

EVALUACION DEL DESGASTE POR MEDIO DE DEL ANALISIS DE SEÑAL POR WAVELETS DE PROTESIS DE CADERA RECUBIERTAS CON DLC POR TRIBOADHESION

Dagoberto Tolosa Mata, J.M. Rodríguez Lelis, Arturo Abundez Pliego,
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Apartado Postal 5-164, C.P. 62051
Cuernavaca, Morelos, México
Tel/Fax (777) 3 12 76 13

dago_tolosa80@hotmail.com, jmlelis@cenidet.edu.mx, abundez@cenidet.edu.mx

R. Andrés López y Rodríguez, Dalia Ruiz Domínguez
ESIME Unidad Culhuacan
Av. Santa Ana No. 1000,
Col. San Francisco Culhuacán, Delegación Coyoacán, D.F.
Tel/fax: 5-624-2000
andreslyr@hotmail.com, daliard@hotmail.com

RESUMEN

En el presente trabajo se muestra el análisis del desgaste de prótesis de cadera con y sin recubrimiento de DLC por triboadhesión. Los pares utilizados de las prótesis son : cabeza femoral de óxido de aluminio Al_2O_3 y copa de polietileno de ultra alta densidad. El análisis de la señal dinámica se realiza por medio de la transformada wavelet Morlett con filtro de Daubechies. Se encontró por este análisis que la resistencia al desgaste de las prótesis recubiertas con DLC es superior en casi un 315%.

ABSTRACT

In this work a wear analysis of prosthesis with and without DLC coating is carried out. Here the friction couples employed in the prosthesis are: femoral head of aluminum oxide Al_2O_3 and a acetabular cup of ultra high molecular density polyethylene . The dynamic signal was analyzed with a Morlett mother wavelet with a Daubechies filter. It was found that the prosthesis coated with DLC have a larger wear resistance than the prosthesis without coating close to 315%.

INTRODUCCIÓN

Se reporta que en la actualidad se realizan alrededor del mundo, mas de 500,000 operaciones para la instalación de prótesis de cadera. De éstas, los problemas mas comunes encontrados son la resorción peri protésica de hueso y el aflojamiento del componente acetabular, éste último a causa del desgaste por el contacto de las dos superficies en movimiento relativo.

Como menciona Marvin [1]: “No existe ninguna articulación de cadera fabricada por el hombre, que pueda proporcionar las superficies de baja fricción propias de una cadera natural”. La fricción entonces se convierte en una preocupación real porque puede condicionar el aflojamiento del componente acetabular si alcanza una magnitud suficiente o si el componente acetabular está mal fijado.

Durante los años sesenta y setentas se desarrollaron un gran número de prótesis de contacto metal con metal, las cuales se vieron posteriormente desplazadas por la prótesis de Charnley, que emplea un acetábulo revestido con una capa de polietileno, arreglo que reduce la fricción en las superficies en contacto. De las prótesis metal-metal puede encontrarse que un número de éstas han sobrevivido más de 25 años a causa de las bajas velocidades de desgaste y osteolisis mínima [2].

En 1984 Maurice Muller, Bernard Weber y los hermanos Sulzer reintroducen el concepto de rodamiento metal con metal [3]. Esta última observó torques friccionales similares a las prótesis con capuchón de polietileno; y un desgaste durante el primer millón de ciclos de 10 a 20 micras y posterior de 2 a 4 micras por millón de ciclos. En 1989 el mismo grupo [4] reporto prótesis metal con metal extraídas después de 10 y 20 años de uso donde el desgaste medido fue de 40 a 100 veces menor que las prótesis de metal-polietileno. En la actualidad las articulaciones desarrolladas con Metasul, una aleación de la compañía Sulzer son las más populares.

Por otro lado, con relación a carcinogénesis, Gillespie, et. Al [5], entre otros reportaron un incremento en el riesgo de tumores linfáticos y sistemas hemopoyeticos en pacientes con cualquier tipo de prótesis de cadera. Sin embargo, Mathiesen, et. al. [6] no fueron capaces de establecer asociación alguna entre la artroplastía de cadera y el incremento de incidencia de cáncer en los primeros diez años después de la operación. Respecto de las altas velocidades de infección se menciona que estas se reducen enormemente con el uso de antibióticos profilácticos [2]. El mayor problema encontrado en la artroplastía de cadera moderna, es la osteolisis peri-prótesis provocada por las rebabas formadas durante el proceso de desgaste del capuchón de polietileno de la prótesis de Charnley, que es la más comúnmente usada. Por esto, implantes con articulaciones con superficies de contacto metal-metal son entonces deseables [7].

John A. Schey [8], en 1996 establece la necesidad del estudio de fricción y desgaste con diferentes metales y recubrimientos, con rugosidad controlada y lubricantes específicos para esclarecer el comportamiento de las uniones metálicas. Asimismo provee con criterios importantes para este tipo de estudios. Con relación a lo arriba mencionado, en el desarrollo de prótesis la reducción del desgaste es de suma importancia. Como se describe en [7] la combinación de los conocimientos en tribología aportan elementos necesarios para el desarrollo adecuado de los pares de contacto. Con base en lo anterior en el presente trabajo, se presenta el análisis del desgaste de prótesis de cadera con y sin recubrimiento de DLC.

WAVELET MADRE PARA EL ANÁLISIS DE LAS SEÑALES DE DESGASTE.

La wavelet Morlet, una onda senoidal modulada por una onda Gaussiana, se caracteriza por tener una respuesta en la frecuencia estrecha, lo cual ofrece una resolución espectral más fina que la wavelet Sombrero Mexicano. Por tanto, la wavelet Morlet es particularmente eficiente en el análisis de señales que se generan por sistemas dinámicos, ya que presentan señales transitorias. La wavelet Morlet se define como:

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} e^{i\omega_0 t} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (1)$$

donde la TF de la Wavelet Morlet, figura 1, se define como [8]:

$$\psi(\omega) = \sqrt{2} \sqrt[4]{\pi} e^{-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2}} \quad (2)$$

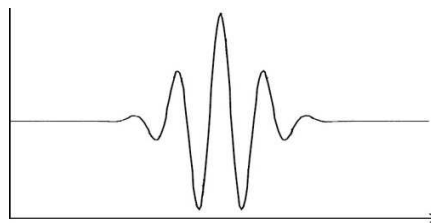


Fig. 1 Representación de la Wavelet Morlet.

EL PROCESO DE DEPÓSITO DE PELICULAS DELGADAS POR TRIBOADHESION

En la figura 2 se muestra el dispositivo utilizado en este trabajo. Este 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 Rabinowicz [9] pueden alcanzarse temperaturas hasta de 3000 °C, en un espacio del orden de micras y menores.

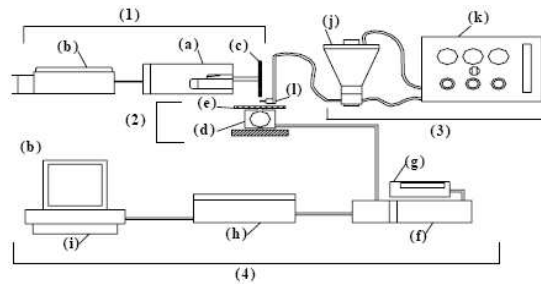


Fig. 2. Dispositivo de trabajo para la deposición por triboadhesión: (1) Sistema de rotación de la fresa: a) motor de alta velocidad, b) control de velocidad, c) fresa de deposición; (2). Sistema de medición de fuerza: d) celda de carga tipo anillo, e) base; (3). Sistema de alimentación de polvos: j) dosificador de partículas, k) control neumático, y l) tobera; (4). Sistema de adquisición de datos: f) amplificador, g) medidor de voltaje, h) analizador de señales, i) computadora personal.

Como se menciona en [10], la temperatura superficial θ que se alcanza durante el proceso e triboadhesión es:

$$\theta = \frac{(1 - \lambda) \dot{Q}}{\pi (r^3 K \rho C_p v)^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

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

BANCO DE PRUEBAS DE DESGASTE

El dispositivo de desgaste se diseñó con base en la norma ISO 14242 [11], como se describe en [12, 13]. Aquí la carga (1) se aplica como se muestra en la figura 3. A causa del movimiento de la prótesis (2) una señal dinámica se produce, la cual a su vez es sensada por un acelerómetro piezoeléctrico PCB modelo ICP®- 603C01 (3). La señal del acelerómetro a su vez es amplificada por un sistema de adquisición de datos National Instrument DAQPad-6020E (4), para finalmente ser grabada por una computadora personal (5).

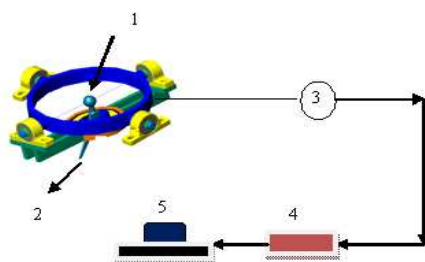


Fig. 3. Esquema del sistema de evaluación del desgaste. .

El sistema de adquisición de datos se ajustó para medir 5000 muestras a una velocidad de muestreo de 15000 muestras/s. Esto garantizó una resolución espectral de 3 Hz y una señal de frecuencia de 7500 Hz.

PARES DE FRICCIÓN

En la tabla 1 se enlistan los pares de fricción que se utilizaron en las pruebas de desgaste, donde los materiales bases, tanto de la cabeza femoral como de la copa acetabular son óxido de aluminio o alúmina y polietileno de ultra alto peso molecular, o UHMWPE, respectivamente. Este par es el que presenta mejor comportamiento en la resistencia al desgaste. Sin embargo, los porcentajes de desgaste que genera este par aún provocan osteólisis lo que provoca el aflojamiento del implante. El material de aporte que se utilizó fue diamante sintético o DLC. A dos cabezas femorales con distintos tiempos de aplicación, la primera con un tiempo de aplicación del proceso de 90 segundos, ALU90, y la segunda con un tiempo de 160 segundos, ALU160. Como referencia, a una de las cabezas femorales no se le aplicó ningún tipo de recubrimiento, ALUSIN.

Tabla 1 Pares de fricción a utilizar en las pruebas de desgaste.

Nomenclatura	Cabeza Femoral	Copa Acetabular
ALUSIN	ALUMINA SIN RECUBRIMIENTO	UHMWPE
ALU90	ALUMINA A 90 s	UHMWPE
ALU160	ALUMINA A 160 s	UHMWPE

CONDICIONES DE PRUEBA

En la figura 4 se muestra la variación de la carga durante un ciclo de marcha. La carga en kN en la articulación, ordenada y el ciclo de marcha o de caminado en porcentaje, abscisa. Donde se puede observar que la articulación artificial presenta una carga mínima de 0.5 kN al inicio del ciclo de marcha; durante la marcha se presentan dos picos en la señal que corresponde a 5 kN a 10 y 50% y a partir del valor del 60% la carga vuelve a ser mínima, 0.5 kN. Sin embargo, para evaluar el desgaste en la articulación la norma que se citó anteriormente estipula tomar la carga de 5 kN, ya que de esta manera se tiene la condición extrema durante la prueba de desgaste.

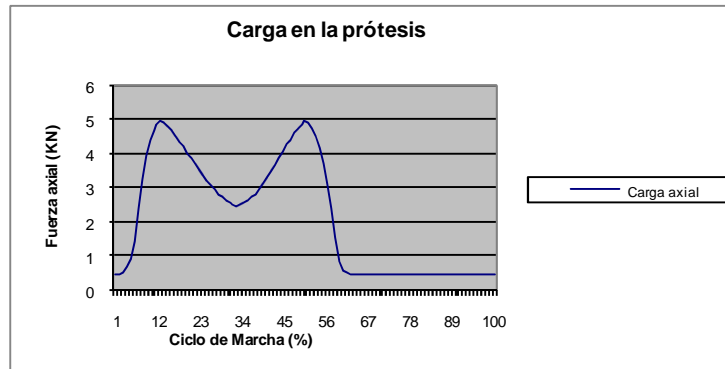


Fig. 4 Variación de la fuerza durante un ciclo de Marcha.

RESULTADOS

La figura 5 muestra la FRFs del simulador de cadera superpuesta con una señal de aceleración de la prueba de desgaste, donde los ejes que la definen son la frecuencia y amplitud, abscisa y ordenada respectivamente. Para el análisis, el eje de frecuencias se divide en tres zonas: 1) 0-3000 Hz baja frecuencia, recuadro negro, 2) 3000-5500 Hz intermedia frecuencia, recuadro azul y 3) 5500-7500 Hz alta frecuencia, recuadro verde.

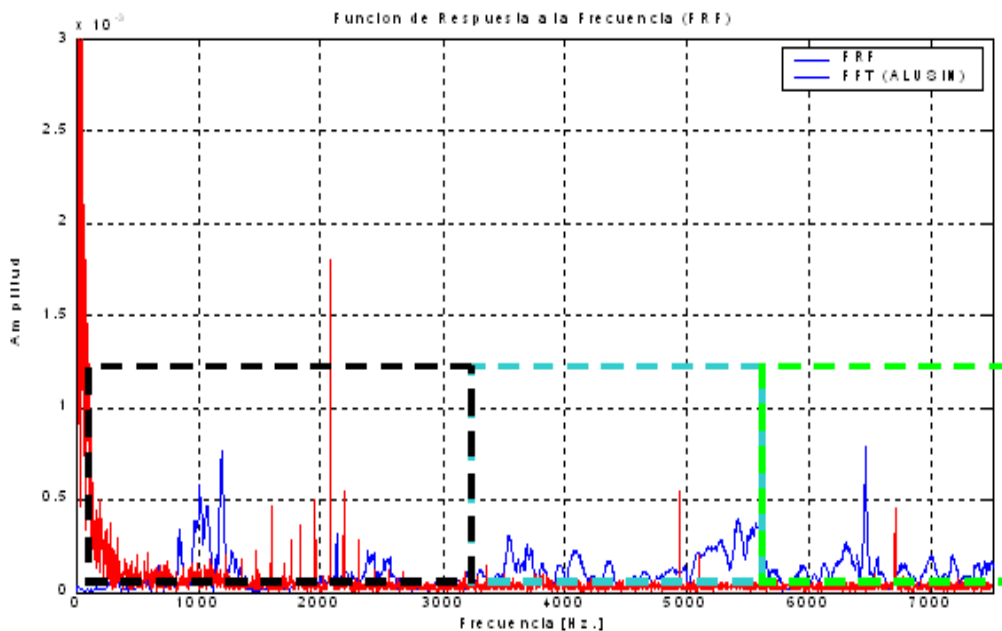


Figura 5 FRFs y espectro de vibración de la señal de desgaste

Como se menciona en la literatura, las frecuencias naturales de una estructura se detectan en la grafica de la FRFs como un pico en la señal. Si ésta, se le superpone el espectro de vibración de la señal de aceleración de la prueba de desgaste, señal roja, se puede identificar cuales picos en la señal corresponden a fenómenos inherentes al funcionamiento del simulador y cuáles corresponden a la excitación de una frecuencia natural del simulador, es decir, si el espectro de vibración y la FRFs presenta un pico a la misma frecuencia, se relaciona con la excitación de una frecuencia natural, resonancia, lo que provoca el aumento en la amplitud.

Análisis de la zona de baja frecuencia, figura 5.2, muestra un pico a la misma frecuencia tanto en el espectro de vibración de la señal de desgaste, señal roja, como en la FRFs de la estructura, señal azul. Por tanto, se puede considerar que no se excitó una frecuencia natural del simulador de cadera y se puede inferir que los picos en el espectro de vibración de las señales de aceleración de las pruebas de desgaste en baja frecuencia se pueden asociar a problemas como desalineamiento de ejes, desbalance, aflojamiento mecánico y engranes. Por otro lado, de acuerdo con [14], en la zona de 2-10 kHz se identifican los problemas de contacto. Por tanto, con base en el análisis de la figura anterior en la zona de intermedia y alta frecuencia, se plantea la hipótesis de que los picos a las frecuencias de 4900, 5150 y 6700 Hz corresponden al fenómeno de desgaste

El análisis de señales en el dominio de la frecuencia o análisis de Fourier es una buena opción para conocer cuales frecuencias son las que predominan en el comportamiento del fenómeno a estudiar, sin embargo, tiene la limitante de no poder captar fenómenos transitorios con la precisión que se desea. Únicamente se tiene un panorama global del fenómeno transitorio y fue el análisis que se realizó en la sección anterior. Para poder tener una perspectiva más a detalle del fenómeno de fricción y desgaste, se realiza un análisis en el dominio tiempo-frecuencia que a continuación se presenta en la forma de la Transformada Wavelet.

La representación de la señal de desgaste con esta técnica es en tres o en dos dimensiones. En el primer caso, los ejes que definen a la señal son el tiempo, la frecuencia y la amplitud. En el segundo caso, la forma más común es representar la señal con los ejes de tiempo y frecuencia y la amplitud se relaciona al color; mientras el color tiende a rojo la amplitud es mayor y cuando tiende a azul la amplitud es menor. Para el análisis de las señales de vibración al final de la prueba de desgaste, hay que mencionar que la frecuencia de operación es de 3 ciclos por segundo, por lo que un ciclo de deslizamiento tarda 0.333 segundos, rango del tiempo en el eje temporal de la Transformada wavelet.

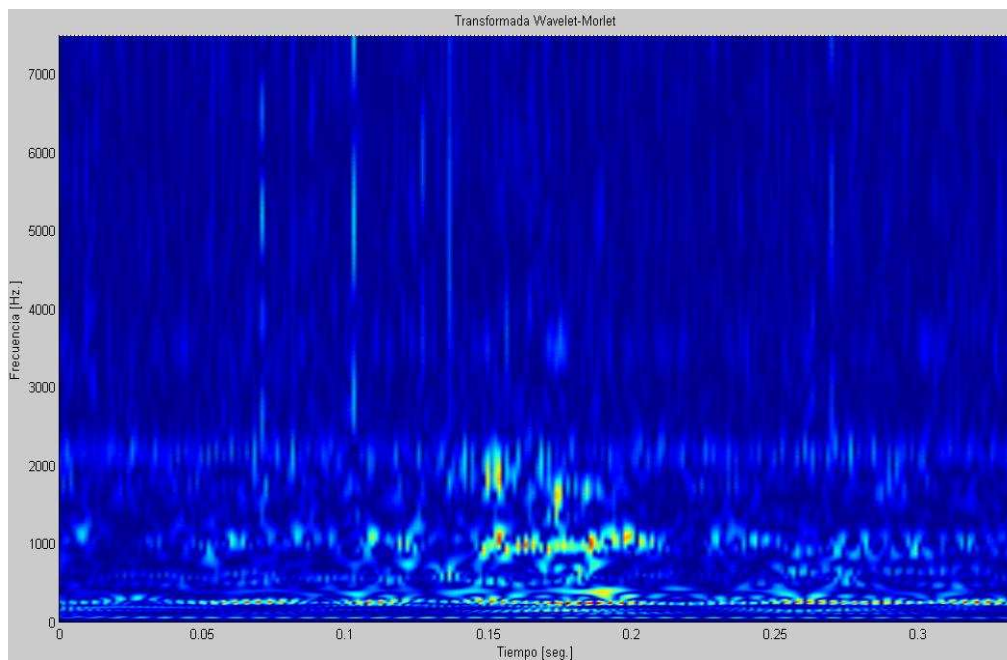


Figura 6.a Transformada Wavelet de la señal de aceleración de la prueba de desgaste del par ALU90 al final de la prueba. Representación en 2-D.

En figura 6.a que corresponde al par ALU90 se muestra el resultado de la transformada Wavelet. Aquí, se presenta la frecuencia de 60 Hz que corresponde a ruido en la señal, sin embargo la amplitud en el rango de baja frecuencia aumentan hasta alcanzar el valor de 0.5, Este cambio en amplitud se puede relacionar al desalineamiento en el simulador de cadera. La armónica de la frecuencia de contacto de los dientes, 11 Hz, está presente a 2000 Hz y la amplitud en promedio permanece constante, lo cual indica que durante la prueba de desgaste no se presentó ninguna falla en el engraneaje. En el caso de la zona de intermedia y alta frecuencia, se puede relacionar al tiempo 0.06, 0.1, 0.14 y 0.27 segundos a problemas de desgaste moderado, ya que se presenta el fenómeno de modulación entre la frecuencia de contacto de los dientes, 11 Hz, y la frecuencia de 3350 Hz, lo que al sumarlas el resultado da aproximadamente 5200, que es donde se presentan estos picos en la señal, la amplitud a estos tiempos son 0.4, 0.4, 0.2 y 0.2 respectivamente.

La frecuencia de 3350 Hz aparece al final de la prueba de desgaste en el par ALU90. También se presenta lo que se infiere como desgaste ligero a la frecuencia de 6700 Hz al tiempo 0.06 y 0.08 segundos con amplitudes de 0.3 y 0.3 respectivamente, mientras que a la frecuencia de 4900 Hz se presenta al tiempo de 0.16 y 0.19 segundos, con amplitudes de 0.05 y 0.1 respectivamente.

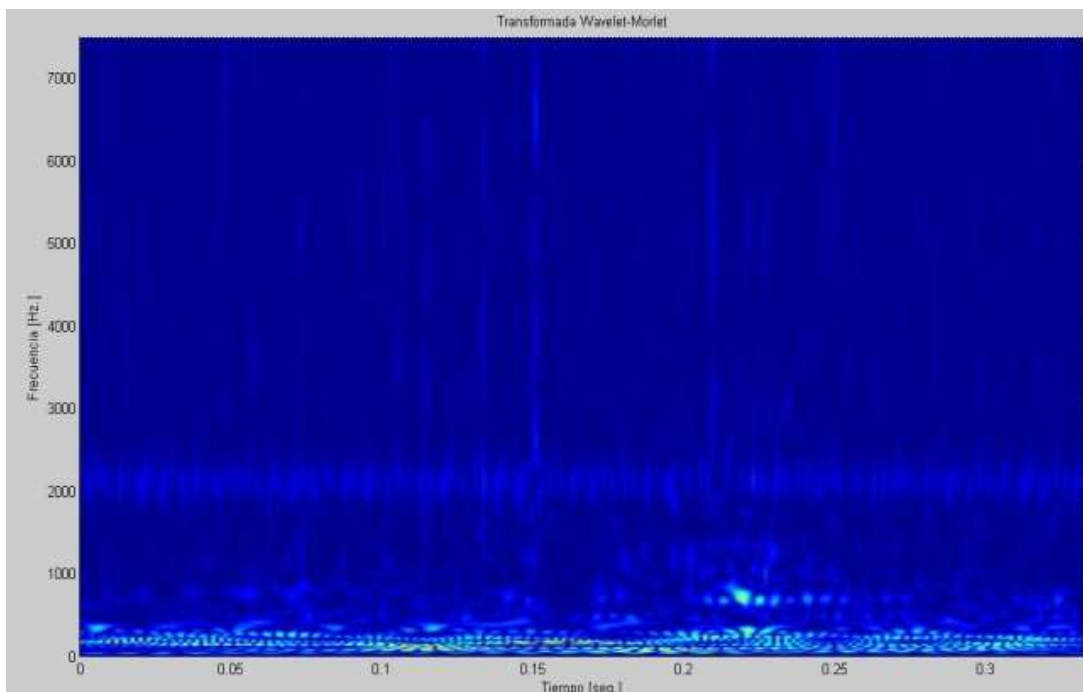


Figura 6.b Transformada Wavelet de la señal de aceleración de la prueba de desgaste del par ALU160 al final de la prueba. Representación en 2-D.

En figura 6.b se presentan los resultados para el par ALU160. Aquí, en el rango de intermedia y alta frecuencia, se presenta lo que se infiere sean síntomas de desgaste ligero a la frecuencia de 4900 Hz en los tiempos de 0.03, 0.21, 0.22 y 0.23 segundos, que corresponde al valor de amplitud de 0.1, 0.3, 0.1 y 0.1 respectivamente, y a la frecuencia de 6700 Hz en el tiempo 0.05 segundos con una amplitud de 0.1. Por otra parte, el desgaste moderado al igual que en el par ALU90 también está presente, la manera en que se detecta es en la separación de los armónicos que se genera durante el choque de la superficie con una zona que presenta desgaste de la otra superficie, en este caso se presenta un pico en la señal de 6500 Hz con amplitud de 0.6 y el otro pico a la frecuencia de 4800 con amplitud de 0.3, al restarse da una frecuencia de 1700 Hz. En el análisis de Fourier se encontró un pico en la señal al finalizar la prueba de desgaste a 1750 Hz, por tanto al tiempo 0.15 segundos se puede relacionar la presencia en la superficie de una zona de desgaste.

En la figura 6.c se muestran los resultados para la zona de intermedia y alta frecuencia del par ALUSIN al desgaste, que presenta la superficie de contacto, entre los cuales se puede mencionar el desgaste moderado que se presenta al tiempo de 0.29 y 0.30 segundos, el cual se puede detectar a través de los armónicos que se generan cuando se golpea la superficie, en este caso se tiene dos armónicos a las frecuencias de 5600 y 3900, con amplitudes de 0.2, lo que al restarlas da como resultado 1700 Hz, cuando se analizó el espectro de frecuencias del par ALUSIN, presentó una frecuencia a 1750 Hz que no presentó al inicio de la prueba de desgaste. Por tal motivo, se infiere la presencia de un choque de dos superficies en la condición de desgaste a los 0.29 y 0.30 segundos. Además, se presenta a lo que se infiere como desgaste mayor, la detección de este desgaste se realizó con el mismo procedimiento que el anterior desgaste, se presentan dos armónicos a las frecuencias de 5100 y 1900 Hz, con amplitudes de 0.4, que al restarlos da como resultado 3200 Hz. La relación con el desgaste es a causa que en el análisis de Fourier, se presenta un pico a la frecuencia de 3350 Hz, por lo que al tiempo 0.24 segundos pudiera relacionarse desgaste en la superficie.

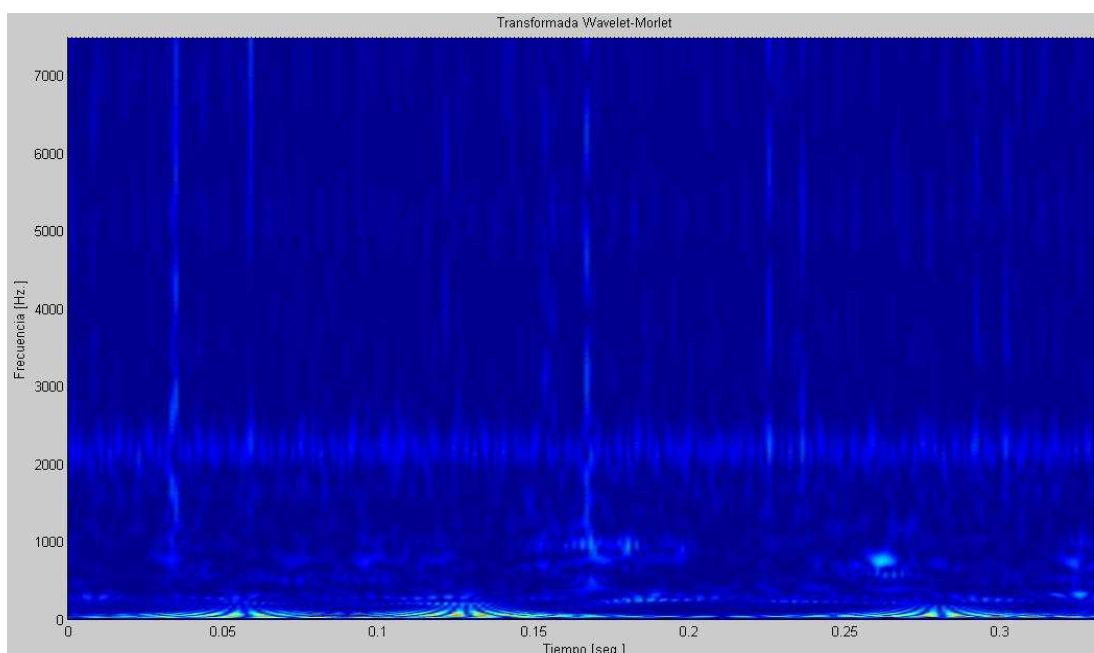


Figura 6.c Transformada Wavelet de la señal de desgaste del par ALUSIN al final de la prueba. Representación en 2-D.

Por otro lado, se puede inferir que el par ALUSIN también presenta desgaste excesivo. La manera con la cual se detecta es por la modulación de la frecuencia de contacto de los dientes, 11 Hz, con las frecuencias de 3350 y 5150 Hz, las cuales son frecuencias que se detectaron en el análisis de Fourier. Al sumarlas da como resultado las frecuencias de 5350 y 7150 Hz, al observar la representación de la señal por medio de la Transformada Wavelet se detectan dos franjas a las frecuencias de 5350 y 7150 Hz. Al estar presentes en todo tiempo estas frecuencias se reafirma la hipótesis de la existencia del desgaste excesivo porque se encuentra en toda la superficie de contacto.

DISCUSIÓN

El análisis de los espectros de vibración muestra dos maneras de evaluar el desgaste en la interfase entre la cabeza femoral y la copa acetabular, la primera, a través del monitoreo en el número de bandas laterales y su amplitud, la segunda, al analizar la zona de intermedia y alta frecuencia.

En el primer caso, en el par ALU160 no se presentaron bandas laterales diferentes a $\pm 2 \cdot f_m$ y la amplitud varió en 0.05 g's, por lo que se infiere un desgaste ligero en las superficies. En el par ALU90, aparece una amplitud de 0.2 g's a la frecuencia de 1750 Hz y la amplitud de $\pm 2 \cdot f_m$ aumento en 0.02 g's, por lo que se puede relacionar a un desgaste moderado. En el par ALUSIN aparecen amplitudes diferentes a $\pm 2 \cdot f_m$ a las frecuencias de 1550 y 1750 Hz, por lo que se infiere que el desgaste sea mayor.

En el segundo caso, la manera de evaluar el desgaste, fue a través del monitoreo de la frecuencia de 6700 Hz durante la prueba de desgaste de los tres pares de fricción, lo que forma una curva en función de tiempo. Al relacionar la pendiente de las curvas se puede determinar que las superficies con recubrimiento presentan una pendiente suave, no así para el par ALUSIN donde la pendiente mucho mayor. De aquí se determinó el tiempo que se necesitaría en los pares ALU160 y ALU90 para alcanzar la amplitud de 0.75 g's que presenta el par ALUSIN. El tiempo estimado fue de 131 horas, lo que genera una mejora en la resistencia al desgaste de aproximadamente un 315%.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se evaluaron dinámicamente 3 pares de fricción; dos con recubrimiento que se realizaron a través del proceso de triboadhesión y uno sin recubrimiento, a estos se le aplicaron análisis a través de transformada de Fourier y transformada wavelet con el propósito de evaluar el efecto que tiene un recubrimiento en la superficie del material en la señal de vibración.

Se encontró que los pares con recubrimiento de DLC tienen una resistencia al desgaste mayor en aproximadamente un 315% con respecto a aquella sin recubrimiento.

REFERENCIAS

- [1] Steinberg, Marvin E., 1991, La Cadera Diagnóstico y Tratamiento de su Patología, Ed. Médica Panamericana, Buenos Aires, Argentina.
- [2] Amstutz, Harlan C, et. al., 1996, Metal on Metal Bearings in Hip Arthroplasty, Clinical Orthopaedics Research, N. 329S, pp. S11-S34.
- [3] Muller, M.E., 1995, The Benefits of Metal-on-Metal Total Hip Replacement, Clin. Orthop., 311, pp. 54-59.
- [4] Semlitsch, M., et. al., 1981, Wear Behaviour of Cast CoCrMo Cups and Balls in Long-Term Implanted Total Hip Prostheses, Orthopade, 18, pp. 377-381
- [5] Gillespie, W.J., et. al., 1988, The Incidence of Cancer Following Total Hip Replacement, J. Bone Joint Surg, 70B, pp. 539-542.
- [6] Mathiesen, E.B., et. al., Total Hip Replacement and Cancer, J. Bone Joint Surg, 77B, pp. 345-350.
- [7] Schmidt, M., et. al., 1996, Cobalt Chromium Molybdenum Metal Combination for Modular Hip Prostheses, Clinical Orthopaedics Research, N. 329S, pp. S35-S47.
- [8] Mark H. Richardson. "Structural dynamics measurements". Vibrant Technology, Inc. Jamestown, California 95327
- [9] Rabinowicz E; 1965; The Friction and Wear of Materials; Wiley, New York.
- [10] J. M. Rodríguez Lelis, J. Colín Ocampo, J. Calderon and J. Robles, "Deposition of Diamond in Cooper by Triboadhesion", ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 125, 2003, ISSN 1087-1357, pp. 628-630.
- [11] ENDOLAB, "Hip endoprotheses simulator", Mechanical Engineering GMBH. Normative reference ISO/DIS 14242 und PI-7 (certified procedures).
- [12] Abúndez Pliego Arturo, "Diseño de un dispositivo para deposición por triboadhesión en prótesis de cadera", Tesis de Maestría, Cuernavaca Morelos, México; CENIDET, 2004.
- [13] Sosa González Wadi Elim, "Diseño de un mecanismo para la evaluación del desgaste en prótesis de cadera", Tesis de Maestría, Cuernavaca Morelos, México; CENIDET, 2004.
- [14] Alexej V. Barkov and Natalia A. Barkova. "Condition assessment and life prediction of rolling element bearings- part 1". VibroAcoustical Systems and Technologies, St.Petersburg, Russia.