

Medición *in vitro* de la fuerza de fricción en duplas arco-bracket con angulación

Margarita R. Bobadilla Gaviria¹, Yesid de J. Montoya Goéz^{1,ψ}

¹Laboratorio de Biomateriales, Línea de Biotecnología en Salud y Biomateriales,
Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica EIA-CES (GIBEC)

Recibido 18 de enero de 2008. Aceptado 16 de mayo de 2008.

Resumen— En este trabajo se evaluó el efecto de la angulación de segundo orden en el deslizamiento en sistemas arco bracket usado en ortodoncia. Los brackets y alambres utilizados en este estudio son de acero inoxidable AISI 316L. La angulación se hizo en 0°, 2°, 4°, 6° y 8°, y la resistencia al deslizamiento fue medida con una máquina universal de ensayos a una velocidad de 5mm/s. La evaluación de las superficies deslizadas se hizo por microscopía óptica de luz reflejada y electrónica de barrido. Los resultados mostraron que la resistencia a la fricción aumenta con la angulación, pero depende fuertemente de la geometría de la ranura y los módulos de rigidez del bracket y el alambre.

Palabras clave— Angulación de segundo orden, Brackets, Fricción, Minidiamond, Synergy

Abstract— In this work the effect of second order angulation on sliding resistance for orthodontic wire-bracket couples was evaluated. Both the evaluated wires and brackets were made of AISI 316L stainless steel. The tests were performed at angles of 0°, 2°, 4°, 6° and 8°, by means of a universal testing machine at 5 mm/s. The surfaces were evaluated via scanning electron and optical microscopy. The results showed that the frictional resistance increases proportionally to the angulation of the wire, but at the same time, this frictional resistance strongly depended on the geometry of the slot and the Young's modulus of the bracket and the wire.

Keywords— Brackets, Friction, Minidiamond, Second-order angulation, Synergy.

I. INTRODUCCIÓN

En ortodoncia es importante conocer el comportamiento tribológico de los sistemas arco bracket, con el fin de saber cuáles son más eficientes en el movimiento dental, es decir cuáles duplas mueven más rápidamente los dientes.

La fuerza de fricción depende de varias variables, entre las que están área de contacto, materiales de las superficies que se deslizan, velocidad de deslizamiento entre otros [1].

El área de contacto entre las superficies es de dos tipos, el área aparente, la cual se define como el área misma de la superficie, y el área real de contacto, que es aquella donde realmente se están tocando las superficies, y es por esta razón que el área real de contacto se calcula como la sumatoria de todas las superficies de las irregularidades

que se están tocando y donde la carga está puesta. A mayor área de contacto mayor fricción [1, 2].

El deslizamiento entre dos superficies se puede dar de dos maneras: un material duro deslizándose sobre uno blando o sobre un metal de dureza similar. En el primer caso, la superficie que tenga mayor dureza va a dañar la superficie menos dura, deformándola plásticamente; en este caso la fuerza de fricción es menor que en el segundo caso. En este último, las superficies deslizantes tienen durezas similares, los daños superficiales son mayores que en el primer caso y están presentes en ambas superficies, por lo que la fuerza de fricción es mayor [1, 3, 4].

La fuerza de fricción no es un fenómeno puramente superficial, ésta depende de las propiedades de los

materiales deslizantes y se puede pensar como la suma de las fuerzas necesarias para romper las uniones producto del deslizamiento entre las dos superficies y para empujar el material sobre la superficie [3].

Desde el punto de vista ortodóncico, la mecánica del deslizamiento en sistemas arco bracket depende del material y diseño del bracket, del alambre, de la técnica de ligado y de la angulación.

El efecto de la geometría del bracket, es debido esencialmente al diseño de la ranura, pues de este depende el área de contacto entre ambas superficies. Éstas pueden ser de paredes planas o curvas al igual que el fondo. Se ha comprobado que las ranuras cuyo fondo es curvo o tiene protuberancias, disminuyen el área, por lo cual presentan menores fuerzas de fricción [2, 5].

El efecto de la geometría del alambre está relacionado con el espacio que queda entre la ranura del bracket y éste; a mayor espacio menor fuerza, de lo cual también depende la sección transversal; los alambres redondos presentan menor fricción que aquellos que son cuadrados o rectangulares.

La ligadura en el sistema arco bracket aporta la fuerza normal, por lo que dependiendo de cómo se ligue, es decir de cuántas veces se haga pasar la ligadura por las aletas del bracket, se modifica la fuerza normal; además, a mayor fuerza normal mayor fricción [2].

De la angulación se desprende el concepto de ángulo de contacto crítico, que es el mayor ángulo entre el eje de la ranura en el bracket y el eje del alambre al cual se presenta contacto en las paredes de la ranura. El ángulo de contacto crítico depende principalmente de la geometría de la ranura del bracket. Este ángulo se define como el ángulo formado entre el alambre y la ranura del bracket a partir del cual el alambre empieza a tocar las paredes de la ranura; para angulaciones menores a este ángulo se dice que el bracket está en configuración pasiva y para mayores e iguales

está en configuración activa. La fricción es mayor en la configuración activa, y a mayor angulación mayor fricción porque el área de contacto entre las superficies aumenta al mismo tiempo que aumenta la fuerza normal entre ambas superficies [2, 6, 7].

Esta investigación tuvo como objetivo medir y comparar la fuerza de fricción entre dos tipos de bracket de uso comercial y un mismo alambre de acero estándar en ortodoncia, desde el punto de vista de la magnitud de la fuerza misma y a través de una discusión del desgaste que se presentó en las superficies en contacto.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materiales

Tanto los brackets como los arcos eran de acero inoxidable AISI 316. En este estudio se usaron brackets Minidiamond de la casa comercial ORMCO y brackets Synergy suministrados por la casa Rocky Mountain Company, ambos tienen una ranura de 0,4572 mm x 0,635 mm (0,018" x 0,025") (Fig. 1). Los alambres usados eran cuadrados de 0,4064 mm (0,016") de lado, suministrados por la casa ORMCO. Para ligar el sistema arco-bracket se usaron ligaduras de poliuretano color negro de la casa ORMCO.

B. Métodos

Para hacer las mediciones de la resistencia al deslizamiento se usó una máquina universal de ensayos TestsResources con una celda de carga con capacidad de 1109,85 N (250 Lb), conectada a un sistema de adquisición de datos y un software MTest para análisis de las fuerzas y desplazamientos, para realizar los ensayos de fricción.

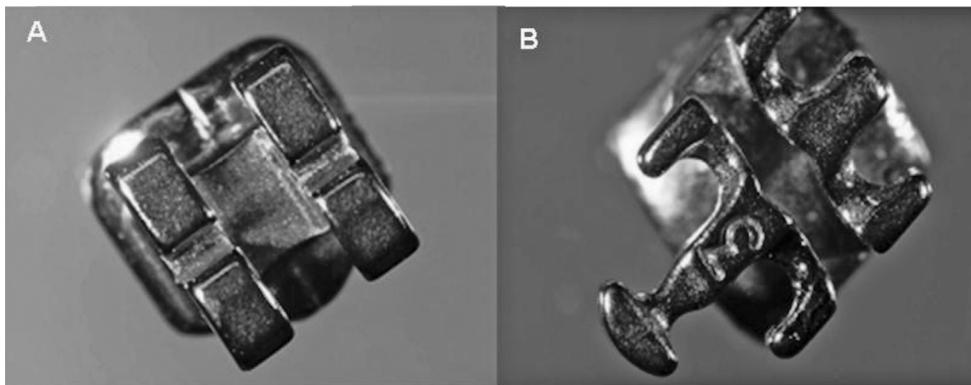


Fig. 1. Imágenes de los brackets (A) Minidiamond y (B) Synergy obtenidas por estereoscopia.

La máquina universal de ensayos fue adaptada para la medición de ángulos al incorporar un transportador en un soporte de acrílico. Este soporte tiene un tornillo ubicado en el centro del transportador que permite fijar el bracket en una sola posición, así como ajustar los alambres a la angulación deseada. Adicionalmente, el bracket es sujetado al porta brackets con pegante (Fig. 2).

Para realizar los ensayos de fricción se unió el bracket al portabacket, luego se procedió a unir el alambre y el bracket con una ligadura de poliuretano en forma de anillo, usando todas las aletas, y por último se dispuso el bracket en la angulación deseada. Durante el ensayo de tracción se utilizó una velocidad de deslizamiento de 5 mm/min [1].

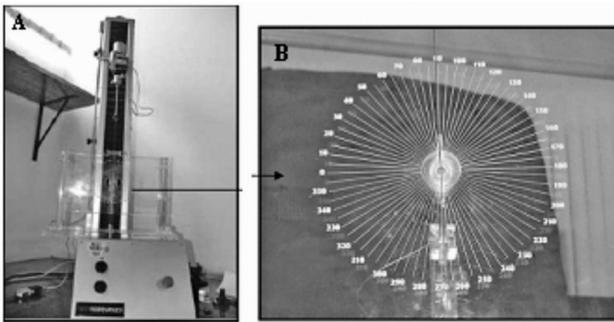


Fig. 2. (A) máquina universal de ensayos. (B) soporte de acrílico.

Para cada una de las superficies se midió la microdureza Vickers con un microdurómetro Shimadzu tipo M y una carga de 100 gf. Las superficies deslizadas se observaron por microscopía óptica de luz reflejada (MOLR) y microscopía electrónica de barrido (SEM) usando un microscopio electrónico JEOL JSM-5910LV.

El estudio estadístico se hizo hallando las fuerzas máximas de cada curva arrojada por el software y el promedio de ellas.

III. RESULTADOS

A. Medición de la fuerza de fricción

Se obtuvieron curvas típicas del comportamiento friccional para cada bracket y para cada angulación.

En las curvas obtenidas para el bracket Minidiamond (Fig. 3) se pueden diferenciar dos regiones que concuerdan con lo reportado por Michaelberger [8], en las cuales el primer pico corresponde a la fuerza máxima de todo el desplazamiento y corresponde a la fuerza de fricción estática y en la segunda región hay una tendencia al descenso de la fuerza del sistema y corresponde a la fuerza de fricción dinámica, además de lo anterior no se observaron cambios de pendiente

bruscos. La fuerza máxima para este tipo de bracket varió entre 0,3 N y 0,42 N.

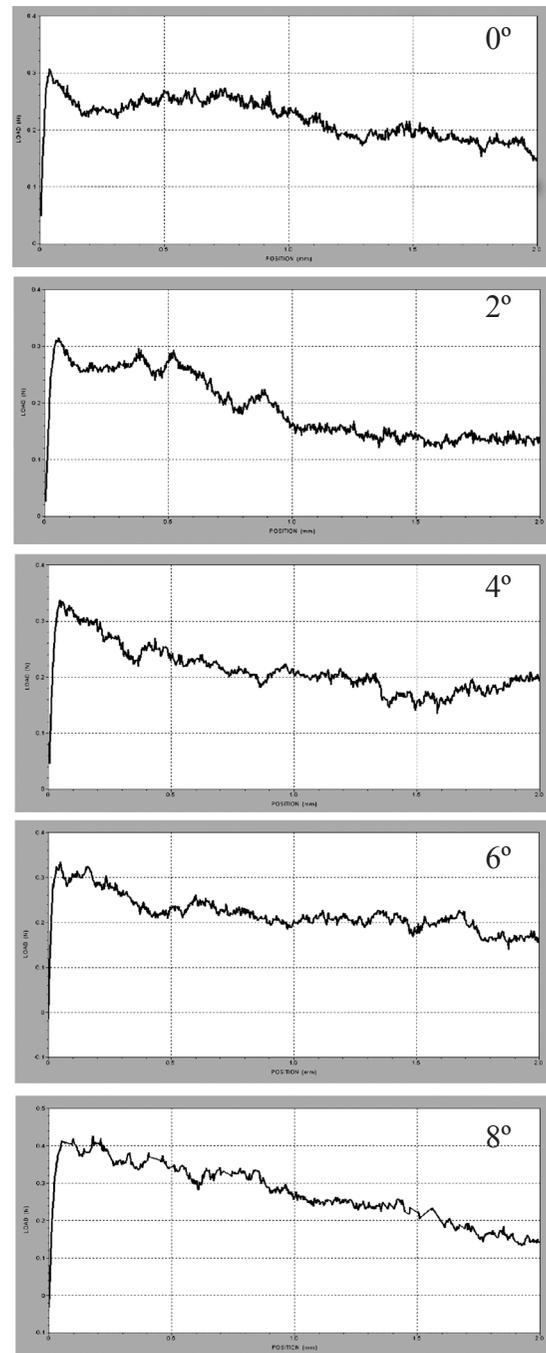


Fig. 3. Curvas características de las relaciones carga: desplazamiento obtenidas para las angulaciones 0°, 2°, 4°, 6° y 8° en la dupla arco bracket Minidiamond.

Las curvas del bracket Synergy mostradas en la Fig. 4, presentan una sola región, en la cual el pico más alto corresponde a la fuerza estática, la fuerza más alta que

se debe vencer para poder desplazar el alambre sobre la ranura, y se observan cambios bruscos de pendiente. La curva parece obedecer un comportamiento oscilatorio. La fuerza máxima varió entre 0,04 N y 0,13 N.

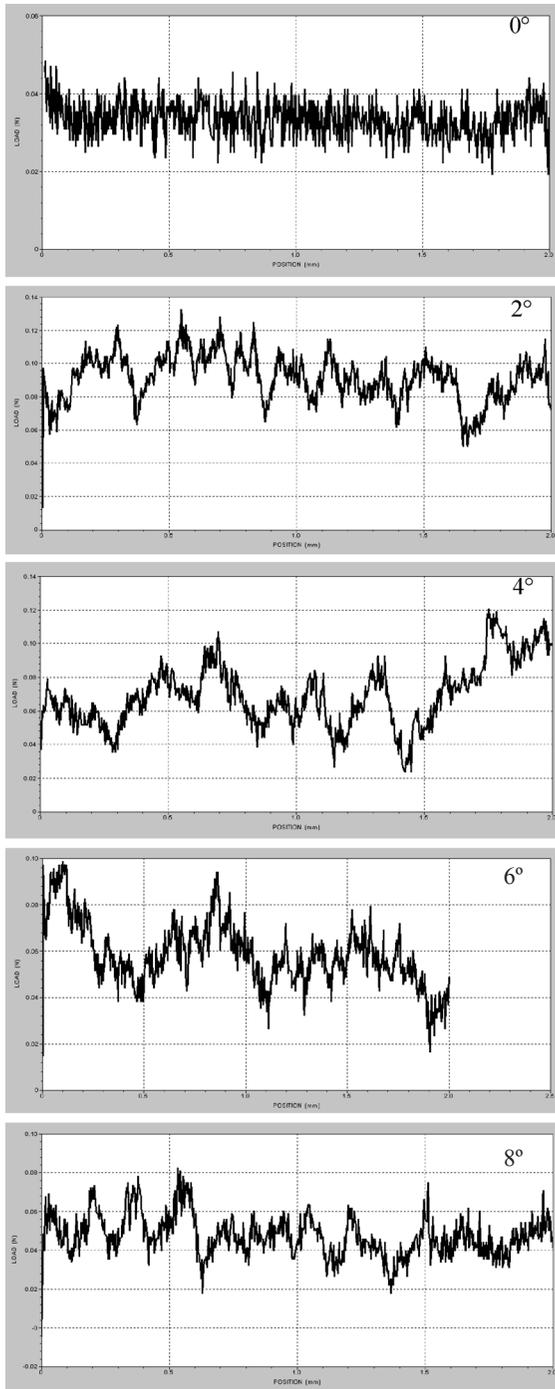


Fig. 4. Curvas características de las relaciones carga : desplazamiento obtenidas para las angulaciones 0°, 2°, 4°, 6° y 8° en la dupla arco bracket Synergy.

En la Tabla 1 se muestran las fuerzas máximas de cada una de las configuraciones arco bracket. Es claro que el valor de la fuerza de fricción en el bracket Minidiamond es casi un orden de magnitud mayor que para los brackets Synergy para cualquier angulación. Este comportamiento se atribuye a que el espacio relativo entre alambre y ranura en los brackets Minidiamond es menor que en los Synergy.

Tabla 1. Fuerzas máximas (estática) para cada configuración arco bracket. Las fuerzas están medidas en Newtons (N) y son fuerzas promedio para tres réplicas.

Angulación	0°	2°	4°	6°	8°
Minidiamond (N)	0,306	0,315	0,337	0,334	0,425
Synergy (N)	0,048	0,065	0,082	0,098	0,132

B. Microdureza:

La microdureza Vickers se reporta en la Tabla 2. Con esta tabla se puede apreciar que la superficie más dura es el alambre y la más blanda es el bracket Synergy.

Tabla 2. Durezas medidas en Vickers para cada una de las superficies deslizadas.

	Synergy	Minidiamond	Alambre
Dureza	285,2	401,2	641,7

C. Inspección superficial

En las micrografías obtenidas, que se presentan en las Fig. 5 y 6, se puede apreciar que el deslizamiento del alambre sobre cada una de las ranuras de los brackets produce una deformación plástica en los bordes para ambos tipos de brackets. Además, en los brackets Synergy se observó una deformación plástica adicional en las cimas de ambos montículos que forman la ranura.

En el caso de los alambres, éstos también sufrieron deformación plástica, aunque menos evidente que en los brackets, presentando un efecto de pulido en su superficie (Fig. 7).

IV. DISCUSIÓN

A. Geometría:

La fricción en ortodoncia depende fuertemente de la geometría de la ranura y del contacto alambre-bracket, además de las condiciones de la fuerza normal y los materiales en contacto. La geometría de las ranuras de ambos tipos de brackets era diferente, en el Minidiamond

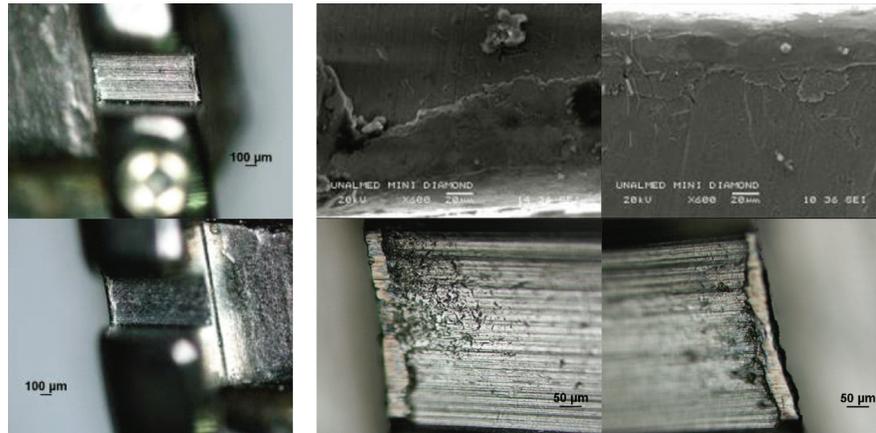


Fig. 5. Ranura del bracket Minidiamond. Las micrografías de la izquierda (MOLR) corresponden a la ranura antes del deslizamiento y las de la derecha (las micrografías de la parte superior son tomadas por SEM y las de la parte inferior son micrografías MOLR) son después del deslizamiento. Se puede observar cómo se desgastaron los bordes de la ranura.

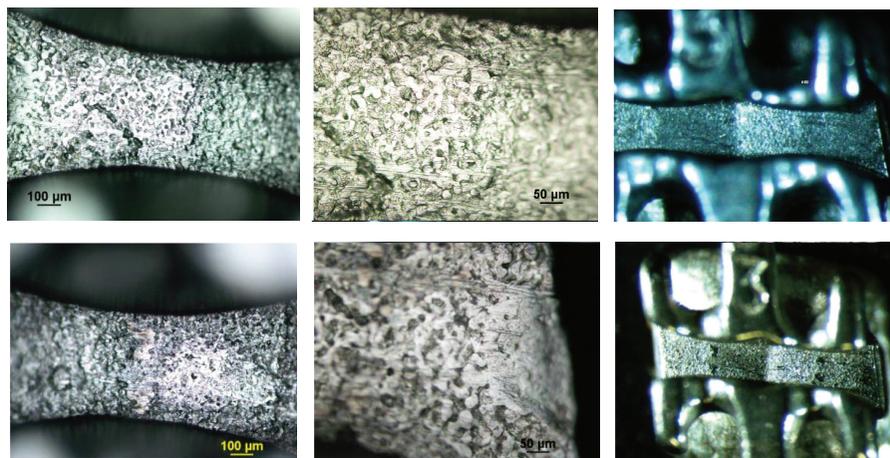


Fig. 6. Micrografías (MOLR) de la ranura del bracket Synergy. Las micrografías de arriba corresponden a la ranura antes del deslizamiento, las de abajo son después del mismo. Se puede observar cómo se desgastaron los bordes y la cima de los montículos que se encuentran en la ranura.

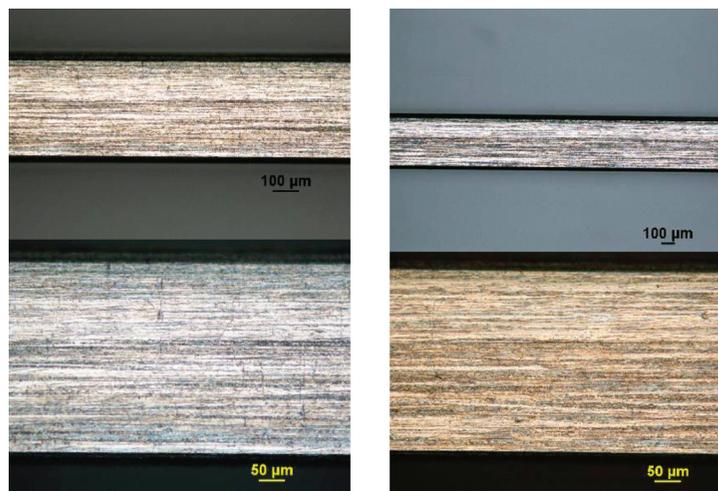


Fig. 7. Micrografías (MOLR) del alambre. Las micrografías de la izquierda corresponden al alambre antes del deslizamiento y las de la derecha son después del deslizamiento. Se puede observar que antes del deslizamiento hay unas pequeñas imperfecciones superficiales que no existen después del deslizamiento, por lo cual se puede decir que el alambre sufrió un efecto de pulido.

la ranura era plana, el contacto se hacía en los puntos extremos de la ranura y el área de contacto era mucho mayor que en el Synergy, donde la ranura está formada por dos montículos en la cima de los cuales se da el contacto con el alambre. En el Synergy el área de contacto es menor por lo cual es de esperarse que las fuerzas sean menores para este tipo de bracket en comparación con el Minidiamond.

El ángulo de contacto crítico de un bracket está dado principalmente por el ancho y el largo de la ranura, el ancho del alambre y la libertad que existe entre ambos. Según lo demostrado por Kusy *et al.* (1999) cada dupla arco bracket tiene un ángulo de contacto crítico, dicho ángulo es el límite entre la configuración pasiva y activa de un bracket [6, 7].

En 2004, Thorstenson y Kusy reportaron que los ángulos de contacto crítico para el Minidiamond y el Synergy son $2,7^\circ$ y $5,1^\circ$, respectivamente [7]. Si se observan detenidamente las ranuras de ambos brackets se ve que para el caso del Minidiamond, su ranura tiene la forma de una caja de 3 paredes, mientras que en el Synergy las paredes son redondeadas, lo que disminuye el área de contacto entre la ranura y el alambre, teniendo como consecuencia una disminución en la fuerza de fricción (Fig. 1).

En este estudio el bracket Minidiamond tuvo una configuración pasiva para los ángulos 0° y 2° , y activa para los ángulos 4° , 6° y 8° . Mientras que en el Synergy la configuración pasiva se dio en los ángulos 0° , 2° y 4° y la activa en 6° y 8° .

Al comparar los ángulos con las fuerzas obtenidas para éstos, se puede ver que en la configuración activa las fuerzas son mayores que en la configuración pasiva, además que la fuerza aumenta con la angulación. Este aumento es debido al efecto del incremento del área de contacto entre las superficies al aumentar la angulación (Fig. 8).

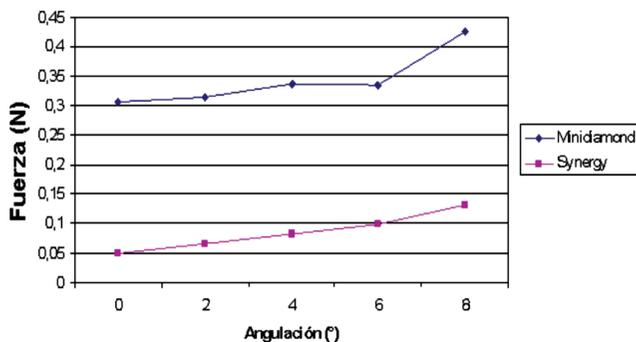


Fig. 8. Curva Fuerza contra Angulación. La fuerza aumenta a medida que aumenta la angulación entre la ranura y el alambre. Las fuerzas en la dupla Minidiamond-alambre son mucho mayores que las fuerzas de la dupla Synergy-alambre.

B. Fuerzas

En este estudio se encontró que el promedio de la fuerza máxima en configuración pasiva era de $0,310$ N y $0,065$ N para Minidiamond y Synergy, respectivamente. Estos resultados discrepan de los obtenidos por Kusy *et al.* 2004, los cuales encontraron que en la configuración pasiva la resistencia al deslizamiento para Minidiamond era de $0,380$ N y para Synergy de $0,450$ N, sugiriendo que el bracket Synergy tiene mayor resistencia al deslizamiento en la configuración pasiva que el Minidiamond, lo cual no coincide con lo obtenido en el presente estudio. Si se analizan los resultados de Sadique *et al.* 2006, quienes evaluaron varios tipos de brackets, aunque sólo es posible establecer comparaciones con los datos reportados para el bracket Victory (el único que era de acero inoxidable), para el cual reportaron una resistencia al deslizamiento a 0° de $1,5$ N, se aprecian discrepancias adicionales con lo presentado en este estudio, donde se obtuvo una resistencia de $0,306$ N para Minidiamond [9].

De las curvas obtenidas para cada bracket y cada ángulo, se ve que en el caso del Minidiamond la resistencia al deslizamiento tiene una marcada tendencia a disminuir a medida que se aumenta el deslizamiento. Esto explica el hecho de que según las imágenes de microscopía obtenidas, los lugares donde más se presentaron desgastes fueron en los bordes, y por qué la mayor fuerza se ejerce al empezar el deslizamiento y no en la mitad como sucede en el caso del Synergy, en el cual la resistencia al deslizamiento oscila dentro del mismo intervalo de fuerza a lo largo de todo el desplazamiento; además, en estas gráficas se puede ver claramente el fenómeno de *stick-slip* o movimiento intermitente de la fuerza de fricción. La fuerza máxima en estas curvas se da en la mitad o al final de la misma, lo cual se relaciona con la deformación plástica presente en el fondo de la ranura, la cual se presentaba en la mitad de la ranura y en algunos casos en un sólo borde de ésta.

Desde el punto de vista de los materiales en contacto, Bowden *et al.* (1950) hacen énfasis en la diferencia de durezas de los materiales en contacto. Es bien sabido que a mayor diferencia de durezas entre dos materiales, mayor es la resistencia al deslizamiento y el daño de la superficie menos dura. Sin embargo, la Tabla 4 y 5 parecen mostrar lo contrario, aunque la mayor diferencia de dureza con respecto al alambre corresponde al bracket Synergy, es el Bracket Minidiamond el que presenta la mayor fuerza friccional para todos los ángulos. Claro está, la dureza no es el único factor a tener en cuenta, ya que la geometría de los brackets y la ranura, la fuerza normal proporcionada por la ligadura, y la fricción entre la ligadura y el alambre son factores que juegan un papel crucial en la fuerza de fricción.

Al comparar las resistencias al deslizamiento de los brackets Synergy y Minidiamond y tratando de hallar una relación entre los datos, se halló la relación entre las fuerzas de Minidiamond y Synergy, como se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Fuerzas y relación entre las fuerzas para los brackets Minidiamond y Synergy.

Fuerza (N)	Angulación (°)				
	0	2	4	6	8
Minidiamond	0,3060	0,3150	0,3370	0,3340	0,4250
Synergy	0,0485	0,0653	0,0825	0,0986	0,1320
Relación	6,3093	4,8257	4,0848	3,3874	3,2197

Si se hace una regresión de los datos se obtiene una relación de manera exponencial negativa (Fig. 9), con un coeficiente de correlación de 0,9641. A partir de esto se plantea la hipótesis de que a medida que aumenta el ángulo, las fuerzas de fricción entre ambos tipos de brackets se igualan, esto mientras el alambre no sufra una deformación plástica.

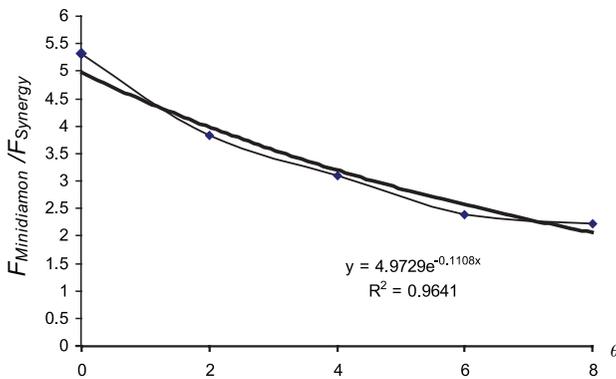


Fig. 9. Relación entre las fuerzas del bracket Minidiamond y Synergy. La línea más delgada corresponde a dicha relación y la más gruesa a la línea de tendencia de los datos, la cual es una curva exponencial negativa.

V. CONCLUSIÓN

A partir de los resultados y discusión de este estudio, las siguientes conclusiones son planteadas.

- De las duplas estudiadas, la que menor fuerza de fricción tuvo para todas las angulaciones fue la dupla alambre-Synergy.
- A mayor ángulo existente entre el eje del alambre y el eje de la ranura, mayor es la fuerza de fricción, debido a un aumento del área real de contacto entre las superficies deslizantes.

- La fuerza de fricción depende tanto de la geometría de la ranura del bracket como de la fuerza normal ejercida por la ligadura al sistema arco-bracket. A su vez, de la geometría depende el ángulo de contacto crítico.
- En el bracket Minidiamond la resistencia al deslizamiento aumenta notablemente en 8°.
- Las resistencias al deslizamiento para los brackets Minidiamond y Synergy se relacionan de manera exponencial negativa.
- Los patrones de desgaste más frecuentes en los brackets son del tipo abrasivo y adhesivo, debido principalmente a que el alambre deslizante posee una dureza muy superior con respecto a estos.

VI. AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a la empresa Colombia Orthodontics, distribuidores de Rocky Mountain para Colombia, por su patrocinio con los brackets Synergy.

REFERENCIAS

- [1] Bowden F.P, Tabor D. The friction and lubrication of solids, Oxford 1950.
- [2] Nanda R. Biomecánica en Ortodoncia Clínica, Ed. Panamericana, 1998.
- [3] Hutchings I.M. Tribology. Friction and wear of engineering materials. Edward Arnold, United Kingdom, 1992.
- [4] Zum Gahr K.H. Microstructure and wear of materials, tribology series 10, Ed. Elsevier, Great Britain, 1987.
- [5] Rossouw P.E., Kamelchuk L.S., Kusy R.P. A Fundamental Review of Variables Associated with Low Velocity Frictional Dynamics. *Seminars in Orthodontics*, 9, 223-235, 2003.
- [6] Kusy R.P., Whitley J. Influence of archwire and bracket dimensions on sliding mechanics: derivations and determinations of the critical contact angles for binding. *European Journal of Orthodontics*, 21, 199-208, 1999.
- [7] Thorstenson G., Kusy R.P. Resistance to sliding in the slot floors and walls: effects of second-order angulation. *Dental Materials*, 20, 881-892, 2004.
- [8] Michelberger D.J., Eadie R.L., Faulkner M.G., Glover K.E., Prasad N.G., Major P.W. The friction and wear patterns of orthodontic brackets and archwires in the dry state. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 118 (6), 662-674, 2000.
- [9] Sadique S.E., Ramakrishna S., Batchelor A.W., Bing C.H. In vitro frictional behavior and wear patterns between contemporary and aesthetic composite orthodontic brackets and archwires. *Wear*, 26(10), 1121-1139, 2006.