

---

# EVALUACIÓN DE LA FRICCIÓN EN ARCOS ORTODÓNCICOS DE ACERO INOXIDABLE CON Y SIN RECUBRIMIENTO VÍTREO APLICADO POR EL MÉTODO Sol-Gel<sup>1</sup>

## FRICCIÓN EVALUATION IN STAINLESS STEEL ARCHES WITH AND WITHOUT GLASS COATING USING THE Sol-Gel METHOD<sup>1</sup>

JOSÉ A. VALENCIA ÁLVAREZ<sup>2</sup>, YESID MONTOYA GÓEZ<sup>3</sup>, ALEJANDRO PELÁEZ VARGAS<sup>4</sup>,  
PEDRO M. JARAMILLO VALLEJO<sup>5</sup>, CLAUDIA GARCÍA GARCÍA<sup>6</sup>

**RESUMEN. Introducción:** el propósito de este estudio *in vitro* fue comparar la fuerza de fricción estática y dinámica generada entre brackets y alambres de acero inoxidable con y sin recubrimiento vítreo aplicado por el método Sol-Gel. **Métodos:** en todas las pruebas de fricción fueron utilizados brackets (0,018 x 0,025"), alambres de acero inoxidable (0,016 x 0,016") y ligaduras elásticas. Se realizó una caracterización con microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (SEM). La fuerza friccional fue evaluada utilizando una máquina de pruebas Testresources® en medio seco. **Resultados:** los resultados mostraron que el grupo de alambres de acero inoxidable sin modificación (grupo control) presentaron los valores más bajos de fuerza de fricción estática, seguido del grupo de alambres recubiertos por el método Sol-Gel (grupo Sol-Gel) y el grupo de alambres con tratamiento térmico (grupo térmico). Para la fricción dinámica, el grupo Sol-Gel mostró los valores más bajos, seguido del grupo control y el grupo térmico. **Conclusión:** los recubrimientos evaluados no mostraron mejor comportamiento friccional sobre brackets de acero inoxidable cuando son comparados con el grupo control.

**Palabras clave:** fricción, brackets, alambres de acero, recubrimientos, Sol-Gel.

Valencia JA, Montoya Y, Peláez A, Jaramillo PM, García G. Evaluación de la fricción en arcos ortodóncicos de acero inoxidable con y sin recubrimiento vítreo aplicado por el método Sol-Gel. Rev Fac Odontol Univ Antioq 2009; 20(2): 161-170.

---

**ABSTRACT. Introduction:** the aim of this *in vitro* study was to compare the static and dynamic frictional force generated between surfaces of metallic brackets and glass coated applied by the Sol-Gel method, and non coated wires. **Methods:** metallic brackets (0,018 x 0,025"), stainless steel wires (0,016 x 0,016") and elastic ligatures were used in all frictional tests. All components were characterized using SEM and optical microscopy. The frictional force was evaluated using a machine of tests Testresources® in dry environment. **Results:** the results showed that the stainless steel wires without modification (control group) showed the lowest values of static friction force followed by the stainless steel wires group coated by Sol-Gel method

- 
- 1 Investigación realizada como requisito parcial para optar al título de especialista en Odontología Integral del Adolescente y Ortodoncia. Proyecto Interinstitucional desarrollado por el Grupo POPCAD de la Universidad de Antioquia, el Grupo de Cerámicos y Vítreos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, el Grupo de Investigación CES-LPH de la Universidad CES y la Facultad de Ingeniería Biomédica de la Escuela de Ingeniería de Antioquia-Universidad CES.
  - 2 Estudiante, posgrado Odontología Integral del Adolescente y Ortodoncia, Facultad de Odontología. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. orthos@epm.net.co.
  - 3 Ingeniero civil, M.Sc., profesor de Ingeniería Biomédica. Escuela de Ingeniería de Antioquia-Universidad CES. Medellín, Colombia. pfyemon@eia.edu.co.
  - 4 Odontólogo, BMES, M.Sc. profesor asistente. Grupo de Investigación CES-LPH. Facultad de Odontología, Universidad CES. Grupo de Cerámicos y Vítreos. Escuela de Física. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. alejandropelaezvargas@yahoo.com
  - 5 Odontólogo, especialista en Odontología Integral del Adolescente. Grupo POPCAD, profesor asociado. Facultad de Odontología. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. orthoclinic@une.net.co.
  - 6 Ingeniera Geóloga. Ph.D. profesor asociado. Grupo de Cerámicos y Vítreos. Escuela de Física. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. cpgarcia@unalmed.edu.co.

RECIBIDO: SEPTIEMBRE 9/2008 - ACEPTADO: MARZO 17/2009

and the wires group with thermic treatment (thermic group). For dynamic friction force, the Sol-Gel group showed the smallest values, followed by the control group and the thermal group. **Conclusion:** the evaluated coating did not show a better frictional performance applied on stainless steel brackets in comparison with the control group.

**Key words:** Friction, brackets, steel wires, coatings, Sol-Gel.

Valencia JA, Montoya Y, Peláez A, Jaramillo PM, García G. Friction evaluation in stainless steel arches with and without glass coating using the Sol-Gel method. Rev Fac Odontol Univ Antioq 2009; 20(2): 161-170.

## INTRODUCCIÓN

La técnica de deslizamiento en ortodoncia es afectada por variables que influyen en el comportamiento de la dupla alambre-bracket como la composición de los arcos<sup>1,2</sup> y los brackets,<sup>3-5</sup> el ancho y el tamaño de la ranura del brackets,<sup>6</sup> la forma y el espesor de los arcos,<sup>7</sup> angulaciones del arco<sup>8,9</sup>, el tipo de ligado<sup>10</sup> y el material de la ligadura,<sup>11</sup> medio húmedo o seco,<sup>12</sup> materiales esterilizados.

Estudios previos han evaluado el ángulo de contacto crítico entre la ranura y el bracket, donde se dan los fenómenos mecánicos conocidos como binding y notching, que contribuyen a la resistencia al deslizamiento en ortodoncia. Se ha mostrado que a mayor ángulo de contacto de binding mayor es la fricción y a mayor ángulo existente entre el eje del alambre y el eje de la ranura, mayor es la fuerza de fricción.<sup>13-15</sup>

Actualmente se busca disminuir la resistencia al deslizamiento, y una de las alternativas es modificar la topografía superficial de brackets, alambres o ambos. Teniendo en cuenta que la fricción depende del coeficiente de fricción de las superficies puestas en contacto, y es mayor cuando uno o ambos de los materiales presentan mayor rugosidad en su topografía superficial,<sup>16</sup> cualquier tratamiento que afecte la superficie de arcos y brackets de acero inoxidable pueden incidir sobre la fuerza de fricción del sistema. Entre los tratamientos superficiales reportados en la literatura se cuentan la implantación de iones dentro del sustrato, la carburización, y la nitruración.<sup>17</sup> Otra alternativa es el revestimiento de la superficie, que puede llevarse a cabo por varios métodos incluyendo el recubrimiento con una capa metálica, el depósito de vapores químicos (CVD), los recubrimientos asistidos por plasma (PVD), la deposición de polímeros,

los revestimientos con carbono y los recubrimientos inorgánicos no metálicos.<sup>18</sup>

Los recubrimientos inorgánicos no metálicos se pueden depositar por métodos miméticos, electroformado, inmersión en soluciones, suspensiones o geles (método Sol-Gel) y la deposición por plasma (PVD)<sup>18</sup>. Los recubrimientos realizados por el método Sol-Gel tienen la ventaja de requerir menores temperaturas para su aplicación y alcanzan buena adherencia a la superficie del sustrato. Adicionalmente, sirven de barrera contra la humedad, pueden aumentar la resistencia a la fractura, la resistencia al desgaste, sirven como aislantes térmicos y eléctricos, pueden aumentar la resistencia a la corrosión y no presentan efectos genotóxicos.<sup>19-23</sup>

El propósito de este estudio in vitro fue comparar la fuerza de fricción estática y dinámica generada entre brackets de acero inoxidable y alambres de acero inoxidable con y sin recubrimiento vítreo aplicado por el método Sol-Gel.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para este estudio de tipo experimental, se utilizaron alambres (n = 60) de acero inoxidable AISI 303 de uso ortodóncico (0,016 x 0,016", Ormco®) con 10 cm de longitud. Los alambres se dividieron en: Un grupo Sol-Gel que incluyó alambres recubiertos con una capa vítrea por inmersión-extracción. Un grupo control que incluyó alambres sin modificación. Y un grupo térmico donde alambres desnudos fueron sometidos al mismo tratamiento térmico necesario para la sinterización del recubrimiento vítreo.

Se utilizaron seis brackets estándar para caninos superiores de acero inoxidable AISI 303 con ranura (0,018 x 0,025") de acero inoxidable (Ormco Diamond®). Para evaluar la resistencia a la fricción

entre los brackets y los tres grupos de alambres, se ubicó un bracket nuevo cada veinte pruebas de forma aleatoria. Los alambres y los brackets fueron ligados con anillos elásticos (poliuretano-libre de látex) de color negro (diámetro interno 0,045" y externo 0,115", American Orthodontics®).

El módulo de elasticidad de las ligaduras fue determinado con una máquina de ensayos universales (Test resources – 650R®, celda de carga de 10 lb  $\pm$  0,00043 lb), acoplado a un *software* para adquisición y análisis de datos (MtestWR).

Se realizó un análisis de topografía superficial de los brackets, alambres y ligaduras por microscopía óptica (Olympus PME 3-ADL® con un analizador de imagen Leyca Q5001W) y microscopía electrónica de barrido (SEM, JEOL JSM-5910LV®) a 15 kV a distancia de trabajo de 13 mm.

### Recubrimiento vítreo

Los alambres utilizados como sustrato para aplicar los recubrimientos (grupo Sol-Gel) fueron lavados por un método estándar y sumergidos en un baño de ultrasonido durante 10 min.

Los recubrimientos fueron aplicados por una metodología previamente reportada<sup>19, 21, 23-25</sup> que incluye la mezcla de reactivos precursores de sílice como TEOS (trietilortosilicato) y MTES (metiltrietoxisi-

lano), etanol como solvente y ácido acético como catalizador. Para la aplicación de los recubrimientos se usó el método de inmersión-extracción a una velocidad constante de 4 cm/min y posteriormente se realizó un tratamiento térmico a 450 °C durante media hora.

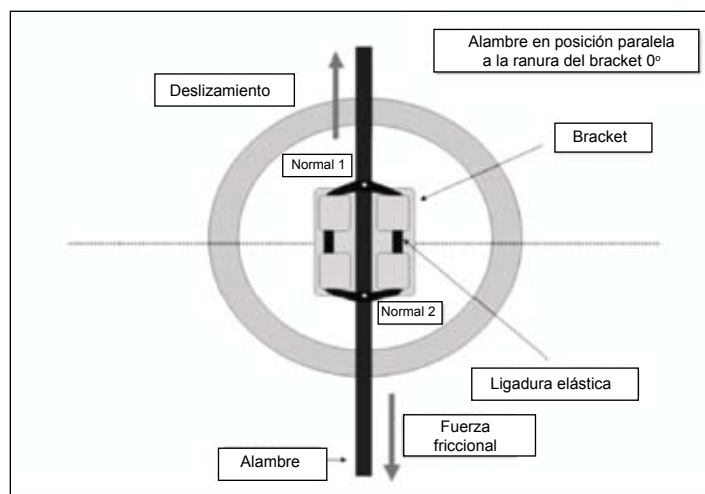
Para el control de calidad de los recubrimientos, se hizo una inspección visual por microscopía óptica y fueron descartados los recubrimientos con discontinuidades. Los alambres seleccionados fueron analizados por microscopía electrónica de barrido antes y después de ser incorporados en las pruebas.

### Pruebas de fricción

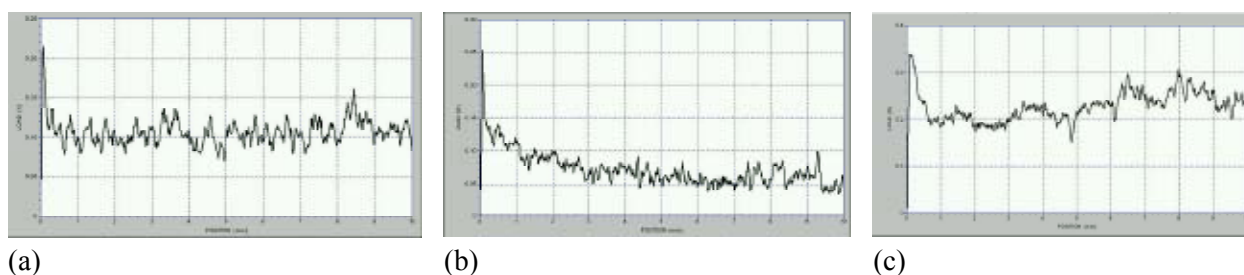
Para las pruebas de fricción se diseñó un adaptador acrílico como soporte para los brackets y los alambres, el cual fue acoplado a una máquina de pruebas Test resources – 650R®.

Después de posicionar el bracket, alambre y ligadura se aplicó la carga a una velocidad constante de cinco mm/min durante dos minutos<sup>26</sup> a temperatura ambiente ( $21 \pm 2$  °C) siguiendo el diagrama de fuerzas de la figura 1. Se obtuvieron gráficas de la relación carga posición (*N/mm*), y el punto más alto de la gráfica (momento en el cual se vence la fuerza de fricción estática entre las superficies) fue tomado como el valor de la fuerza de fricción estática para el análisis estadístico (figura 2).

**Figura 1**  
*Diagrama de fuerzas en vista frontal del sistema bracket-alambre-ligadura, el alambre y la superficie de la ranura del bracket están paralelas. Ángulo crítico de contacto igual a cero*



**Figura 2**  
*Relación carga-deslizamiento para los tres grupos evaluados: a) grupo control, b) Sol-Gel y c) grupo térmico*



### Pruebas de flexión de los alambres

Se evaluaron las propiedades elásticas de cada uno de los alambres, por medio de una prueba de flexión de tres puntos, utilizando la máquina de pruebas Test resources™ – 650R con una celda de carga de 250 lb.

### Análisis estadístico

Para el análisis de la fricción estática y dinámica se utilizó el paquete estadístico SPSS versión 14.0, con el cual se hicieron análisis univariados y bivariados para las variables en cada tratamiento, material y resistencia friccional, resultante de las pruebas en los tres tipos de arcos. Para cada grupo de arcos probados se calcularon estadísticas descriptivas como promedios, desviación estándar, medianas y rangos. Se compararon las medias de los valores de resistencia friccional entre las diferentes combinaciones arco-bracket para determinar si existía una diferencia significativa con un nivel de significación estadística del 5%, previamente se verificó si los datos seguían una distribución de probabilidad normal por medio de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para cada una de las combinaciones. La anterior prueba mostró que la significación para los tres tipos de arcos era menor de 0,05, descartando así la posibilidad de aceptar que los datos siguen un comportamiento normal.

Posteriormente se hizo la prueba U de Mann-Whitney en la cual se compararon las medias por parejas de grupos con el fin de determinar cuál o cuáles de los grupos en comparación fueron los que presentaron diferencias.

## RESULTADOS

### Fricción estática

Los resultados de las pruebas de fricción estática muestran que el grupo control presentó la menor fricción promedio ( $0,215 \pm 0,06 N$ ) seguido del grupo Sol-Gel ( $0,256 \pm 0,07 N$ ) y el grupo térmico ( $0,353 \pm 0,12 N$ ), el cual mostró la mayor fricción estática. Según la prueba U de Mann-Whitney se encontraron diferencias entre las medianas de los grupos comparados por parejas, grupo control:  $0,20 N$ , grupo Sol-Gel:  $0,25 N$  y grupo térmico  $0,33 N$ .

### Fricción dinámica

Los resultados de las pruebas de fricción dinámica muestran que el grupo Sol-Gel presentó la menor fricción promedio ( $0,109 \pm 0,06 N$ ) seguido del grupo control ( $0,135 \pm 0,04 N$ ) y el grupo térmico ( $0,215 \pm 0,09 N$ ), el cual mostró la mayor fricción dinámica.

La prueba U de Mann-Whitney utilizada para comparar los grupos control y Sol-Gel térmico-Sol-Gel, mostró diferencias entre las medianas de los grupos comparados. Igualmente la prueba t-Student utilizada para determinar la diferencia entre las medias de los grupos control y térmico mostró diferencias entre estos.

### Análisis de la topografía superficial

Las imágenes de microscopia óptica mostraron superficies lisas tanto en el grupo control como en el grupo Sol-Gel, mientras que en el grupo térmico se presentaron superficies irregulares con áreas os-

curas compatibles con oxidación del alambre. En algunos casos se desecharon alambres del grupo Sol-Gel, ya que en algunos alambres se obtuvo un recubrimiento con defectos tales como grietas, poros y presencia de puntos negros.

Las imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) a 1.000 y 2.500X antes y después de las pruebas, mostraron diferencias entre los tres grupos evaluados. Los grupos de control y Sol-Gel presentaron marcas de desgaste después de la prueba de deslizamiento, mientras que el grupo térmico exhibió una superficie pulida con ligeros rasgos de desgaste y eliminación de óxido superficial producido en el tratamiento térmico. El grupo Sol-Gel mostró trazas de remoción del cerámico en dirección del deslizamiento, debido en algunos casos a desprendimiento del recubrimiento y a una adherencia insuficiente para resistir la fuerza aplicada desde el bracket (figura 3).

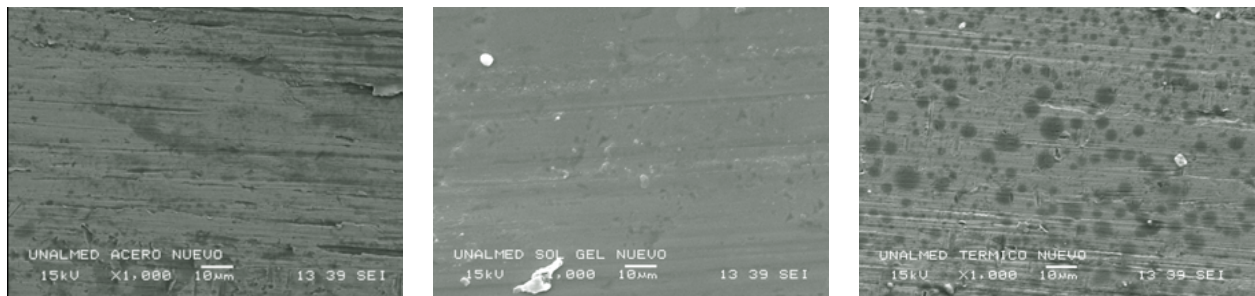
Los alambres del grupo control antes de la prueba de deslizamiento mostraron una superficie más

pulida en comparación con los alambres después de la prueba, debido al desgaste cuando se deslizó sobre la ranura. Igual sucedió con los alambres del grupo Sol-Gel antes de la prueba, los cuales presentaron una superficie más homogénea y lisa que los alambres usados del mismo grupo y los alambres de los demás grupos (control y térmico). Los alambres usados del grupo Sol-Gel mostraron líneas horizontales de abrasión (desprendimiento del material) en la misma dirección del deslizamiento. Los alambres nuevos del grupo térmico mostraron una superficie irregular (con áreas de oxidación) frente a los usados del mismo grupo y todos los demás alambres (figura 3).

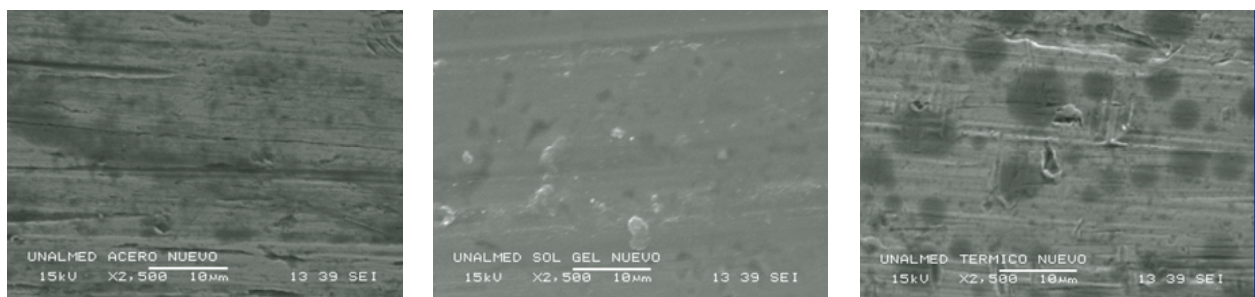
Sobre el bracket también se evidenció desgaste en la superficie de la ranura, al igual que remoción de partículas cúbicas (2,5 µm), con gran concentración de calcio según análisis químico; las cuales estaban incrustadas en la superficie, posiblemente procedentes del abrasivo del proceso de fabricación (figura 4).

**Figura 3**

*Imágenes (SEM) de la superficie de alambres representativos de los grupos: control (columna izquierda), Sol-Gel (columna central) y térmico (columna derecha). Antes (a-b) y después (c-d) de las pruebas de fricción. 1.000X (a, c) 2.500X (b, d).*

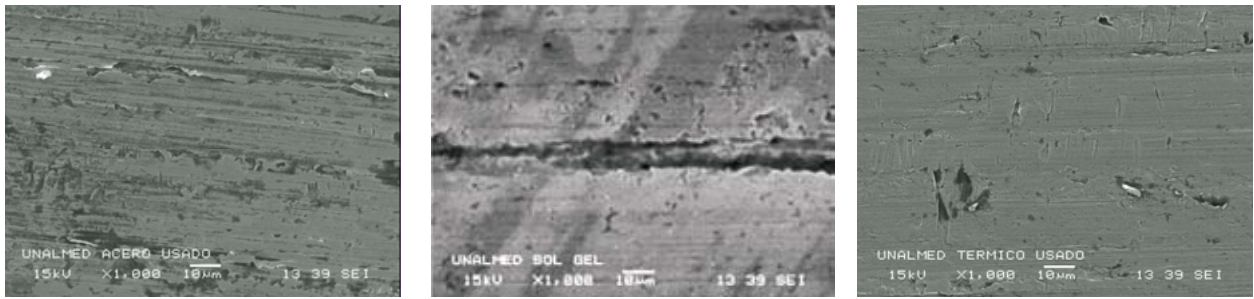


(a)

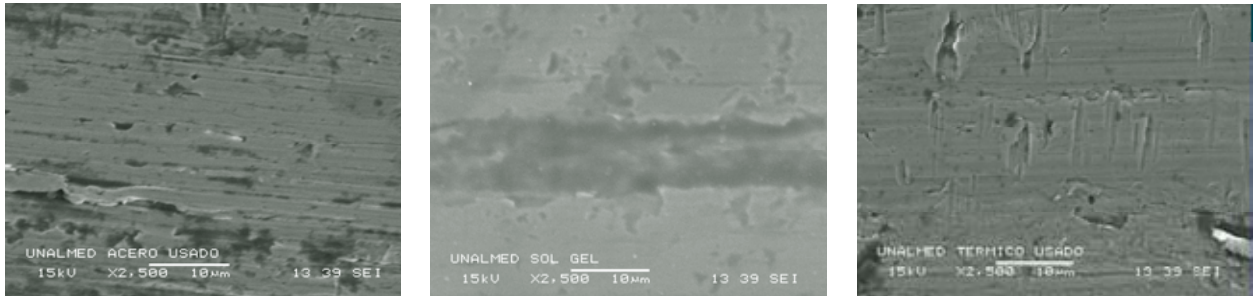


(b)





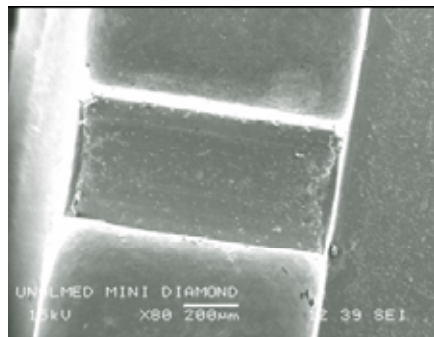
(c)



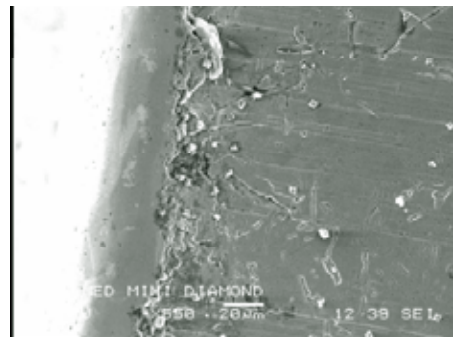
(d)

**Figura 4**

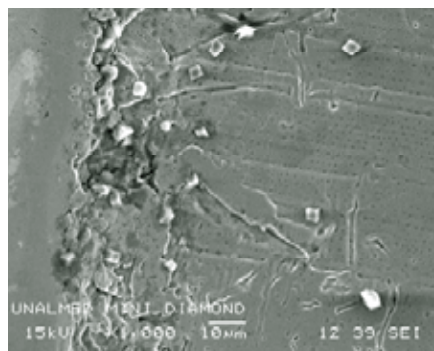
*Imagen SEM del borde de la ranura del bracket nuevo. a) 80X, b) 550X. c) 1.000X y d) 2.500X*



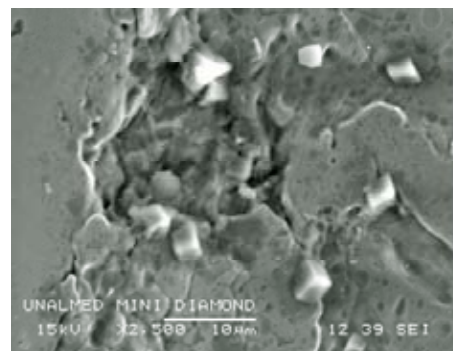
(a)



(b)



(c)



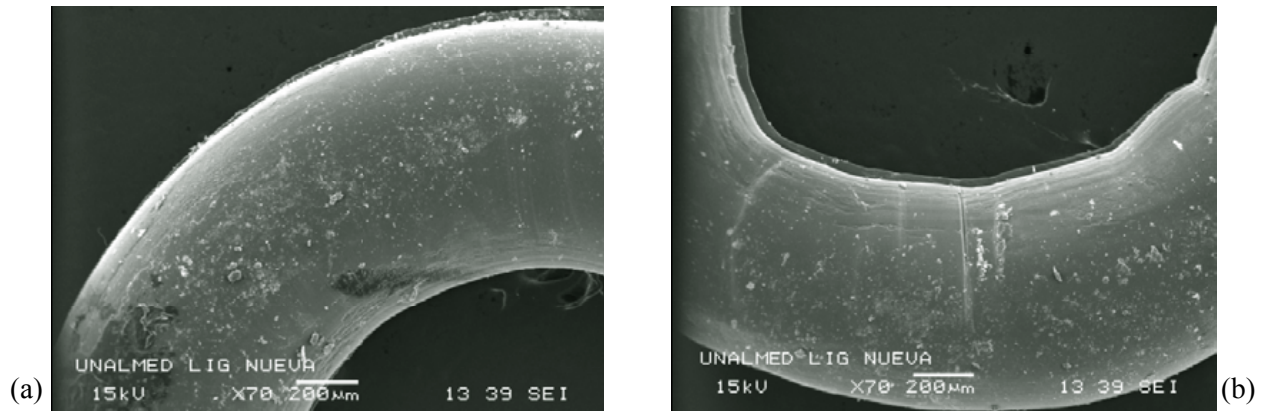
(d)

La evaluación superficial de los brackets nuevos también mostró que los bordes de las ranuras de los brackets presentan una superficie muy irregular, mientras que la región central de la ranura del brack-

et presentó una superficie lisa y homogénea. En cuanto a las ligaduras elásticas usadas, mostraron deformación plástica cuando fueron comparadas con las ligaduras nuevas (figura 5).

**Figura 5**

*Imágenes SEM (70X) de la superficie de la ligadura elástica. a) Ligadura antes y b) después de ser utilizada, donde se observa la deformación plástica ocurrida en el contacto con el alambre y el bracket*



## DISCUSIÓN

Los alambres de acero (grupo control) mostraron la menor fuerza de fricción estática en las mecánicas de deslizamiento con respecto a los grupos Sol-Gel y térmico, lo cual concuerda con lo reportado por estudios previos<sup>27</sup> en los cuales los aceros han mostrado dinámicas friccionales predominantemente más bajas que otros materiales. Sin embargo, frente a la fuerza de fricción dinámica, el grupo Sol-Gel presentó la menor fuerza de fricción (0,109 N), seguida por el grupo control (0,135 N) y finalmente el grupo térmico (0,215 N).

En este estudio se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas para la fricción estática entre el grupo control y el grupo Sol-Gel, mientras que el comportamiento de la fricción dinámica mostró tendencia a la disminución progresiva en el grupo Sol-Gel. En el grupo control la fricción dinámica no presenta variaciones muy bruscas a medida que se desliza el alambre. Para el grupo control con un valor medio 0,135 N, se encontró que la fuerza de fricción dinámica representa el 63% de la fuerza de fricción estática. La fricción dinámica para el grupo Sol-Gel se ubicó aproximadamente

en 0,109 N, que representa el 43% de la fricción estática para este grupo (figura 2).

El grupo térmico presentó una gráfica más irregular, y la fricción dinámica fue en promedio de 0,215 N, representando el 61% de la fuerza de fricción estática. Las imágenes SEM de la figura 3 (columna derecha) permiten deducir que este comportamiento mecánico es debido a la remoción del óxido de hierro a medida que se realizó el deslizamiento sobre el bracket. En este caso la capa de óxido de hierro presente sobre la superficie del alambre no favoreció la disminución de la fuerza de fricción ni estática ni dinámica ya que la fuerza normal fue relativamente grande (entre 3,9 y 4,2 N).<sup>3,28</sup>

El grupo térmico sufrió una velocidad de enfriamiento que probablemente modificó sus propiedades físicas, ya que como es sabido, si el enfriamiento del acero se da de una forma más rápida los átomos de cromo presentes en la aleación se ubicarán alrededor de los granos en donde con frecuencia se ubican los átomos de carbono, generando una superficie del grano vulnerable a la oxidación, lo cual se pueden apreciar en las imágenes de SEM en los alambres nuevos del grupo térmico (figura 3).

Las imágenes SEM del grupo Sol-Gel (figura 3) mostraron que la superficie de este es más homogénea que la de los otros dos grupos evaluados antes del deslizamiento, lo cual supondría mejora en la topografía superficial de los alambres de este grupo, generando unas características más adecuadas para la mecánica de deslizamiento. Sin embargo, las imágenes posteriores al deslizamiento dejan ver alto grado de daño en el recubrimiento, por desprendimiento debido a las fallas en la adherencia al sustrato y el rayado como consecuencia de la diferencia de dureza con respecto al acero AISI 303 del bracket. Este rayado se supone debido a que la fuerza normal es aplicada en los bordes de la ranura del bracket, en donde la ligadura genera mayor presión contra el alambre y el bracket. La concentración de fuerzas en estos puntos aumenta la penetración del borde del bracket sobre el alambre y así se generan los daños en el alambre. Recubrimientos cerámicos rígidos tienden a ser más vulnerables a la fractura conforme aumenta el espesor de la película.

### Comportamiento de la curva fricción

Se presentaron curvas representativas de carga-deslizamiento medidas para los grupos control, Sol-Gel y térmico, respectivamente (figura 2). En las tres curvas se puede distinguir aumento rápido en la fuerza estática y luego una zona de descenso rápido que se interpreta como el inicio del movimiento del alambre pasando a la fuerza dinámica, esta zona corresponde a un acomodamiento de las superficies en el nuevo estado de movimiento.

Resulta difícil determinar si la naturaleza de la fuerza de la ligadura es elástica o si ya se ha entrado en la zona plástica del polímero; sin embargo, las imágenes en SEM que comparan una ligadura antes y después de su uso, permiten comprobar que las ligaduras al montarlas en el bracket y deslizar sobre ellas los alambres sobrepasan el límite elástico (figura 5).

La siguiente zona en los diagramas de fuerza de fricción corresponde a la transición donde se presenta fuerza de fricción estable durante todo el movimiento, que se caracteriza por presentar concavidad positiva durante toda esta zona. Finalmente, la curva

toma una tendencia relativamente estable; es decir, sin tendencia predominantemente creciente ni decreciente. Después del primer pico, todos los gráficos presentan comportamiento de aumento y descenso en la fuerza de fricción dinámica, este fenómeno se conoce como stick-slip (comportamiento alternativo de movimiento y parada entre el alambre y el bracket en el deslizamiento); en este caso se puede inferir que la fuerza de fricción dinámica corresponde al valor intermedio entre picos consecutivos ascendentes y descendentes. Aunque las mismas zonas pueden ser observadas en gráficos de fricción presentados por Michelberger,<sup>29</sup> los valores y el comportamiento de las curvas difiere bastante con respecto a las medidas en esta investigación (figura 2).

El sistema de deslizamiento que se está presentando en este modelo de pruebas relaciona tres superficies en contacto (ligadura elástica-alambre-bracket), por lo tanto es importante tener en cuenta que los resultados y el comportamiento de la dupla alambre-bracket está influenciada por el sistema de ligado.

### Vibración friccional

En el fenómeno de stick-slip se debe tener en cuenta que el alambre está en contacto con dos superficies totalmente diferentes. Por una parte está un acero inoxidable AISI 303 (bracket) y por otra poliuretano libre de látex (ligadura), para el primero, la interacción de dos materiales rígidos metálicos, la fuerza friccional es más de carácter topográfico en términos de los defectos superficiales de ambos materiales (bracket-alambre), en el segundo caso, la ligadura no requiere fuerzas normales muy grandes para presentar deformaciones plásticas entre los defectos del acero del alambre aumentando el área de contacto entre superficies. Como ha sido reportado, el tipo de ligado puede variar el comportamiento de la fricción tanto estática como dinámica.<sup>10, 30</sup> Estos dos fenómenos contribuyen a generar un bloqueo mecánico entre superficies que aumenta la fuerza de fricción dinámica.

### Pruebas de flexión en los alambres

Las pruebas de flexión de los alambres mostraron que el grupo Sol-Gel presentó mayor rigidez al ser



comparado con los demás grupos. Lo anterior, aunque confirma lo reportado en investigaciones previas, no corresponde a este caso ya que estos autores concluyen que al aumentar el espesor del alambre igualmente aumenta su rigidez.<sup>16,31</sup> En este caso, los espesores de las capas delgadas (2,5 µm) no son un aporte significativo en el espesor del alambre pero puede interpretarse como la aplicación de un refuerzo con mayor módulo de rigidez sobre la periferia del alambre que mejora su resistencia a la flexión.

## CONCLUSIONES

Los valores más bajos de fuerza de fricción estática fueron obtenidos con los alambres del grupo control, seguidos del grupo Sol-Gel y el grupo térmico. Para la fricción dinámica, los menores valores de fuerza de fricción fueron obtenidos con el grupo Sol-Gel, seguido del grupo control y el grupo térmico.

En este estudio in vitro los recubrimientos vítreos aplicados por Sol-Gel no presentaron una adherencia compatible con la fricción en mecánica de ortodoncia.

Estudios futuros podrían enfocarse a evaluar modificaciones en el tamaño de la ranura del bracket, en el uso de alambres más rígidos y en el uso de otras técnicas de recubrimiento para intentar encontrar una disminución en la resistencia friccional.

## CORRESPONDENCIA

Claudia Patricia García García Ph.D.  
 Universidad Nacional de Colombia  
 Sede Medellín. Departamento de Física  
 Apartado 38 40. Medellín  
 Correo electrónico: cpgarcia@unalmed.edu.co

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Kusy RP. Orthodontic biomechanics: vistas from the top of a new century. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2000; 117: 589-591.
2. Kusy RP. Ongoing innovations in biomechanics and materials for the new millennium. *Angle Orthod* 2000; 70: 366-376.
3. Kusy RP, Whitley JQ. Coefficients of friction for arch wires in stainless steel and polycrystalline alumina bracket slots. I. The dry state. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1990; 98: 300-312.
4. Drescher D, Bourauel C, Schumacher HA. Frictional forces between bracket and arch wire. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1989; 96: 397-404.
5. Rendon L, Cano G, Peláez A, Jaramillo P, García C, Montoya Y. Evaluación in vitro de la resistencia friccional entre brackets cerámicos y arcos de acero inoxidable con y sin recubrimiento vítreo aplicado por el método Sol-Gel. *Rev Fac Odontol Univ Antioq* 2008; 20: 58-71.
6. Thorstenson GA, Kusy RP. 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.
7. Angolkar PV, Kapila S, Duncanson MG, Jr., Nanda RS. Evaluation of friction between ceramic brackets and orthodontic wires of four alloys. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1990; 98: 499-506.
8. Kusy RP. Influence on binding of third-order torque to second-order angulation. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2004; 125: 726-732.
9. Kusy RP, Whitley JQ. Assessment of second-order clearances between orthodontic archwires and bracket slots via the critical contact angle for binding. *Angle Orthod* 1999; 69: 71-80.
10. Shivapuja PK, Berger J. A comparative study of conventional ligation and self-ligation bracket systems. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1994; 106: 472-480.
11. Griffiths HS, Sherriff M, Ireland AJ. Resistance to sliding with 3 types of elastomeric modules. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2005; 127: 670-675; 754.
12. Stannard JG, Gau JM, Hanna MA. Comparative friction of orthodontic wires under dry and wet conditions. *Am J Orthod* 1986; 89: 485-491.
13. Articulo LC, Kusy K, Saunders CR, Kusy RP. Influence of ceramic and stainless steel brackets on the notching of archwires during clinical treatment. *Eur J Orthod* 2000; 22: 409-425.
14. Articulo LC, Kusy RP. Influence of angulation on the resistance to sliding in fixed appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1999; 115: 39-51.
15. Bobadilla M, Montoya Y. Medicion in vitro de la fuerza de fricción en duplas arco-brackets con angulacion. *Rev Ing Biomed* 2008; 2: 84-90.
16. Tidy DC. Frictional forces in fixed appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1989; 96: 249-254.
17. Kusy RP, Tobin EJ, Whitley JQ, Sioshansi P. Frictional coefficients of ion-implanted alumina against ion-implanted beta-titanium in the low load, low velocity, single pass regime. *Dent Mater* 1992; 8: 167-172.

18. Abad P. Tratamientos superficiales y recubrimientos. *Cuad Ceram y Vit* 1999; 8: 11-18.
19. García C. Bioactivación de metales de uso ortopédico mediante recubrimientos producidos por Sol-Gel. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid; 2004.
20. Durán A, Conde A, Gómez Coedo A, Dorado T, García C, Ceré S. Sol-Gel coatings for protection and bioactivation of metals used in orthopaedic devices. *J Mater Chem* 2004; 14: 2282-2290.
21. Peláez A, Pareja A, García C, Márquez M, Toro A, Castañeda R et al. Genotoxicity Effects of ceramic coating applied on metallic substrates using single cell gel electrophoresis Assay in vitro. *Key Eng Mater* 2005; 284-285: 593-596.
22. Haddow DB, James PF, VanNoort R. Characterization of Sol-Gel surfaces for biomedical applications. *J Mater Sci Mater Med* 1996; 7: 255-260.
23. García C, Galliano P, Cere S. Electrochemical evaluation of resistance to localised corrosion of vitreous coatings containing particles applied on metallic substrates for biomedical applications. *Mater Letters* 2003; 57: 1810-1814.
24. García C, Cere S, Durán A. Bioactive coatings prepared by Sol-Gel on stainless steel 316L. *J Non-Crystal Solids* 2004; 348: 218-224.
25. Peláez A, García C, Correa J, Abad P. Reliability weibull analysis for structural evaluation of bioactive films obtained by Sol-Gel process. *Key Eng Mater* 2004; 254-256: 431-434.
26. Ireland AJ, Sherriff M, McDonald F. Effect of bracket and wire composition on frictional forces. *Eur J Orthod* 1991; 13: 322-328.
27. Kusy RP, Whitley JQ. Effects of sliding velocity on the coefficients of friction in a model orthodontic system. *Dent Mater* 1989; 5: 235-240.
28. Kusy RP, Mims L, Whitley JQ. Mechanical characteristics of various tempers of as-received cobalt-chromium archwires. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2001; 119: 274-291.
29. Michelberger DJ, Eadie RL, Faulkner MG, Glover KE, Prasad NG, Major PW. The friction and wear patterns of orthodontic brackets and archwires in the dry state. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2000; 118: 662-674.
30. Thomas S, Sherriff M, Birnie D. A comparative in vitro study of the frictional characteristics of two types of self-ligating brackets and two types of pre-adjusted edgewise brackets tied with elastomeric ligatures. *Eur J Orthod* 1998; 20: 589-596.
31. Frank CA, Nikolai RJ. A comparative study of frictional resistances between orthodontic bracket and arch wire. *Am J Orthod* 1980; 78: 593-609.