x 0,025", seguido por los alambres 0,018" x 0,018" y 0,020", enfatizando la indicación de los alambres redondos para biomecánica de deslizamiento de autoligado.

Con respecto al tipo de ligado, al comparar el comportamiento friccional de los brackets cerámico convencional y de autoligado, la mayor representación friccional fue para el bracket cerámico convencional con ligadura elástica y la menor para el de auto-ligado. Estos resultados corroboran los hallazgos de Kambay y colaboradores (26) quienes encontraron que las cifras más bajas de fricción se observaron en ligaduras de acero inoxidable en comparación con ligadura elásticas. En la literatura se encuentran diversos estudios que comparan la resistencia friccional entre brackets metálicos convencionales y de autoligado (28-30), afirmando que el grado de resistencia a la fricción es proporcional al grado de rigidez de los elementos de sujeción del alambre (30) poniendo de relieve la eficacia de los sistemas de autoligado por la sujeción pasiva del alambre al bracket, lo que se traduce en baja fricción.

Considerando que la geometría del slot del bracket puede ser diferente según la marca comercial (lo cual es determinante en el área de contacto y por ende en la resistencia friccional), los resultados de la presente investigación no son extrapolables a otras marcas comerciales de brackets cerámicos. Lo anterior pone de relieve la necesidad de nuevas investigaciones usando diferentes marcas comerciales de brackets cerámicos convencionales y de autoligado, en un esfuerzo por demostrar científicamente que sistema podría proporcionar fuerzas más óptimas sobre la base de un coeficiente de fricción bajo asociado con la estética.

La presente investigación presenta varias limitaciones. La primera de ellas se relaciona con el diseño experimental "in vitro;" sin embargo, experimentos como este difícilmente pueden ser planteados en estudios clínicos debido a consideraciones éticas. Por otra parte, las propiedades mecánicas de las ligaduras no fueron incluidas en la modelación, lo cual constituye también otra limitación del estudio.

## Conclusiones

- La resistencia al deslizamiento es directamente proporcional al incremento del ángulo creado entre el bracket y el alambre.
- Una mayor área de contacto entre el bracket y el alambre, aumenta la resistencia friccional debido al bloqueo mecánico entre las rugosidades de dos superficies en contacto durante el deslizamiento.
- Un mayor calibre no implica una mayor área de contacto entre el bracket y el alambre.
- La aleación beta-titanio presenta los mayores valores de resistencia friccional.

## Conflicto de Interés

Los autores no reportan conflicto de interés.

## Referencias

1. Hain M, Dhopatkar A, Rock P. A comparison of different ligation methods on friction. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2006; 130: 666-670.
2. Manoela-Fávaro Francisconi, Guilherme Janson, José-Fernando-Castanha Henriques, Karina-Maria-Salvatore Freitas, Paulo-Afonso-Silveira Francisconi. *J Clin Exp Dent.* 2019;11:e464-e469.
3. Sujeet Kumar, Shamsheer Singh, Rani Hamsa P.R, Sameer Ahmed, Prasanthma, Apoorva Bhatnagar et al. Evaluation of Friction in Orthodontics Using Various Brackets and Archwire Combinations-An in Vitro Study. *J Clin Diagn Res.* 2014; 8: ZC33-ZC36.
4. Rinchusea D, Miles P. Self-ligating brackets: Present and future. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2007; 132: 216-222.
5. Sérgio-Elias-Neves Cury, Aron Aliaga-Del Castillo, Arnaldo Pinzan, Karine-Laskos Sakoda, Silvio-Augusto Bellini-Pereira, Guilherme Janson. Orthodontic brackets friction changes after clinical use: A systematic review. *J Clin Exp Dent.* 2019; 11: e482-e490.
6. Reicheneder C, Baumert U, Gedrange T, Proff P, Faltermeier A, Mueacero inoxidable D. Frictional properties of aesthetic brackets. *Eur J of Orthod* 2007; 29: 359-365.
7. Mohd. Younus Ansari, Deepak K Agarwal, Ankur Gupta, Preeti Bhattacharya, Juhi Ansari, Ravi Bhandari. Shear Bond Strength of Ceramic Brackets with Different Base Designs: Comparative In-vitro Study. *J Clin Diagn Res.* 2016; 10: ZC64-ZC68.
8. Voudouris J, Schismenos C, Lackovic K, Kuftinec M. Self-Ligation Esthetic Brackets with Low Frictional Resistance. *Angle Orthod.* 2010; 80: 188-194
9. Ghosh J, Nanda R, Duncanson M, Currier F. Ceramic bracket design: An analysis using the finite element method. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1995; 108: 575-582.
10. Gomez SL. Montoya Y, Garcia NL, Virgen AL, Botero JE. Comparison of frictional resistance among conventional, active and passive self ligating brackets with different combinations of arch wires: a finite elements study. *Acta Odont Latinoam.* 2016; 29: 130-136
11. Gómez-Gómez SL, Sánchez-Obando N, Álvarez-Castrillón MA, Montoya-Góez Y, Ardila CM. Comparison of frictional forces during the closure of extraction spaces in paacero inoxidable self-ligating brackets and conventionally ligated brackets using the finite element method. *J Clin Exp Dent.* 2019;11:e439-e446
12. Doshia H, Bhad-Pati W. Static frictional force and surface roughneacero inoxidable of various bracket and wire combinations. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2011; 139: 74-79.

13. Krishnan V. Mechanical properties and surface characteristics of three archwire alloys. *The Angle Orthod.* 2004; 74: 825-831.
14. Taylor N, Ison K. Frictional resistance between orthodontic brackets and archwires in the buccal segments. *The Angle Orthod.* 1996; 66: 215-222.
15. Gómez-Gómez SL, Villarraga-Oacero inoxidable JA, Diossa-Peña JG, Ortiz-Res-trepo JF, Castrillón-Marín RA, Ardila CM. Comparison of frictional resistance between paacero inoxidable self-ligating brackets and slide-type low-fric-tion ligature brackets during the alignment and leveling stage. *J Clin Exp Dent.* 2019;11:e593-e600.
16. Pimentel R, de Oliveira R, Chaves M, Elias C, Gravina M. Evaluation of the friction force generated by monocristalyne and policristalyne ceramic brackets in sli-ding mechanics. *Dental Preacero inoxidable J Orthod.* 2013; 18: 121-127.
17. Williams C, Khalaf K. Frictional Resistance of Three Types of Ceramic Brackets. *J Oral Maxillofac Res.* 2013; 4: e3
18. Guerrero A, Guariza F, Tanaka O, Camargo E, Vieira S. Evaluation of frictional forces between ceramic brackets and archwires of different alloys compared with metal brackets. *Braz Oral Res.* 2010; 24: 40-45.
19. Thorstenson G, Kuacero inoxidable P. Effect of archwire size and material on the resistance to sliding of self-ligating brackets with second order angulation in the dry state. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2002; 122: 295-305.
20. Articulo L, Kusy K, Saunders C, Kusy R. Influence of ceramic and stainleacero inoxidable steel brackets on the notching of archwires during clinical treatment. *Eur J Orthod.* 2000; 22: 409-425.
21. Krishnan V, Kumar K. Mechanical Properties and Surface Characteristics of Three Archwire Alloys. *Angle Orthod.* 2004; 74: 825-831.
22. Cacciafesta V, Sfondrini F, Ricciardi A, Scribante A, Klersy C, Auricchio F. Evaluation of friction of stainleacero inoxidable steel and esthetic self-ligating brackets in va-rious bracket-archwire combinations. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2003; 124: 395-402.
23. Kapila S, Angolkar P, Duncanson M, Nanda R. Evaluation of friction between ed-ge-wise stainleacero inoxidable steel brackets and orthodontic wires of four alloys. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1990; 98: 117-126.
24. Kapila S, Angolkar P, Duncanson M, Nanda R S. Evaluation of friction between ceramic brackets and orthodontic wires of four alloys. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1998; 98: 499-506.
25. Drescher D, Bourauel C, Schumacher H. Frictional forces between bracket and arch wire. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1989; 96: 397-404.

26. Khambay B, Millett D, McHugh S. Archwire seating forces produced by different ligation methods and their effect on frictional resistance. *Eur J Orthod.* 2005; 27: 302-308.
27. Voudourisa J, Schismenosb C, Lackovicc K, Kuftinec M. Self-Ligation Esthetic Brackets with Low Frictional Resistance. *Angle Orthod.* 2010; 80: 188-194.
28. Tecco S, Di Iorio D, Nucera R, Di Bisceglie B, Cordasco G, Festa F. Evaluation of the friction of self-ligating and conventional bracket systems. *Eur J Dent.* 2011; 5: 310-317.
29. Gandinia P, Orsib L, Bertonicinic C, Maacero inoxidableironid S, Franchie L. In vitro frictional forces generated by three different ligation methods. *Angle Orthod.* 2008; 78: 917-921
30. Reznikov N, Har-Zion G, Barkana I, Abed Y, Redlich M. Measurement of friction forces between stainleacero inoxidable steel wires and "reduced-friction" self-ligating brackets *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2010; 138: 330-338.