



Evaluación del desgaste de prótesis cerámicas de cadera recubiertas con DLC por triboadhesión parte II – pruebas de depósito y desgaste

J. M. Rodríguez Lelis,* W. E. Sosa G.,* Mario Ciénega Ramos**

* Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Departamento de Ingeniería Mecánica – Tribología.

** Director de Educación Médica e Investigación en Salud.

Correspondencia:

J. M. Rodríguez Lelis

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Departamento de Ingeniería Mecánica - Tribología Interior Internado Palmira s/n, Col. Palmira, Apartado Postal 5-164 Cuernavaca, Morelos jmlelis@cenidet.edu.mx

Artículo recibido: 22/septiembre/2005

Artículo aceptado: 12/mayo/2006

RESUMEN

En este artículo se presentan los resultados de depósito de DLC, diamante tipo carbón, en la componente femoral de una prótesis de cadera fabricada de óxido de aluminio (Al_2O_3). El depósito por triboadhesión se realizó con el dispositivo diseñado por los autores. Asimismo, se muestran los resultados de la resistencia al desgaste de prótesis con y sin recubrimiento. La resistencia al desgaste se evaluó a través de señales de vibración. Los resultados muestran que las prótesis recubiertas por el proceso de triboadhesión tienen una resistencia superior al desgaste que aquella que no posee recubrimiento.

Palabras clave:

Recubrimiento, triboadhesión, prótesis de cadera, desgaste.

ABSTRACT

In this paper, the results of coating a aluminum oxide (Al_2O_3) femoral head of a hip prosthesis with DLC, diamond like carbon, are presented. The triboadhesion coating process was carried out with the device designed by the authors. Here are also shown the wearing tests of femoral head with and without coating. The wear resistance was evaluated through vibration signal analysis. The results shown that the prosthesis coated by the triboadhesion process exhibit a higher wear resistance that the one without coating.

Key Words:

Coating, Triboadhesion, Hip prosthesis, Wear.

INTRODUCCIÓN

Se conoce que aproximadamente un setenta por ciento de las personas de setenta años o mayores presentan alguna forma de artrosis. Esta enfermedad produce rigidez en la articulación, limita su movimiento y causa mucho dolor. La solución final a este tipo de enfermedad es el reemplazo total de la articulación cuya vida útil en promedio no llega a los diez años, y tan sólo en la Unidad Médica de Alta Especialidad Hospital de Ortopedia y Trauma-

tología "Lomas Verdes" (México), genera una derrama económica de 22 millones de pesos anuales, correspondiendo 7 millones a recambio protésicos por diversas causas. La causa principal de la baja duración de estas prótesis se atribuye a la tasa de desgaste, la cual a su vez, también es la causa principal del aflojamiento (aséptico o séptico) del implante y su subsiguiente falla¹.

En el desarrollo de prótesis, la reducción del desgaste es de suma importancia. Como lo describen Erdemir et al² la combinación de los conocimientos

en tribología aportan elementos necesarios para el desarrollo adecuado de los pares de contacto. Una parte importante de la tribología, es buscar la forma de reducir los efectos de fricción y desgaste en los elementos mecánicos, y así aumentar la vida útil de dichos elementos. Asimismo, investigar y analizar los fenómenos que intervienen en el proceso de fricción y desgaste.

En 1973 J. Gansheimer y R. Holinki³ realizaron una serie de experimentos con MoS₂ agregando en 3% en peso un aceite mineral y grasa de aceite mineral base litio, ello con el objetivo de determinar el comportamiento del MoS₂ como aditivo. Del análisis, observaron que bajo condiciones de fricción moderada se formaba una película de MoS₂ sobre la superficie del metal, sin embargo, bajo condiciones severas el MoS₂ reaccionaba químicamente, difundándose el disulfuro de molibdeno en el interior de la superficie del acero; formando componentes metálicos y carburos, lo que mejoró la calidad de la superficie del acero.

Desde 1997 en *Cenidet* con base en la propuesta de Ernst Nagy, se realizan investigaciones sobre la deposición de superficies planas por triboadhesión. Para fines del 2000, J.M. Rodríguez⁴, presenta resultados de deposición en cobre, aluminio y acero para rodamientos, usando diamante sintético o DLC, como material de aporte. Demostró que profundidades de hasta 30 micras de depósito pueden alcanzarse por esta técnica. Asimismo, se realizaron pruebas de desgaste, siendo notorio en el caso de aluminio donde el incremento de la resistencia al desgaste es tres veces la del material base. Asimismo, se realizaron pruebas en rodamientos obteniendo una duración máxima del 307%⁵.

Con base en lo anterior, en este artículo se presentan los resultados de depósito y desgaste, realizados en el dispositivo para el mismo propósito diseñado y construido por los autores. Aquí se realizaron depósito con DLC, sólo en la cabeza femoral de dos prótesis y una se mantuvo sin recubrimiento, como muestra de referencia.

PROCESO DE DEPOSICIÓN

En la Figura 1 se muestra el dispositivo utilizado en este trabajo. Éste consta de: (1) Sistema de rotación de la fresa de deposición y medición de carga; (2) Sistema de alimentación de polvos y (3) Sistema de adquisición de datos. Durante el proceso de fricción de la fresa con el sustrato, de acuerdo con Rabinowicz⁶ pueden alcanzarse temperaturas hasta de 3,000°C, en un espacio del orden de mi-

cras y menores. La temperatura superficial θ que se alcanza durante el proceso e triboadhesión es:⁴

$$\frac{(1) \dot{Q}}{(r^3 K C_p v)^2} \frac{1}{2} \quad (1)$$

En que C_p = es el calor específico del material base; K = conductividad de calor; n = velocidad relativa entre las superficies en contacto; λ = función de partición de calor; Q = calor generado por fricción; r = radio de contacto y \dot{n} = densidad del material base.

En función de las temperaturas generadas en la interfase durante el proceso de deposición, las cavidades en el material base se generan y destruyen mediante fluctuaciones estadísticas. La población de cavidades en estado estable, en forma estadística se puede caracterizar mediante la función de distribución de Boltzman.

$$N_C = N \exp \left(- \frac{G_T^*}{K T} \right) \quad (2)$$

donde T es la temperatura, N y N_C son el número de átomos y el número de cavidades por unidad de volumen respectivamente, G_T^* es la energía libre de formación de la cavidad y K es la constante de Boltzman.

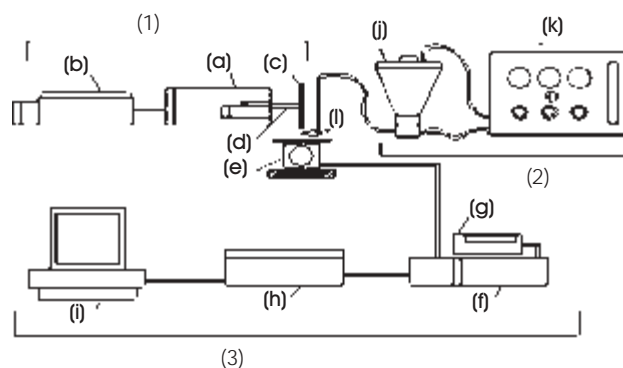


Figura 1. 1. Sistema de rotación de la fresa y medición de carga: (a) motor de alta velocidad, (b) control de velocidad, (c) fresa de deposición, (d) celda de carga, (e) soporte de dos grados de libertad de la prótesis; 2. Sistema de alimentación de polvos: (j) dosificador de partículas, (k) control neumático, y (l) tobera; 3. Sistema de adquisición de datos: (f) amplificador, (g) medidor de voltaje, (h) analizador de señales, (i) computadora personal.

La energía libre es una función del radio de contacto, las energías de adhesión, energías de superficie y dureza del material. Con base en estas ecuaciones se determinan los radios de las parti-

culas que quedarán inmersas en el material base, el número probable de estas partículas y la profundidad que se puede lograr. Esto naturalmente para las propiedades físicas del material base que se utilice.

Cuadro 1. Clasificación de las cabezas femorales como función del tiempo de recubrimiento.

Cabeza femoral (CF)	Tiempo de recubrimiento [segundos]
1	90
2	160
3	0

DEPOSICIÓN POR TRIBOADHESIÓN EN PRÓTESIS DE CADERA

En este trabajo se utilizaron prótesis tipo Charnley, Centerpulse, con una cabeza femoral de 32 mm de diámetro. La cabeza femoral es fabricada de Al_2O_3 y la copa acetabular de polietileno de ultra alta densidad. El material de aporte es diamante

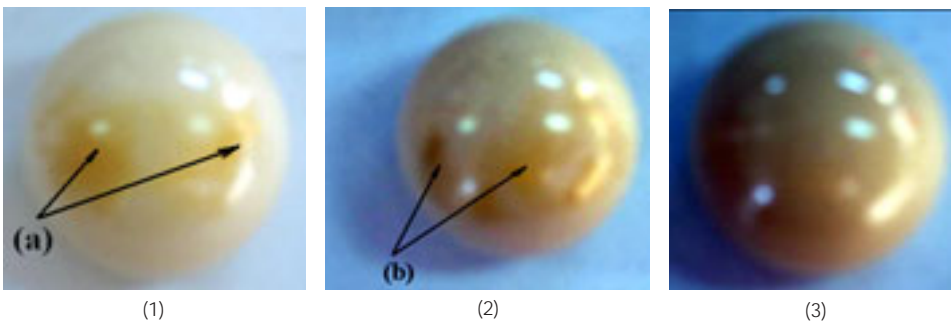


Figura 2. Cabezas femorales, (1) con recubrimiento a 90 segundos, (2) con recubrimiento a 160 y (3) sin recubrimiento.

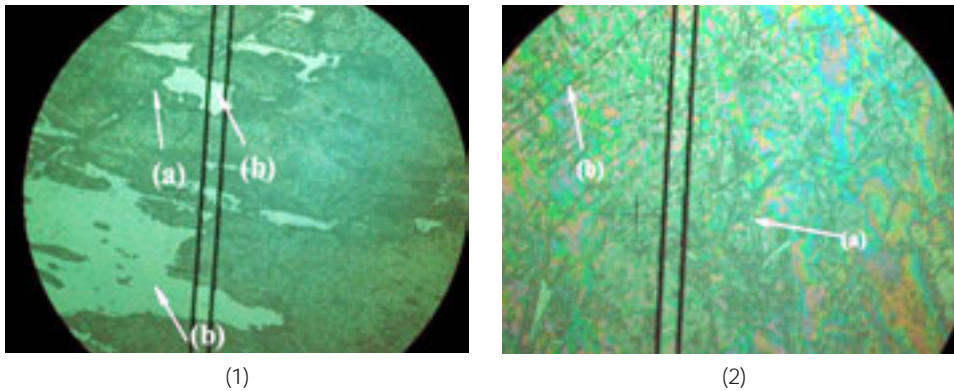


Figura 3. Fotografías de las zonas de contacto a 100X de las cabezas femorales después del proceso de desgaste a: (1) 90 segundos y (2) 160 segundos.

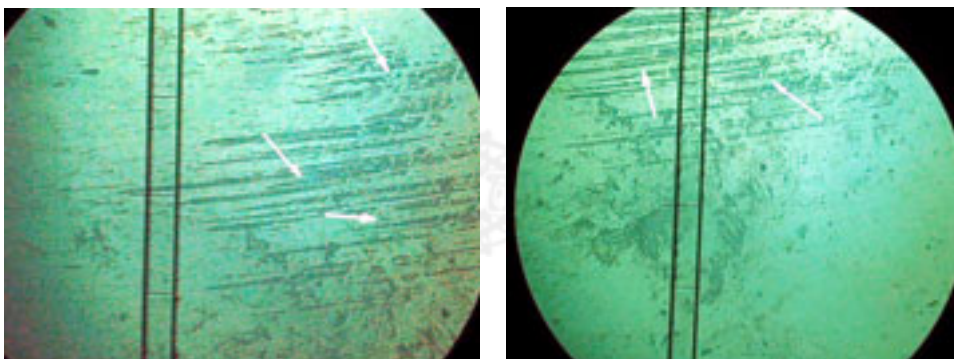


Figura 4. Fotografías de las zonas de contacto a 100X de las cabezas femorales sin recubrimiento después del proceso de desgaste.

tipo carbón (DLC) con un diámetro de partículas que oscila entre 1 y 10 micras.

Para las pruebas realizadas en este trabajo, se realizó el recubrimiento en dos cabezas femorales y una se mantuvo sin recubrimiento para que

actuara como testigo de comparación. La velocidad promedio que se empleó es de 1,200 rpm, y una carga de 0.45 N. Con el fin de distinguir el efecto del espesor del recubrimiento, las cabezas femorales se recubrieron por tiempos diferentes. Los tiempos y clasificación se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 2. Condiciones de desgaste.

Prótesis	Frecuencia Hz	Carga N	Tiempo h
1	2	5,000	32
2	2	5,000	32
3	2	5,000	32

ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ÓPTICA

En la Figura 2, se muestra una fotografía de las cabezas femorales después del proceso de recubrimiento con triboadhesión y la cabeza femoral de referencia a la que no se le aplicó recubri-

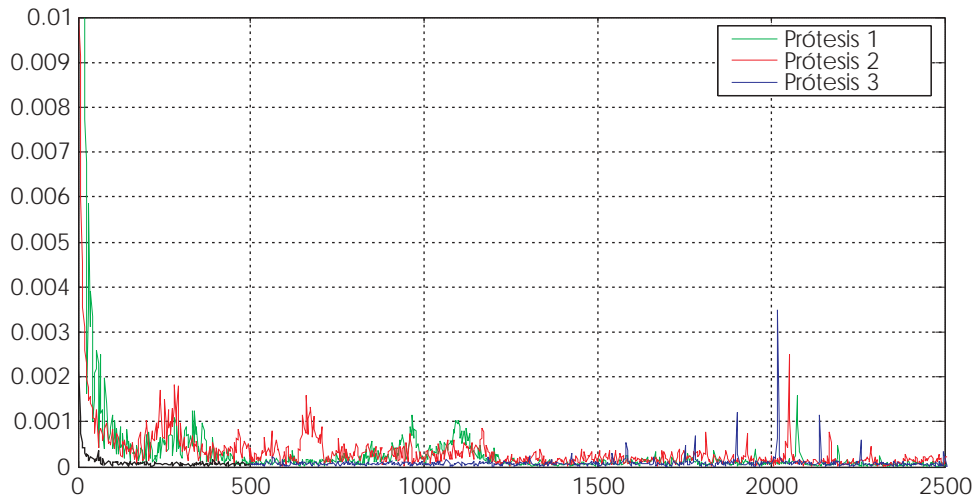


Figura 5. Espectro de vibración de la zona de baja frecuencia.

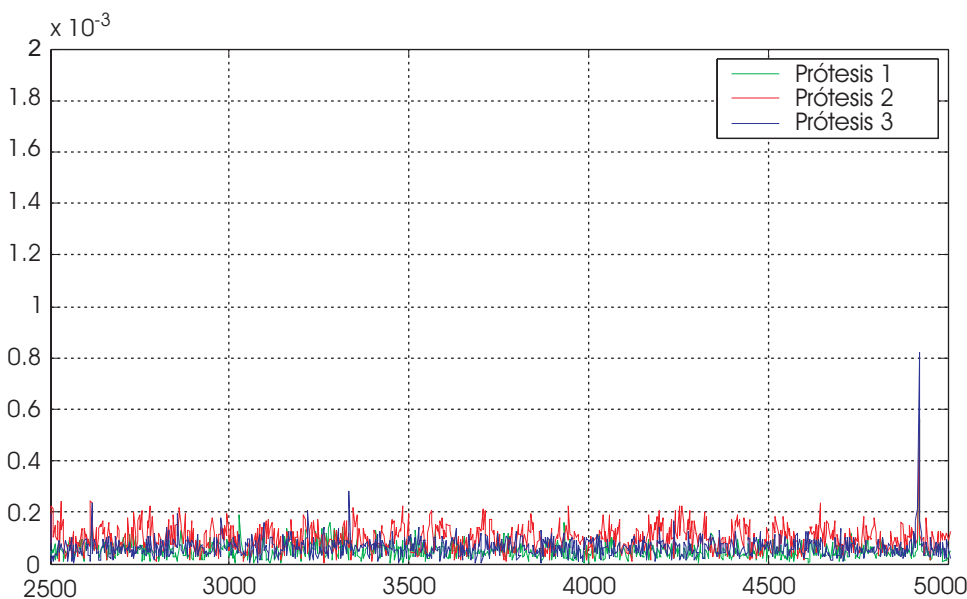


Figura 6. Espectro de vibración de la zona de media frecuencia.

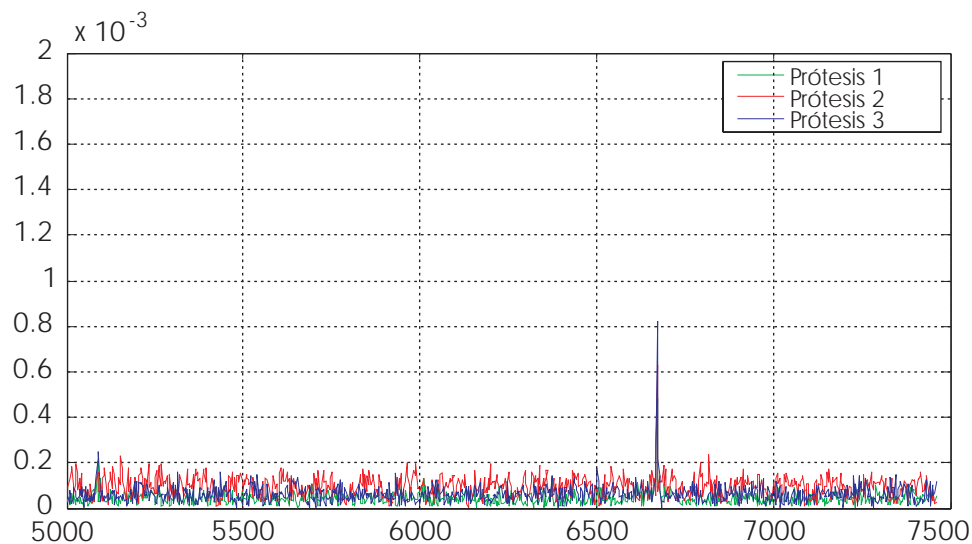


Figura 7. Espectro de vibración de la zona de alta frecuencia.

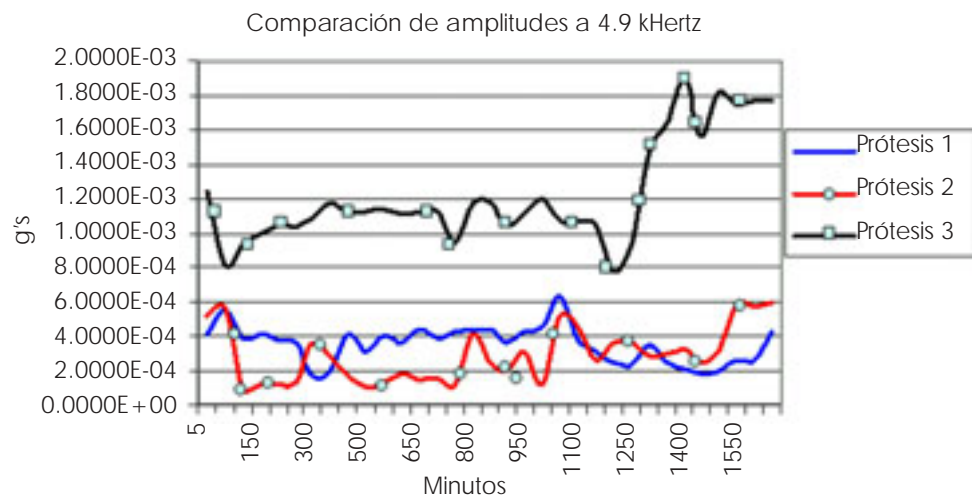


Figura 8. Evolución en el tiempo de la amplitud de vibración de la armónica a 4.9 kHz.

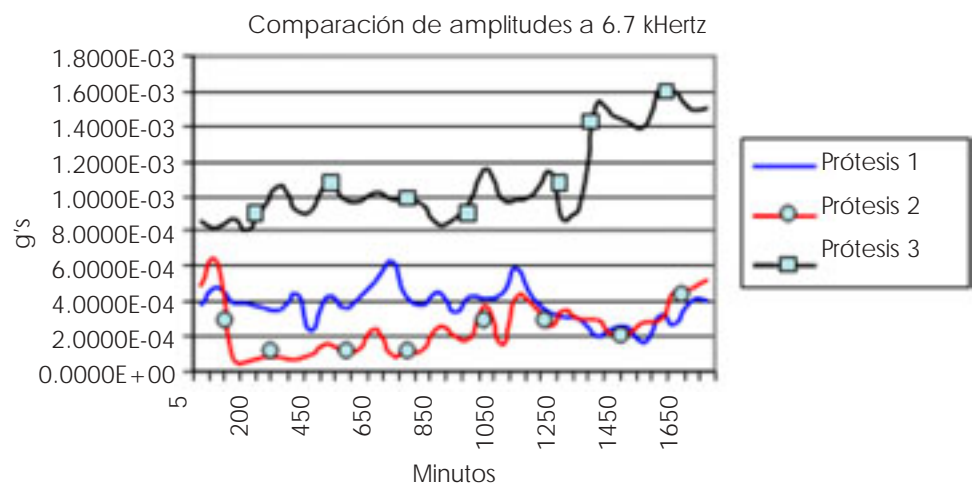


Figura 9. Evolución en el tiempo de la amplitud de vibración de la armónica a 6.7 kHz.

miento. En las cabezas recubiertas se aprecia una coloración amarilla, pero no se observa que a causa del proceso exista algún daño en las superficies, condición que concuerda con los resultados presentados en trabajos anteriores^{4,5}.

Una vista de las cabezas femorales después del proceso de desgaste se muestra en las Figuras 3 y 4. Aquí el efecto de rayado se puntualiza con flechas en cada una de las figuras. De estas figuras puede observarse que, en el caso de la cabeza femoral con recubrimiento a 160 segundos, se observa que el rayado y desprendimiento del recubrimiento son menores que en aquella que se recubrió por 90 segundos. Esta última aunque presenta pequeñas marcas, aún mantiene el recubrimiento. Por otro lado, en la cabeza femoral que sirvió como referencia, las marcas de desgaste son más visibles y profundas.

EVALUACIÓN DEL DESGASTE

El proceso de desgaste, se llevó a cabo en un simulador de cadera diseñado de acuerdo con la Norma ISO14242-1⁷. En el Cuadro 2, se presentan las condiciones de desgaste en el simulador.

La comparación de la resistencia al desgaste de las prótesis con y sin recubrimiento, se llevó a cabo mediante el análisis de los espectros de vibración. De acuerdo a Barkov A. y Barkova N.⁸ los rodamientos pueden generar vibración a causa de seis tipos de fuerzas dinámicas. Además, los componentes de vibración aleatoria que se generan simultáneamente por las fuerzas de fricción a frecuencias superiores a los 30 kHz, son de amplitud baja en comparación con los componentes de vibración aleatoria presentes generalmente en el intervalo de 2kHz – 10 kHz. Los pulsos de choque que se generan por el impacto de metal-a-metal se presentan en el intervalo de 1 a 10 kHz⁹. Por otra parte Taylor J. I.¹⁰ utiliza el análisis de espectros para identificar defectos en rodamientos en el intervalo de 0 a 2,000 Hz.

En las Figuras 5, 6, y 7, se muestra la comparación de los espectros de vibración en las zonas de baja, media y alta frecuencia al inicio del proceso de desgaste de cada una de las prótesis. En la zona de baja frecuencia, (Figura 5), las tres prótesis presentan armónicas en el intervalo de 2 a 2.5 kHz. Por otra parte, en las zonas de media y alta frecuencia, (Figuras 6 y 7), la prótesis sin recubrimiento, presenta armónicas en 4.9 y 6.7 kHz respectivamente. Los espectros de vibración correspondientes a las Figuras 5, 6 y 7, se tomaron como referencia para

la comparación de la evolución de las armónicas en tiempo.

EVOLUCIÓN DE LAS AMPLITUDES DE VIBRACIÓN

Del análisis de los espectros de vibración se concluyó que las armónicas relacionadas con el problema de contacto durante el proceso de desgaste se localizan a 4.9 kHz y 6.7 kHz. Con esto en mente, la evolución en tiempo de estas armónicas se presenta en las Figuras 8 y 9.

De las Figuras 8 y 9, se puede apreciar que la prótesis sin recubrimiento, prótesis 3, presenta una amplitud de vibración mayor desde el inicio de la prueba de desgaste en comparación con las prótesis con recubrimiento. Aproximadamente a 1,250 minutos de la prueba, se aprecia un incremento en la amplitud de vibración, la que se atribuye al rompimiento de la superficie de la cabeza femoral por fatiga durante el proceso de desgaste. Las prótesis 1 y 2, en cambio, presentan una amplitud de vibración constante, de las cuales la amplitud mayor corresponde a la cabeza femoral recubierta por 160 segundos. Esta vibración constante durante la prueba, muestra que no existe daño aparente en las superficies de las cabezas femorales con recubrimiento.

CONCLUSIONES

Se recubrió por el proceso de triboadhesión prótesis de cadera tipo Charnley, con DLC. La cabeza femoral de las prótesis utilizadas es de óxido de aluminio Al_2O_3 y en este trabajo se mostró que la prótesis sin recubrimiento presenta ralladuras más severas. Esto puede atribuirse al coeficiente de fricción menor del DLC y a la dureza mayor del mismo. También, se demostró mediante el análisis de las señales dinámicas de la prueba de desgaste que, las prótesis recubiertas con DLC presentan una amplitud de vibración menor que aquella sin recubrimiento, y que el momento de ruptura de la superficie se presenta en esta última primero. La consecuencia de estas mediciones muestra que las prótesis recubiertas tienen una resistencia al desgaste superior a la de tipo cerámico empleada en el estudio, la cual se estima en un 300%.

En general, los resultados de este trabajo, demuestran que el recubrimiento con DLC por el proceso de triboadhesión es capaz de mejorar las propiedades tribológicas del par "cabeza femoral - copa acetabular" de prótesis de cadera.

BIBLIOGRAFÍA

1. Oransky I, Sinha RK, Peris M. The effects of osteolysis and aseptic loosening. *Medscape Orthopaedics & Sports Medicine Journal* 2001; 5(1).
2. Erdemir A, Nichols FA, Fenske GR, Hsieh J. H. Sliding friction and wear of ceramics with and without soft metallic films. *MRS Bulletin*, October 1991: 49-53.
3. Gansheimer J, Holinki YR. Molybdenum disulfide in oils and greases under boundary conditions. (In: *Transactions of the ASTM*, April 1973) pp. 242-247.
4. Rodríguez LJM, Colin OJ, Calderón J, Robles J. Deposition of diamond in cooper by triboadhesion. *ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 125, 2003, ISSN 1087-1357, pp. 628-630.
5. Rodríguez LJM et al. An evaluation to wear resistance of ball bearings coated with diamond by triboadhesion. 59th STLE Annual Meeting, Toronto, Ontario Canada, 2004: 17-20.
6. Rabinowicz E. *The friction and wear of materials*. Wiley, New York. 1965.
7. Calonijs O, Saikko V. Analysis of relative motion between femoral head and acetabular cup and advances in computation of the wear factor for the prosthetic hip joint. 3rd International Conferences on Advanced Engineering Design (AED2003). 1-4 Jun 2003, Prague, Czech Republic.
8. Barkov A, Barkova N. Condition assessment and life prediction of rolling element bearings – Part 1. [Fecha de consulta: 18 de Septiembre de 2002]. Disponible en: www.vibanalysis.co.uk.
9. Wovk V. *Machinery vibration: measurement and analysis*. (USA: McGraw-Hill, © 1991) 356 p.
10. Taylor JI. Identification of bearing defects by spectral analysis. (In: *Journal of Mechanical Design*, Vol. 102, April 1980) pp. 199-204.