
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-GEL¹

IN VITRO EVALUATION OF FRICTIONAL RESISTANCE BETWEEN CERAMIC BRACKETS AND ORTHODONTIC STEEL ARCHES WITH AND WITHOUT GLASS COATINGS APPLIED BY SOL-GEL METHOD¹

LUZ ADRIANA RENDÓN ARIAS², GUSTAVO ADOLFO CANO CORREA², ALEJANDRO PELÁEZ VARGAS³, PEDRO M. JARAMILLO VALLEJO⁴, CLAUDIA GARCÍA GARCÍA⁵, YESSID MONTOYA GÓEZ⁶

RESUMEN. Introducción: comparar la resistencia friccional estática y dinámica in vitro entre brackets cerámicos y alambres de acero inoxidable con recubrimiento vítreo aplicado por el método Sol-Gel y sin él. **Métodos:** se prepararon 58 alambres de acero inoxidable AISI 304 de 0.016 x 0.016 con recubrimiento vítreo aplicado por Sol-Gel y sin él. Posteriormente se evaluó la resistencia a la fricción estática y dinámica in vitro de los alambres sobre brackets cerámicos de zafiro monocristalino y se caracterizaron las superficies en contacto por microscopía óptica y electrónica de barrido (SEM). **Resultados:** se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre ambos grupos tanto para la fuerza de fricción estática ($p = 0,000$) como dinámica ($p = 0,001$). El grupo de los alambres recubiertos presentó una fuerza de fricción estática y dinámica mayor (estática: $1,78 \pm 0,44$ N, dinámica: $1,75 \pm 0,49$ N) que el grupo sin recubrimientos (estática: $1,37 \pm 0,31$ N, dinámica: $1,41 \pm 0,27$ N). La caracterización por SEM mostró que se producen defectos superficiales en los recubrimientos después de las pruebas de fricción. **Conclusión:** los recubrimientos evaluados no mostraron mejor comportamiento friccional sobre brackets de zafiro monocristalino cuando son comparados con el grupo control.

Palabras clave: fricción, brackets ortodóncicos, alambres para ortodoncia, revestimientos.

Rendón LA, Cano GA, Peláez A, Jaramillo PM, 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(1): 58-71.

ABSTRACT. Introduction: to compare the in vitro static and dynamic frictional resistance between ceramic brackets and stainless steel wires with and without glass coatings applied by sol-gel method. **Methods:** 58 commercial stainless steel orthodontic wires AISI 304 (0.016 x 0.016 inch) were prepared with and without vitreous coating applied by Sol-Gel method. The in vitro static and dynamic frictional resistance of the wires on the mono-crystalline ceramic brackets were evaluated; also, the wire surfaces were characterized by means of Optical Microscopy and scanning electronic microscopy (SEM). **Results:** statistically significant differences were found between both groups under static ($p = 0.000$) as well as dynamic ($p = 0.001$) friction test. The friction values found in the coated group were higher (Static friction: 1.78 ± 0.44 N, Dynamic friction: 1.75 ± 0.49 N) than the group with no coating (Static friction: 1.37 ± 0.31 N, Dynamic friction: 1.41 ± 0.27 N). Characterization by SEM showed surface defects in both groups after the friction tests. **Conclusion:** the evaluated coatings did not perform better in terms of frictional behavior on sapphire mono-crystalline ceramic brackets when compared with the control group.

Key words: friction, orthodontic brackets, orthodontic wires, glass coatings.

Rendón LA, Cano GA, Peláez A, Jaramillo PM, García C, Montoya Y. In vitro evaluation of frictional resistance between ceramic brackets and orthodontic steel wires with and without glass coatings applied by Sol-Gel method. Rev Fac Odontol Univ Antioq 2008; 20(1): 58-71-

-
- 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 (Universidad de Antioquia), el Grupo de Investigación Cerámicos y Vítreos, Unal., el Grupo de Investigación CES-LPH y la Facultad de Ingeniería Biomédica, E. I. A.
 - 2 Odontólogos, estudiantes de posgrado Odontología Integral del Adolescente y Ortodoncia, Facultad de Odontología. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
 - 3 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.
 - 4 Odontólogo, especialista Odontología Integral del Adolescente. Grupo POPCAD, profesor asociado posgrado Odontología Integral del Adolescente y Ortodoncia. Facultad de Odontología. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.
 - 5 Ing. geóloga. Ph.D., profesora asociada. Grupo de Cerámicos y Vítreos. Escuela de Física. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Correo electrónico: cpgarcia@unal.edu.co.
 - 6 IC., M. Sc., profesor de Ingeniería Biomédica. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Universidad CES. Medellín, Colombia.

RECIBIDO: MARZO 3/2008 - ACEPTADO: SEPTIEMBRE 30/2008

INTRODUCCIÓN

Los brackets cerámicos fueron introducidos en la ortodoncia debido al incremento en las demandas estéticas por parte de los pacientes.^{1,2} Sin embargo, su uso ha conducido a problemas como el elevado coeficiente de fricción entre el bracket cerámico y el arco de alambre, que aumenta el tiempo de tratamiento y exige el uso de mayores fuerzas.^{1,3,4}

Las variables que afectan la magnitud de la resistencia friccional en ortodoncia son los tipos de materiales de las superficies en contacto del bracket,^{5,6,7-10} de la ligadura¹¹⁻¹³ y del alambre,⁴ el tamaño y la forma del arco de alambre,⁶ la fuerza y el tipo de ligado,^{3,14-16} el tamaño,¹⁷⁻²⁰ la angulación de la ranura,^{21,22} el medio en el que se deslicen los materiales,^{23,24} la dureza y la topografía superficial.^{3,5,25,26}

Por lo anterior, las tendencias en los trabajos de investigación en biomateriales para arcos ortodóncicos y biomecánicas friccionales apuntan al desarrollo de materiales biocompatibles, estéticos y con mejores características superficiales, que permitan disminuir la fuerza de fricción y faciliten la realización de los movimientos.^{4,19,27}

Una de las alternativas propuestas para disminuir la resistencia friccional es la modificación de los materiales de las superficies en contacto.²⁷ Se han descrito previamente dos metodologías que incluyen la sustracción de material desde la superficie o la adición de otros materiales sobre la superficie. Entre los métodos aditivos se pueden mencionar la implantación de iones a partir de la carburización o la nitruración,²⁸⁻³¹ y los revestimientos con capas metálicas, cerámicas o poliméricas a partir de métodos químicos o físicos.³²

Entre los métodos de recubrimiento inorgánico no metálicos se encuentra el método de Sol-Gel, que tiene como ventajas la baja temperatura para su aplicación y la efectiva adhesión al sustrato.³³ Previamente se han reportado otras funcionalidades de los recubrimientos vítreos por Sol-Gel como son el servir de barrera contra la humedad, aumentar la resistencia a la fractura, a la corrosión y al desgaste, y servir como aislante térmico y eléctrico.³³⁻³⁸

El propósito de la investigación fue comparar la resistencia friccional estática y dinámica in vitro entre brackets cerámicos y alambres de acero inoxidable con recubrimiento vítreo aplicado por el método Sol-Gel y sin él.

MATERIALES Y MÉTODOS

Brackets

Se utilizaron 29 brackets cerámicos de zafiro monocristalino marca Ice de la casa comercial Ormco® de caninos superiores derechos, con una ranura de 0,018 x 0,025 (0,457 x 0,635 mm).

Alambres

Se usaron alambres para ortodoncia de acero inoxidable AISI 304 de 0,016 x 0,016 de espesor (0,406 x 0,406 mm) de 9 cm de longitud. Se utilizó como control un grupo de 29 alambres sin modificación superficial. Para el grupo experimental (alambres recubiertos) se seleccionaron 29 alambres que fueron sometidos a un lavado estándar y a un recubrimiento vítreo por el método Sol-Gel que ha sido previamente reportado^{39,40} e incluye la mezcla de reactivos precursores de sílice como TEOS (tietilortosilicato) y MTES (metiltrietoxisilano), etanol como solvente y ácido acético como catalizador. Para la aplicación de los recubrimientos se usó el método de inmersión-extracción (dip-coating) a una velocidad constante de 4 cm/min y posteriormente se realizó tratamiento térmico a 450 °C durante media hora.⁴¹

Para seleccionar alambres con recubiertos homogéneos y libres de defectos superficiales se realizó una inspección en un microscopio óptico con aumentos variables entre 100X y 200X, antes y después del deslizamiento de todos los alambres.

Ligaduras

Se emplearon 58 ligaduras de poliuretano-libre de látex de color negro de la marca comercial American Orthodontics®, con un diámetro interno de 0,045 y un diámetro externo de 0,115. Previamente se determinó el módulo de elasticidad de las ligaduras empleando una máquina de pruebas Test resources-

650R® con celda de carga Interface Inc. de 10 lb $\pm$ 0.00043 y un *software* para adquisición y análisis de datos MtestWR.

Pruebas de fricción

Para las pruebas de fricción se empleó una celda de carga de 250 lb con sensibilidad de 0,001 N. Los brackets se ligaron a los alambres con aros de poliuretano y tenían una disposición vertical de la ranura que era mantenida por una estructura acrílica adaptada a una máquina universal de ensayos Test resources-650R®.

Las pruebas se efectuaron sobre el tercio medio de cada uno de los alambres dada la buena calidad del recubrimiento identificada microscópicamente sobre esta zona. La fuerza normal generada por la ligadura se determinó midiendo la longitud total del aro de poliuretano deformado una vez se montaba en la dupla arco/bracket. Luego se montó una ligadura nueva en la máquina universal de ensayos y se deformó la misma longitud midiendo así la fuerza necesaria para estirla el mismo grado de deformación. A esta fuerza se le consideró como dato de la fuerza normal.

Tanto para el grupo de alambres recubiertos como para los del grupo control se empleó un alambre y una ligadura nueva en cada prueba y cada bracket se usaba aleatoriamente para deslizar los alambres a una temperatura de 21 °C $\pm$ 2. Se realizaron veintinueve pruebas por grupo.

Los datos se registraron con el *software* (Mtest) incorporado a la máquina de ensayos, a través de gráficas de relación fuerza/distancia [N/mm].

La aplicación de la carga fue ejercida con una velocidad constante de 5 mm/min durante dos minutos, de acuerdo con el protocolo usado por Ireland y colaboradores.⁴² El pico máximo de la fuerza en la gráfica fue considerado como el momento en el cual se vence la fuerza de fricción estática entre las superficies y se registró como valor de la fricción estática para el análisis estadístico, y el valor promedio de todas las fuerzas generadas después de ese pico máximo fue considerado como el valor de la fuerza friccional dinámica.

Caracterización superficial

Todos los alambres, brackets y ligaduras fueron evaluados antes y después de las pruebas de fricción por medio de un microscopio óptico con luz reflejada Olympus PME 3-ADL® en conjunto con un analizador de imagen Leyca Q5001W.

Adicionalmente se realizó una caracterización por microscopía electrónica de barrido con un equipo JEOL JSM-5910LV equipado con sonda Oxford Instruments INCA para microanálisis por EDS. Todos los análisis fueron realizados con un voltaje de 15 kV, una distancia de trabajo de 13 mm y aumentos variables de 95X, 500X, 1000X y 2500X.

Análisis estadístico

Para cada grupo se verificó si los datos experimentales de cada variable se ajustaban a un modelo de distribución normal por medio de la prueba de Shapiro Wilk. Se realizó un análisis estadístico descriptivo y se compararon las medianas de los valores de fuerza de fricción por medio de la prueba U de Mann-Whitney con una significancia estadística del 5%, todos los análisis fueron realizados con el programa SPSS (v. 14).

RESULTADOS

Recubrimientos

En la figura 1 se presentan dos imágenes obtenidas durante la etapa de control de calidad previa a la evaluación de la fricción, donde se observa un alambre recubierto con una capa vítrea homogénea y libre de defectos y un alambre recubierto que fue excluido debido a la presencia de defectos superficiales.

Fricción

Luego del análisis cuantitativo (tabla 1) se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,000$) entre ambos grupos. Se obtuvo menor fricción estática promedio en el grupo control ($1,37 \pm 0,31$ N) respecto al grupo de alambres recubiertos ($1,807 \pm 0,44$ N).

Respecto a la fricción dinámica, se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre

ambos grupos ($p = 0,001$). La tabla 1 muestra que el grupo control presenta valor promedio menor

($1,41 \pm 0,27 N$) en comparación con el grupo de alambres con recubrimiento ($1,75 \pm 0,49 N$).

Tabla 1
Fuerza friccional estática y dinámica [N], del deslizamiento en brackets cerámicos con arcos de acero inoxidable con recubrimiento vítreo aplicado por el método Sol-Gel y sin él

Tipo de fricción	Tipo de arco	N	Promedio [N],	S. D [N],	Mediana [N],	Mínimo [N],	Máximo [N],	Significancia p
Estática	Control	29	1,3779	0,31604	1,2800	1,03	2,35	0,000
	Sol-Gel	29	1,807	0,44393	1,7600	1,03	2,99	
Dinámica	Control	29	1,4124	0,27299	1,3200	1,05	2,20	0,001
	Sol-Gel	29	1,7559	0,49471	1,7100	0,83	3,14	

La figura 2 presenta las gráficas representativas del comportamiento friccional estático y dinámico en el grupo de alambres control de acero inoxidable y el grupo experimental de alambres con recubrimiento vítreo por la técnica Sol-Gel. En ambas gráficas se observa inicialmente incremento rápido de la resistencia friccional ocasionado por la fuerza estática seguido por ligero descenso que representa disminución de la resistencia friccional, indicando el comienzo del deslizamiento del alambre sobre el bracket donde se mide la fricción dinámica. Posteriormente se observan ciclos sucesivos de ascensos y descensos en la fuerza de resistencia friccional, los cuales son mucho más marcados en la gráfica del grupo control, mientras se presentan en forma muy sutil en la gráfica del grupo Sol-Gel. En la figura 2b, se nota además la tendencia creciente de la fuerza friccional, que en las últimas etapas del deslizamiento incluso alcanza a superar el valor de la fuerza estática máxima inicial.

Caracterización superficial

En las imágenes de microscopía óptica de los alambres antes de las pruebas de fricción (figuras 3a, c), se puede observar la presencia de superficies relativamente lisas tanto para el grupo control como para el grupo recubierto. En la figura 3a se nota la apariencia de los alambres de acero inoxidable sin recubrimiento, en general se observan superficies sin irregularidades marcadas, siendo notorios pequeños defectos en dirección predominantemente longitudinal.

Los alambres del grupo de recubrimientos presentan una superficie uniforme que sigue fielmente la textura del alambre sin recubrimiento (figura 3c).

Las imágenes de microscopía óptica de los alambres después de los ensayos de fricción (figuras 3b,d), muestran aumento en los defectos tanto en los alambres de acero inoxidable como en los alambres recubiertos. En los alambres del grupo control se observan en general marcados trazos en sentido longitudinal y deformaciones presentes en los bordes del alambre (figura 3b).

En las imágenes de los alambres con recubrimiento vítreo posterior al deslizamiento (figura 3d) se observa aumento en los defectos tales como rayones longitudinales y transversales, zonas de desgaste, fractura y desprendimiento del recubrimiento vítreo.

Las imágenes derivadas de la caracterización por microscopía electrónica de barrido se presentan en la figura 4. Con las imágenes de los alambres de acero inoxidable sin recubrimiento antes de las pruebas se confirma la presencia de defectos observadas por microscopía óptica (figuras 4a, c, e)

Luego del deslizamiento, es posible observar aumento significativo en el número de defectos en los alambres de acero inoxidable sin recubrimiento. En las figuras 4b, d, f se observan defectos de tipo rayones y descascaramientos que se incrementan drásticamente a mayores aumentos.

En las imágenes de los alambres nuevos con recubrimiento vítreo Sol-Gel se observa una superficie lisa a 95X (figura 4g), a un mayor aumento se observan rayones que corresponden a la textura del alambre de acero inoxidable sin recubrir (figuras 4i, k). Después del deslizamiento (figuras 4h, j, l) se observan rayones y desprendimientos del material de recubrimiento vítreo en algunas zonas.

La evaluación superficial de los brackets nuevos por medio de microscopia óptica muestra en general bordes irregulares y superficies rugosas y porosas. En la figura 3g se observa un alambre ubicado en la ranura del bracket, donde se aprecia que solo existe contacto entre las aristas del alambre y las esquinas de la ranura del bracket. En el fondo de la ranura se observa una superficie pareja y regular (figura 5a). Después del deslizamiento se encontraron pequeñas partículas de detritos en el fondo de la ranura en las áreas de contacto con los alambres (figura 5b) y no se observan cambios asociados a desgaste en la superficie.

Los brackets de zafiro monocristalino antes de las pruebas de fricción mostraron por microscopia electrónica de barrido (SEM) superficies homogéneas y limpias (figura 5a).

Después de los ensayos se observan detritos en el fondo de la ranura (figura 5b). Con el microanálisis químico se revela la presencia de hierro, cromo, níquel, sílice, elementos de la composición de los alambres desnudos y los alambres recubiertos (figura 6).

Las ligaduras por microscopia electrónica de barrido presentan una textura relativamente pareja y suave, con unas pequeñas zonas irregulares en el centro (figura 5c). Después de los ensayos de fricción se ven algunos detritos adheridos a la superficie (figura 5d). Es posible observar también, líneas de rayado producidas por el alambre y líneas de rasgado del material acompañadas de deformación plástica permanente (figura 5d).

DISCUSIÓN

Los brackets cerámicos han sido ampliamente utilizados por sus ventajas estéticas pero la presencia de macro y microdefectos derivadas del maquinado durante su fabricación, favorece la propagación de líneas de fractura y fallas que comprometen su utilización clínica, adicionalmente su textura superficial puede generar un incremento de la resistencia friccional.^{43, 44}

A partir de las pruebas realizadas se encontró menor fricción estática y dinámica estadísticamente signi-

ficativa para el grupo control con respecto al grupo de alambres recubiertos cuando son deslizados sobre brackets cerámicos de zafiro monocristalino. Estos resultados pueden explicarse al analizar factores como los materiales de las superficies en contacto y la geometría del bracket. En cuanto a los materiales, un factor importante en la mecánica de deslizamiento es la dureza, ya que a mayor diferencia relativa de dureza entre dos superficies en deslizamiento, mayor es la fuerza de fricción tanto estática como dinámica.^{5, 11, 45, 46} Los brackets cerámicos son más duros que los de acero; esto implica que, en lo que respecta a los materiales, la diferencia relativa entre la dureza del bracket cerámico, el acero de los alambres y el recubrimiento vítreo es mayor que con respecto a un bracket de acero.^{5, 11, 45, 46}

Por otra parte, la geometría tiene varias implicaciones probables en la fuerza friccional. Los brackets cerámicos tienen esquinas redondeadas (figuras 3g y 5a), lo que implica mayor concentración de esfuerzos y por tanto mayor fuerza normal,⁴⁴ además estos brackets tienen la ranura más larga que los brackets de acero, por tanto la ligadura elástica sufre mayor deformación, generando mayor fuerza normal contra el alambre;¹¹ por último, la textura del bracket cerámico es más rugosa que la del acero, debido al proceso de sinterizado de los polvos de alúmina, que también concentra los esfuerzos normales de contacto entre el alambre y el bracket.^{7, 9, 47, 48}

Se ha reportado previamente que la textura del bracket tiene efectos sobre la fuerza friccional. Según Pratten y colaboradores⁹ y Angolkar y colaboradores,⁶ las texturas superficiales de las ranuras de los brackets de acero y cerámicos vistas a simple vista por medio de SEM, muestran mayor rugosidad en los brackets cerámicos, lo cual puede ocasionar las variaciones observadas en la fuerza friccional entre estos dos brackets. Autores como Sadique y colaboradores⁴⁴ hicieron medición de la rugosidad superficial y encontraron valores de 0,0798 μm para brackets de acero inoxidable y de 0,3085 μm para brackets cerámicos Inspire® como los que se usaron en la presente investigación, lo cual nos confirma las imágenes vistas en la microscopia electrónica de barrido. Además, de acuerdo con Martínez,⁴⁹ los patrones de desgaste presentados en el fondo de la

ranura de los brackets corresponden al modelo de fricción por perturbación de la adhesión, en el cual la concentración de esfuerzos en el alambre o recubrimiento desprende parte del material y se queda adherido al bracket.^{44, 49}

En las gráficas de comportamiento friccional se observó incremento rápido de la resistencia friccional estática seguida de ligero descenso y se pudo ver que la fuerza friccional dinámica del grupo de recubrimientos; presentó un patrón de comportamiento continuo o sin sobresaltos con respecto al comportamiento mostrado por el grupo control, esta característica puede ser atribuida al fenómeno de *stick-slip*, siendo mayor en el grupo de aceros sin recubrimiento. El fenómeno de *stick-slip* (frenado-deslizamiento) de las curvas friccionales muestra un posible comportamiento de trabazón mecánica, que genera recesos en el deslizamiento pasando de una fuerza dinámica a una fuerza estática de forma cíclica.^{45, 50, 51} El comportamiento de la gráficas muestra un fenómeno asociado tanto al *stick-slip* como a deformaciones plásticas del alambre y el recubrimiento como lo muestran las figuras 3b y 3d. Las fluctuaciones o picos que se visualizan en el gráfico de fuerza vs. distancia (figura 2) pueden explicarse como un reflejo de defectos presentes tanto en los brackets como en los alambres.

En las evaluaciones realizadas por microscopía óptica y electrónica de barrido se encontró en los alambres de acero inoxidable sin recubrimiento, defectos debidos a su proceso de fabricación (figura 3a), los alambres recubiertos presentaron una textura homogénea con ligeros rayones que seguían fielmente la superficie del sustrato, lo cual supondría mejoría en la topografía superficial de los alambres de este grupo, generando unas características más adecuadas para las mecánicas de deslizamiento (figura 3c).

Los brackets mostraron en general una superficie rugosa y porosa que se conservó una vez realizados los deslizamientos, esta textura es consecuente con lo reportado por Tanne y colaboradores.⁴⁷ Sin embargo, posterior a la prueba de fricción, se encontraron

algunos detritos depositados en el fondo de la ranura; de acuerdo con el análisis químico, estos detritos en su mayoría presentaron compuestos metálicos relacionados con el material del alambre de acero inoxidable, con el cual se hicieron los deslizamientos y algunos correspondientes al recubrimiento vítreo como lo muestra la figura 6. Diversos autores⁵⁰ sugieren que las manifestaciones de desgaste mecánico se ven como rayones presentes en los alambres y como desechos o fragmentos del alambre depositados en la ranura de los brackets, siendo la causa principal la abrasión entre los materiales. Además, la naturaleza de estos daños mecánicos es histerética*, lo cual significa que cada vez se va produciendo incremento mayor de los defectos. Saunders y colaboradores,⁵ Thorstenson y colaboradores,¹⁹ y Artículo y colaboradores,⁴⁶ reportan la presencia de partículas constituyentes de los alambres en la ranura de brackets cerámicos y metálicos luego de los deslizamientos.

Las imágenes de los alambres posteriores al deslizamiento dejan ver el alto grado de daño tanto en los alambres de acero inoxidable como en los alambres recubiertos, con patrones que semejan desgaste abrasivo, lo cual coincide con lo reportado por algunos investigadores;⁴⁵ sin embargo, los patrones de los defectos muestran direcciones diferentes. En los alambres de acero inoxidable se observa aumento significativo de los daños longitudinales y adicionalmente se observan rayones y defectos en forma de muescas, en sentido transversal, mientras que en los alambres recubiertos fue más evidente el incremento de defectos en sentido longitudinal, con muy pocos rayones transversales, causados por fracturas y desprendimiento del material, posiblemente debido a fallas en la adherencia al sustrato, como lo muestran las zonas de descascaramiento (figura 4l) o bien por el rayado ocasionado por las diferencias de dureza de los materiales. Como ha sido mencionado en algunas investigaciones, el desgaste por deslizamiento es caracterizado por rayones, muescas y descascaramiento de un material, cuando un material más duro es deslizado contra su superficie.⁴⁶

* Histeresis: de acuerdo con la R. A. E, corresponde a un fenómeno por el que el estado de un material depende de su historia previa. Se manifiesta por el retraso del efecto sobre la causa que lo produce. En este contexto hace referencia a la degradación en la superficie debida al rozamiento con un material más duro.

Los rayones y defectos de ambos grupos de alambres se atribuyen a la fuerza normal 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 esfuerzos en estos puntos aumenta la penetración del borde del bracket, cuya dureza es mayor que la del acero en el alambre y que el recubrimiento vítreo, lo cual puede generar los daños vistos sobre el alambre.^{3,44}

En la literatura se conocen tres fenómenos mecánicos que causan la resistencia al deslizamiento de un bracket a lo largo de un arco: la fricción clásica (FR), el binding (BI) y el notching (NO).⁴⁶ Sin embargo solo la fricción clásica interviene en el modelo pasivo, sin angulaciones, como el que se usó en la presente investigación. La razón para que se genere la fricción clásica depende de causas de tipo geométrico, así como de los materiales que intervienen en el deslizamiento.⁴⁵ La geometría incluye, entre otras, la forma y textura de la ranura, y el perímetro del bracket en los casos en que se liga al alambre con materiales elásticos.

En cuanto a la textura de la ranura del bracket, se ha reportado en varias investigaciones que superficies más rugosas generan mayor fricción; razón por la cual se dice que, en cualquier combinación, los brackets cerámicos al ser más rugosos producen mayor fricción que los brackets metálicos de acero inoxidable.^{6, 9, 43, 47, 48, 52} Esta diferencia ha sido claramente vista por algunos investigadores por medio de imágenes de microscopía electrónica de barrido.⁹ Adicionalmente sugieren que la superficie de la ranura debe ser lisa y pulida para prevenir el daño del alambre. Saunders y colaboradores⁵ y Tanne y colaboradores⁴⁷ mencionan que el mecanismo que causa el incremento en la fricción es la generación de rasguños o la acción de rayado del bracket cerámico rugoso, el cual remueve material del alambre como una lima lo haría a una pieza de madera.⁵ Otros autores como Kusy⁵³ reportan que la baja rugosidad superficial no es determinante del bajo coeficiente de fricción.^{44, 53}

Otra característica de importancia es la forma de la ranura y los bordes del bracket. Tanne y colaboradores⁴⁷ afirman que los bordes de los brackets cerámicos deben ser lisos y redondeados y no rectangulares y agudos, puesto que ello influye en la eficiencia

del movimiento dentario. Omana y colaboradores³ reportan que brackets con bordes más agudos producen surcos o ranuras en el alambre que finalmente incrementan la resistencia friccional afirmando que los bordes agudos de los brackets cerámicos podrían hundirse dentro del material del alambre más blando e incrementar la fricción.^{3, 5}

Con respecto al perímetro del bracket en el caso del ligado por medio de materiales elásticos, investigadores como Frank y Nikolai¹⁷ y Kapila y colaboradores¹⁸ han demostrado incremento en la fricción con brackets más grandes. Por tanto se menciona que la fuerza normal se ve constantemente influenciada por los cambios dimensionales de las partes que intervienen.⁷

Con respecto a los materiales, la diferencia relativa de dureza entre bracket-alambre podría causar incremento en la resistencia friccional. Algunos autores han atribuido a las variaciones de dureza, las principales diferencias en la resistencia friccional.^{5,43} Saunders y colaboradores⁵ afirman que el zafiro, por ser un material más duro y rígido que los metales, desprende el material del metal cuando el arco de alambre entra a la ranura del bracket.

CONCLUSIONES

El grupo de alambres control presentó menor fuerza de fricción estática y dinámica en comparación con el grupo de alambres con recubrimiento vítreo por la técnica Sol-Gel cuando se deslizan sobre brackets de zafiro monocristalino.

El recubrimiento vítreo cerámico aplicado por la técnica Sol-Gel no presenta buena adherencia a un sustrato de acero AISI 304 cuando es sometido a fuerzas de fricción en mecánicas ortodóncicas.

El recubrimiento vítreo por la técnica Sol-Gel empleada en esta investigación para el uso en ortodoncia, no contribuye a la disminución de la fuerza de fricción cuando se desliza sobre brackets cerámicos de zafiro monocristalino.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Dickson J, Jones S. Frictional characteristics of a modified ceramic bracket. *J Clin Orthod* 1996; 30(9): 516-518.

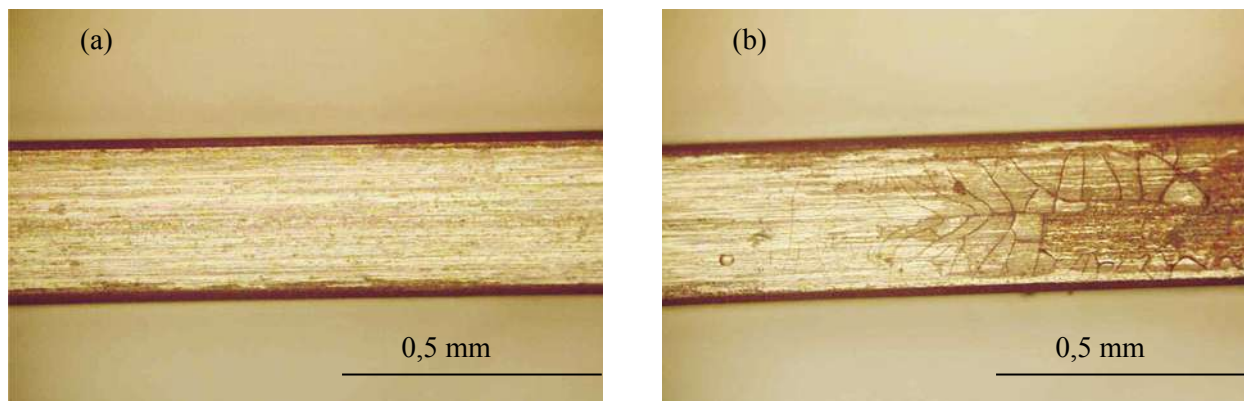
2. Bordeaux JM, Moore RN, Bagby MD. Comparative evaluation of ceramic bracket base designs. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1994; 105(6): 552-560.
3. Omana HM, Moore RN, Bagby MD. Frictional properties of metal and ceramic brackets. *J Clin Orthod* 1992; 26(7): 425-432.
4. Kusy RP, Whitley JQ. Frictional resistances of metal-lined ceramic brackets versus conventional stainless steel brackets and development of 3-D friction maps. *Angle Orthod* 2001; 71(5): 364-374.
5. Saunders CR, Kusy RP. Surface topography and frictional characteristics of ceramic brackets. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1994; 106(1): 76-87.
6. Angolkar PV, Kapila S, Duncanson MG, Nanda RS. Evaluation of friction between ceramic brackets and orthodontic wires of four alloys. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1990; 98(6): 499-506.
7. 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(4): 300-312.
8. Drescher D, Bourauel C, Schumacher HA. Frictional forces between bracket and arch wire. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1989; 96(5): 397-404.
9. Pratten DH, Popli K, Germane N, Gunsolley JC. Frictional resistance of ceramic and stainless steel orthodontic brackets. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1990; 98(5): 398-403.
10. Kusy RP, Whitley JQ. Friction between different wire-bracket configurations and materials. *Semin Orthod* 1997; 3(3): 166-177.
11. Hain M, Dhoptakar A, Rock P. The effect of ligation method on friction in sliding mechanics. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003; 123(4): 416-422.
12. De Franco DJ, Spiller RE Jr, von Fraunhofer JA. Frictional resistances using Teflon-coated ligatures with various bracket-archwire combinations. *Angle Orthod* 1995; 65(1): 63-74.
13. Griffiths H, Sherriff M, Ireland AJ. Resistance to sliding with 3 types of elastomeric modules. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2005; 127(6): 670-675.
14. Redlich M, Mayer Y, Harari D, Lewinstein I. In vitro study of frictional forces during sliding mechanics of "reduced friction" brackets. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003; 124(1): 69-73.
15. Shivapuja PK, Berger J. A comparative study of conventional ligation and self-ligation bracket systems. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1994; 106(5): 472-480.
16. 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(5): 589-596.
17. Frank CA, Nikolai RJ. A comparative study of frictional resistances between orthodontic brackets and arch wire. *Am J Orthod* 1980; 78(6): 593-609.
18. Kapila S, Angolkar PV, Duncanson MG, Nanda RS. Evaluation of friction between edgewise stainless steel brackets and orthodontic wires of four alloys. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1990; 98(2): 117-126.
19. Thorstenson GA, Kusy RP. Comparison of resistance to sliding between different self-ligating brackets with second-order angulation in the dry and saliva states. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2002; 121(5): 472-482.
20. 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(3): 295-305.
21. Kusy RP. Influence of binding of third-order torque to second order angulation. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2004; 125(6): 726-732.
22. 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(1): 71-80.
23. Stannard JG, Gau JM, Hanna MA. Comparative friction of orthodontic wires under dry and wet conditions. *Am J Orthod* 1986; 89(6): 485-491.
24. Baker KL, Nieberg LG, Weimer AD, Hanna M. Frictional changes in force values caused by saliva substitution. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1987; 91(4): 316-320.
25. Willems G, Clocheret K, Celis JP, Verbeke G, Carels C, Chatzicharalampous E. Frictional behavior of stainless steel bracket - wire combinations subjected to small oscillating displacements. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2001; 120(4): 371-377.
26. Tidy DC. Frictional forces in fixed appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1989; 96(3): 249-254.
27. Kusy RP, Saunders CR, Whitley JQ. Mejoramiento de la mecánica de los arcos mediante química de superficie. En: Nanda R. *Biomecánica en ortodoncia clínica*. Argentina: Panamericana; 1998. p. 45-57.
28. Mendes K, Rossouw P. Friction: Validation of manufacturer's claim. *Semin Orthod* 2003; 9(4): 236-250.
29. Sioshansi P. Tailoring surface properties by ion implantation. *Materials Engineering* 1987; 90: 19-23.
30. Kusy RP, Andrews SW. Tribological properties of ion implanted model orthodontic appliances. En: Spalvins T, Kovacs WL. *Ion nitriding and ion carburizing*. Ohio: ASM International; 1991. p. 119-129.
31. Kusy RP, Tobin EJ, Whitley JQ. Frictional coefficients of ion-implanted alumina against ion-implanted beta-titanium in the low load, low velocity, single pass regime. *Dent Mater* 1992; 8(3): 167-172.
32. Abad PJ. Tratamientos superficiales y recubrimientos. *Cuad de Cerám y Vit* 1999; 8: 11-18.

33. Galliano P, De Damborenea JJ, Pascual MJ, Durán A. Sol-Gel coatings on 316L steel for clinical applications. *J Sol-Gel Sci Techn* 1998; 13(1-3): 723-727.
34. Kokubo T. Recent progress in glass-based materials for biomedical applications. *J Ceram Soc Jpn* 1991; 99: 937-944.
35. Morales J, Rodríguez R. Recubrimiento con hidroxiapatita de implantes dentales mediante técnicas de precipitación. *Cuad de Cerám y Vit* 1999; 8: 19-31.
36. Gallardo J. Materiales obtenidos por Sol-Gel para cirugía ortopédica. [Tesis doctoral]. Argentina: Universidad Nacional Mar del Plata; 1999.
37. Villegas MA. Preparación de materiales por el procedimiento Sol-Gel. *Unicauca Ciencia* 1998; 3: 73-93.
38. Gallardo J, Galliano P, Moreno R, Durán A. Bioactive Sol-Gel coatings for orthopaedic prosthesis. *J Sol-Gel Sci Techn* 2000; 19(1-3): 107 -111.
39. García C, Durán A, Moreno R. Stability of suspensions of bio-active particles using hybrid organic-Inorganic solutions as dispersing media. *J Sol-Gel Sci Techn* 2005; 34(3): 211-217.
40. García C. Bioactivación de metales de uso ortopédico mediante recubrimientos producidos por Sol-Gel. [Tesis Doctoral]. España: Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Ciencias; 2004.
41. Scherer GW. Sintering of Sol-gel Films. *J Sol-Gel Sci Techn* 1997; 8(1-3): 353-363.
42. Ireland AJ, Sheriff M, McDonald F. Effect of bracket and wire composition on frictional. *Eur J Orthod* 1991; 13(4): 322-328.
43. Karamouzos A, Athanasios AE, Papadopoulos MA. Clinical characteristics and properties of ceramic brackets: a comprehensive review. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1997; 112(1): 34-40.
44. Sadique SE, Ramakrishna S, Batchelor AW, Bing CH. In vitro frictional behavior and wear patterns between contemporary and aesthetic composite orthodontic brackets and archwires. *Wear* 2006; 261(10): 1121-1139.
45. Zufall SW, Kusy RP. Sliding mechanics of coated composite wires and the development of an engineering model for binding. *Angle Orthod* 2000; 70(1): 71-80.
46. 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(4): 409-425.
47. Tanne K, Matsubara S, Hotei Y, Sakuda M, Yoshida M. Frictional forces and surface topography of a new ceramic bracket. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1994; 106(3): 273-278.
48. Bednar JR, Gruendeman GW, Sandwich JL. A comparative study of frictional forces between orthodontic brackets and arch wires. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1991; 100(6): 513-522.
49. Martínez F. La tribología: ciencia y técnica para el mantenimiento. México: Limusa; 1997.
50. Uribe JA, Wilches LV, Toro A. Corrosión-desgaste en materiales usados para la construcción de implantes de juntas articulares. [Trabajo de grado]. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas; 2004.
51. Kusy RP, Whitley JQ. Effects of sliding velocity on the coefficients of friction in a model orthodontic system. *Dent Mater* 1989; 5(4): 235-240.
52. Tselepis M, Brockhurst M, West VC. The dynamic frictional resistance between orthodontic brackets and arch wires. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1994; 106(2): 131-138.
53. Kusy RP. Commentary: Ceramic brackets. *Angle Orthod* 1991; 61(4): 291-292.

ANEXOS

Figura 1

Inspección por microscopía óptica. (a) Se observa una microfotografía de un recubrimiento homogéneo y libre de defectos; (b) se observa un alambre que fue excluido del estudio por la presencia de grietas y microdefectos

**Figura 2**

Gráficas características de la fuerza de resistencia friccional [N] vs. distancia [mm]. A. Grupo de alambres control de acero inoxidable, B. Grupo de alambres recubiertos por Sol-Gel deslizados sobre brackets cerámicos

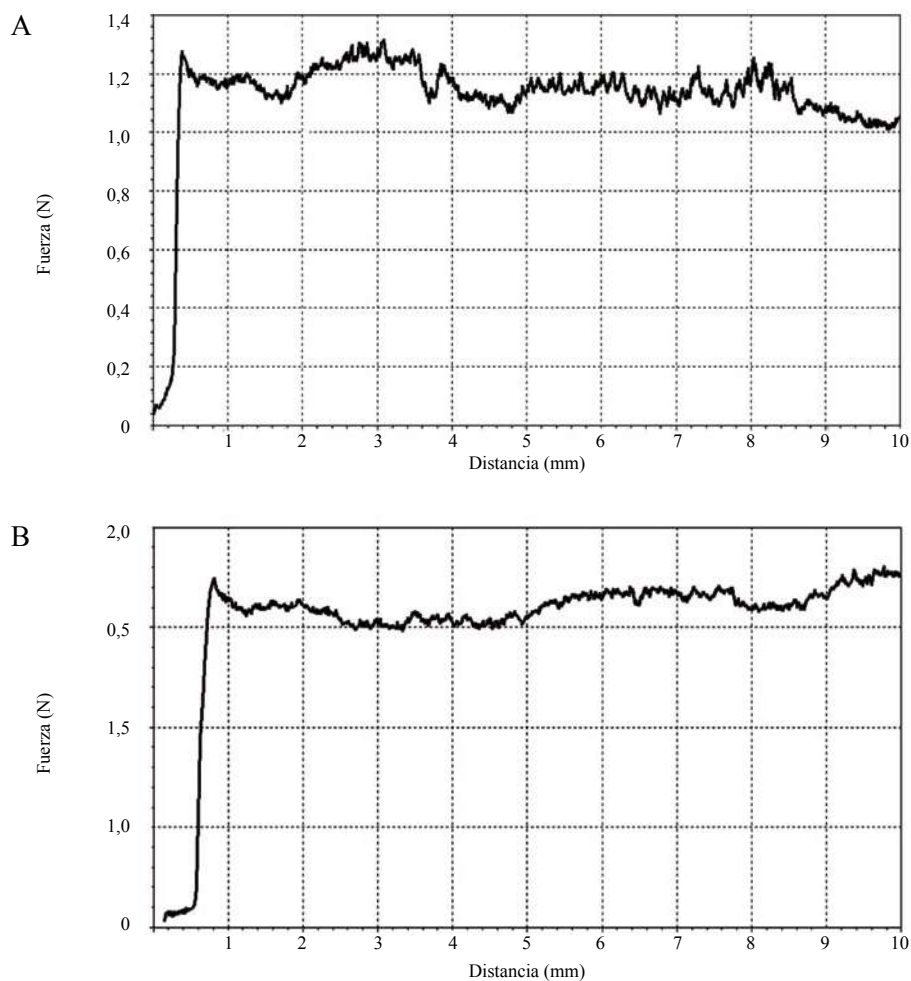


Figura 3

Caracterización superficial por microscopía óptica de los alambres y los brackets. Alambres del grupo control antes (a) y después de las pruebas de desgaste y fractura del recubrimiento; (b) Superficie pareja y regular en el fondo de la ranura de los brackets nuevos; (g) alambre y transversal, desgaste y fractura del recubrimiento; (e) Superficie pareja y regular en el fondo de la ranura de los brackets nuevos; (f y h) partículas de detritos encontradas en el fondo de la ranura después del deslizamiento

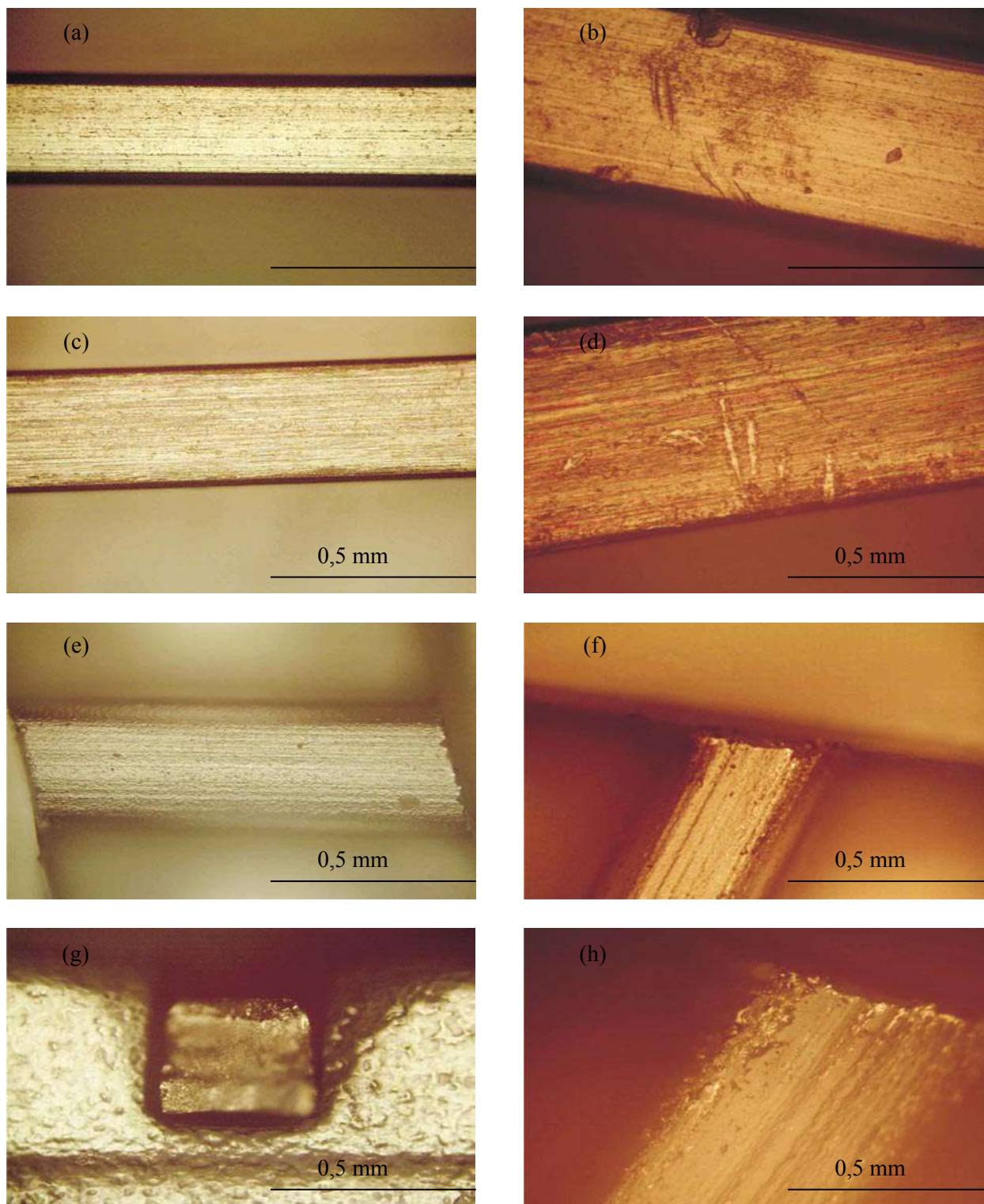
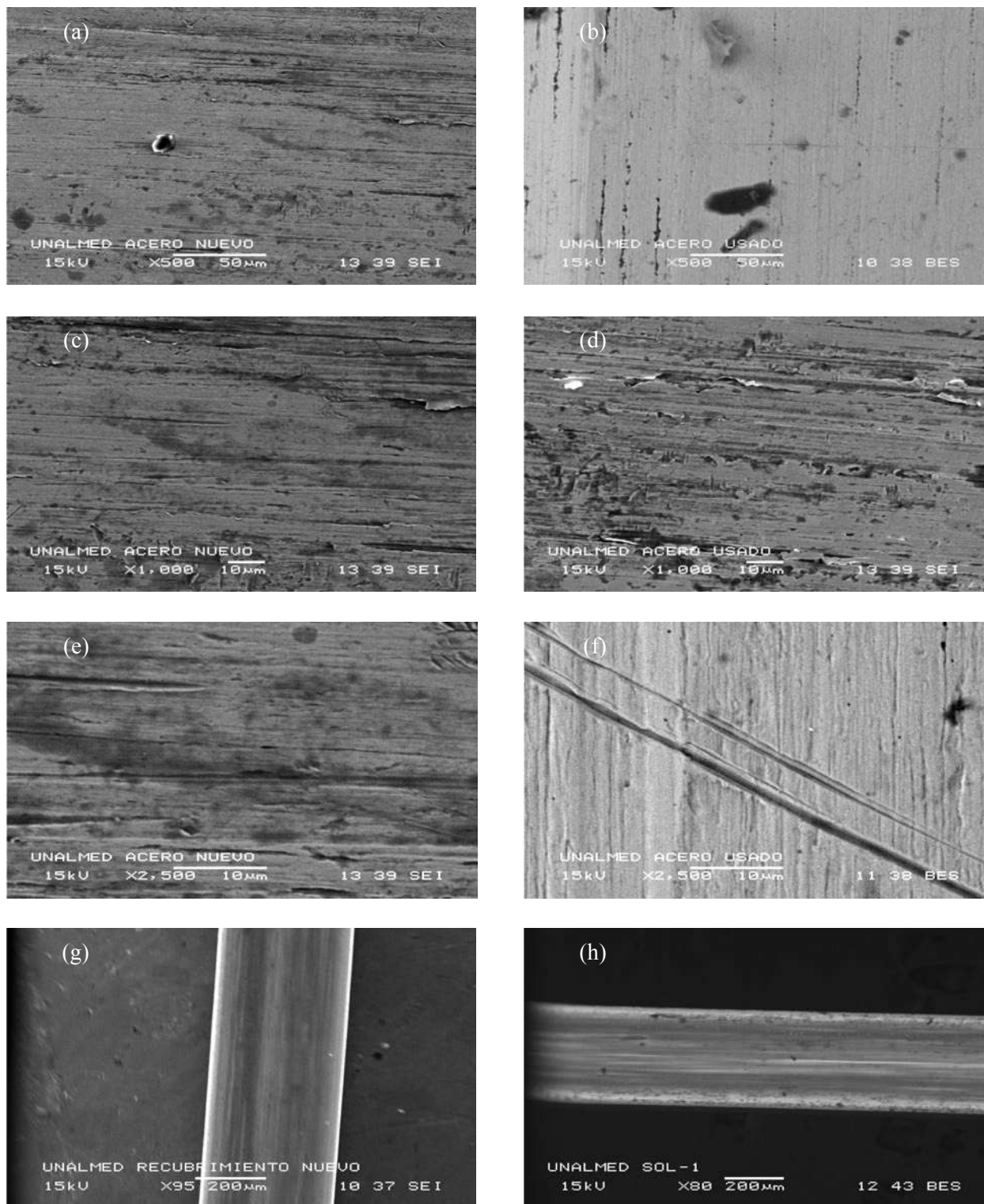


Figura 4

Imágenes por microscopia electronica de barrido de los alambres antes y después de los ensayos de fricción. Alambres del grupo control antes (a, c, e) y después de las pruebas de fricción (b, d, f) donde se observa el aumento en el número de defectos presentes; alambres recubiertos antes (g, i, k) y después de las pruebas de fricción (h, j, l), con aumento en los defectos como rayones, desgaste, fractura y desprendimiento del recubrimiento



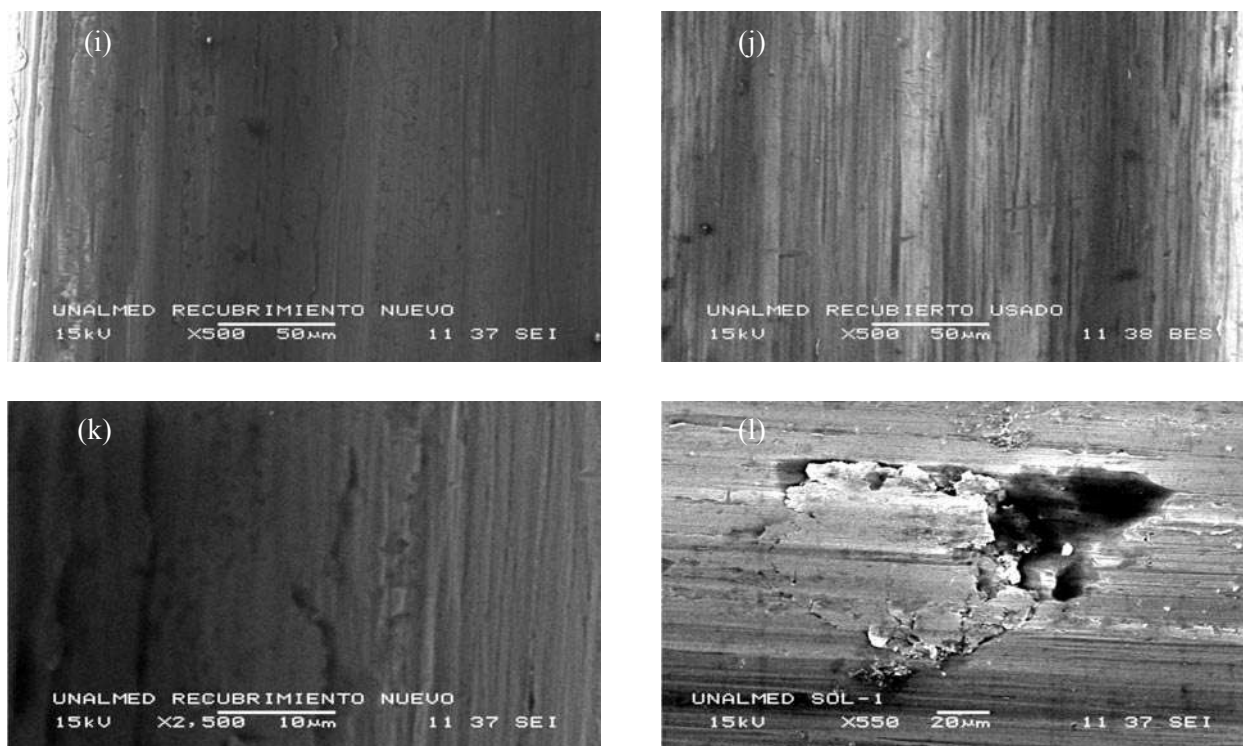


Figura 5

Imágen ☐
 Brackets antes (a ☐
 presentan en ☐

cortes y elementos adheridos a la superficie

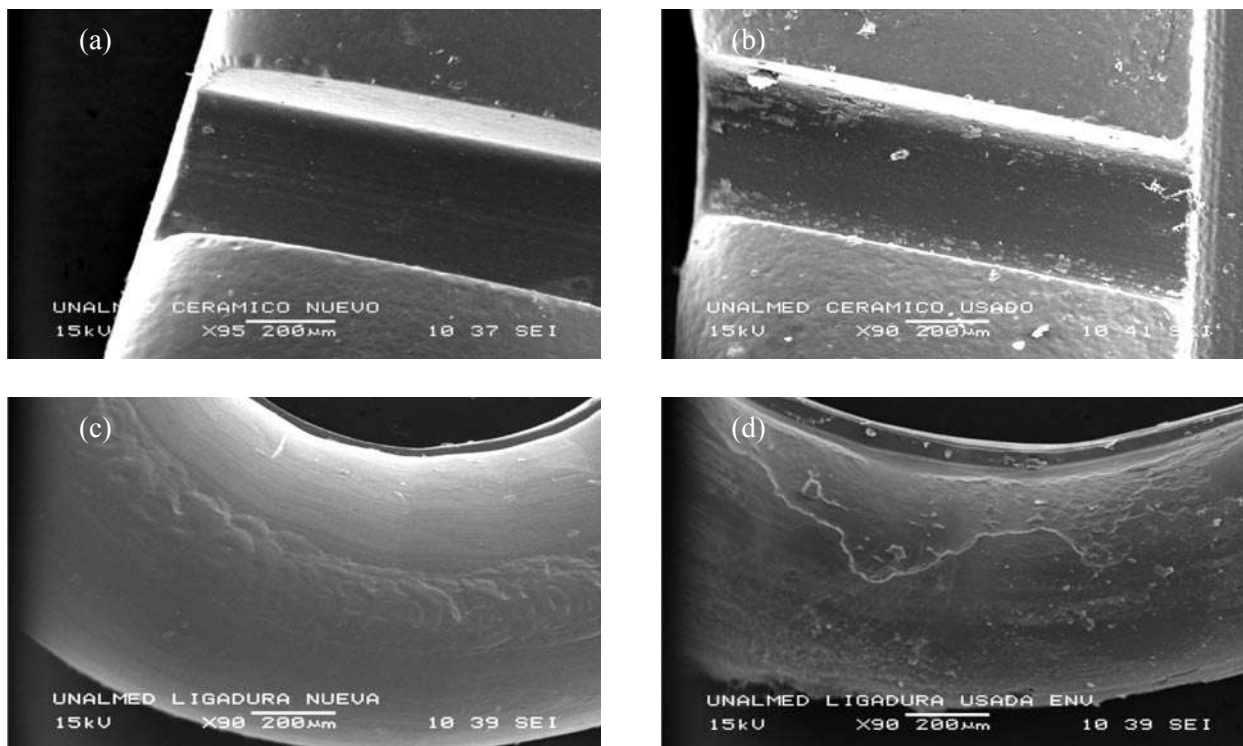


Figura 6
Análisis químico de los detritos ubicados en el fondo de la ranura de los brackets

