

EFFECTO DE LA FRICCIÓN EN LOS PARES DE CONTACTO CrCoMo-UHMWPE Y DLC-UHMWPE SOMETIDOS A DESGASTE

C. A. Maza V., J.M. Rodríguez L*, A. Abúndez P. y A. Arellano C.

Departamento de Ingeniería Mecánica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
(CENIDET), Interior Internado Palmira s/n, Cuernavaca Morelos, México, C.P. 62490
e-mail: cesar_maza@hotmail.com

RESUMEN

Información del artículo

Enviado: 28 de agosto de 2010

Aceptado: 25 de octubre de 2010

Disponible en línea: 5 de diciembre de 2011.

Palabras claves:

Fricción, desgaste, pares de contacto, DLC.

En este trabajo, el objetivo es describir el efecto de la fricción sobre el fenómeno de desgaste presente en dos entidades semicilíndricas. Dichas entidades representan el radio de rugosidad promedio de las superficies en contacto que se forman entre la cabeza femoral y la copa acetabular de una prótesis de cadera. Los pares de contacto empleados son CrCoMo-UHMWPE y DLC-UHMWPE. Se utilizan tres tipos de traslape: 1, 2.5 y 40 por ciento del radio principal de la rugosidad del UHMWPE. Se utiliza el método de Energía y el método de Shankar y Mayuram, para cuantificar el desgaste, y por lo tanto detallar el efecto de la fricción en el proceso. Aquí se observa que ambos desgastes están en función de la fricción y el radio de contacto; es decir que durante el contacto, si se considera la fricción, la presión disminuye cuando el área de la interacción se incrementa. Esto disminuye la profundidad de penetración la cual es proporcional a la presión.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con (McTighe et al,1995), una de las causas más comunes de la pérdida del extremo superior del fémur es a causa de la osteólisis, la cual conduce al remplazo total de cadera RTC. Una vez hecho el remplazo de cadera, la prótesis se convierte a un rodamiento sometido a fricción y desgaste. Desde hace tres décadas que Willert (Willert & Semlitsch, 1977) describió el problema de desgaste del polietileno, el cual conduce a la inflamación periprotésica, el granuloma, resorción del hueso, y el deterioro del implante. En 1996 Schmidt (Schmidt et. al, 1996) establece que el más grande problema en la artroplastía de cadera es la osteólisis a causa de los fragmentos que se desechan durante el desgaste

de la copa acetabular de polietileno de la prótesis Charnley. Al mismo tiempo John A. Schey (Schey, 1996), fija su atención a la necesidad de estudiar los procesos de fricción y desgaste, para diferentes materiales y condiciones de lubricación, para establecer el comportamiento de los pares de contacto. La fricción, el desgaste y los modos de lubricación están sin lugar a dudas relacionados a la rugosidad de las superficies en contacto. Hall y colaboradores (Hall et al, 1997), trabajaron en las características de fricción de una nueva prótesis de cadera y los modos de lubricación, y refieren que en todos los estudios la prótesis trabaja en un régimen de lubricación mezclado. También demostraron, para

* Corresponding Author: jmlelis@cenidet.edu.mx

Recubrimiento de DCL-NI

una prótesis de cadera, que la lubricación mezclada es el modo prevalente de lubricación. La lubricación mezclada es la transición entre lubricación hidrodinámica/elasto-hidrodinámica y los regímenes de lubricación de frontera. En este régimen, existe un contacto sólido, pero una fracción de la carga aun es llevada por la película hidrodinámica (Bhushan, 2002). Este contacto es la causa de desgaste y de interés para ser evaluado.

Por otro lado, Shankar y Mayuram. (Shankar & Mayuram, 2008), mencionan que una mejor explicación del desgaste así como el proceso de fricción es posible al entender la naturaleza de la interacción de deslizamiento de dos asperezas en contacto. Ellos desarrollaron un Método de Elemento Finito (MEF) para calcular la profundidad de desgaste y el volumen de material desplazado lateralmente entre las dos asperezas en contacto durante el deslizamiento. Shankar y Mayuram fueron capaces de predecir el desgaste al combinar las influencias de los esfuerzos de contacto y un coeficiente de desgaste superficial.

De acuerdo con Shankar y Mayuram (Shankar & Mayuram, 2008), se llevó a cabo una aproximación de elemento finito para cuantificar el desgaste entre dos asperezas, pero aplicando un método de energía explicado por Rodríguez, L., et. al. en (Rodríguez et. al., 2010) y (Sadd, 2005). En este trabajo se hacen notar las características de fricción durante el contacto, que conllevan al entendimiento de la profundidad del desgaste.

NOMENCLATURA

G: Módulo de torsión (N/m²)

Ud: Energía de Distorsión (J)

dV: Elemento Diferencial de Volumen (μm³)

σ_x, σ_y, σ_z: Esfuerzo Normal (N/m²)

τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{zx}: Esfuerzo Tangencial (N/m²)

dh: Profundidad de desgaste (m)

Kw: Coeficiente de desgaste (m²/N)

Δs: Deslizamiento (m)

p: Presión principal de contacto (N/m²)

METODOS PARA LA EVALUACION DEL DESGASTE

El método de Energía, empleado por Rodríguez, L., et. al. en (Rodríguez et. al., 2010), se utiliza cuando dos asperezas entran en contacto, los esfuerzos que se generan, se calculan con las ecuaciones de Flamant (Johnson, 1985), se aplican a la ecuación de energía de distorsión (Sadd, 2005).

Cuando se obtiene el punto máximo de energía crítica en el contacto, se determina el punto coordenado. El desplazamiento de la aspereza deformada se considera y la geometría se actualiza.

$$\frac{U_d}{dV} = \frac{1}{12G} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)] \quad (1)$$

De aquí en adelante, una nueva carga se aplica y el proceso se repite para el cálculo de desgaste abrasivo y por deformación.

El método de Shankar y Mayuram (Shankar & Mayuram, 2008), que utiliza la ecuación de Archard,

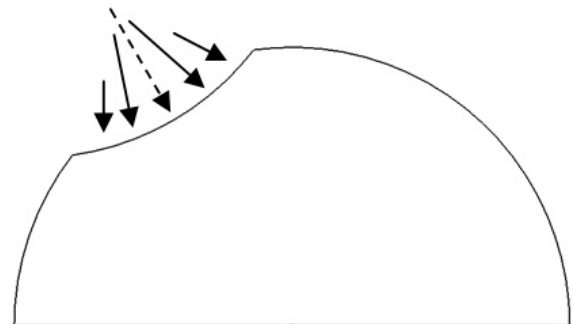


Figura 1. Esquema de la fuerza puntual principal (---) y fuerzas colindantes (-->). La fuerza principal, genera los mayores esfuerzos, y por tanto el mayor valor de energía.

donde h/s representa la tasa de desgaste en cualquier momento genera las distintas profundidades conforme el indentador avanza y solo proporciona el material que se deforma.

GEOMETRIA Y MODELO DE ELEMENTO FINITO

$$\frac{dh}{\Delta s} = K_w p \tag{2}$$

El modelo utilizado, que se muestran en (Rodríguez et. al., 2010), consta de dos entidades semicilíndricas de 1.25µm de radio y son similares a las descritas en (Shankar & Mayuram, 2008).

En este trabajo, con base a Rodríguez et. al (Rodríguez et. al., 2010), el radio es un valor promedio al reportado por Jin, et. al. (Williams et al, 2007) y el mínimo valor reportado por Ravichandran (Ravichandran, 2006).

El modelo de elemento finito de la Figura 2 y el que se muestra en (Rodríguez et. al., 2010), se desarrolló con ANSYS 11. Los elementos utilizados en este modelo son cuadriláteros con 8 grados de libertad, dos por cada nodo, los cuales son ANSYS-PLANE42. El número total de elementos es de 2168 y el número total de nodos es 2162. El elemento de contacto empleado es ANSYS-CONTA172 y ANSYS-TARGE169.

RESULTADOS

En este trabajo se aplican incrementos de longitud, iguales a la deformación que describen las ecuaciones de Flamant (Johnson, 1985). El coeficiente de fricción μ que se utiliza para el UHMWPE es de 0.29095. Este coeficiente de fricción se aplica a los pares de contacto de DLC/UHMWPE y CoCrMo/UHMWPE. Los resultados obtenidos para los diferentes procesos de fricción se muestran en las Figuras 3a, 3b, 3c y 3d. Las propiedades de los materiales utilizados se muestran en la Tabla 1.

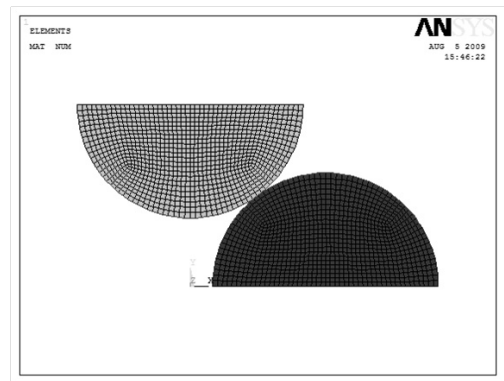


Figura 2. Modelo de crestas semicilíndricas en contacto.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los material empleados.

MATERIAL	E GPa	ν	σ_Y MPa	γ_s J/m ²	H GPa
UHMWPE	1	0.22	28	0.031	0.048
DLC	1000	0.1	---	5.250	100
CoCrMo	230	0.3	655-860	5.3326	3,43

Durante la simulación, la influencia del valor de fricción y las propiedades de la cresta de indentación ayudan a localizar el material extra que se deforma. Cuando se hace una interacción donde no se considera la fricción, los esfuerzos plásticos equivalentes en la frontera y cercanos a ella, presentan valores críticos o de cedencia alejados al extremo derecho de la base de la cresta inferior. (ver Figura 3a).

A causa de cada incremento del desplazamiento

en la dirección A-B, los esfuerzos plásticos equivalentes crecen como respuesta a la indentación. El crecimiento de estos esfuerzos solo indica que el material quedará deformado plásticamente al paso del indentador de acuerdo con el segmento A-B.

En la Figura 3b, se considera la fricción en el par de contacto. El comportamiento de fricción genera el crecimiento de los esfuerzos plásticos equivalentes a causa de la oposición a la fluencia de material.

Recubrimiento de DCL-NI

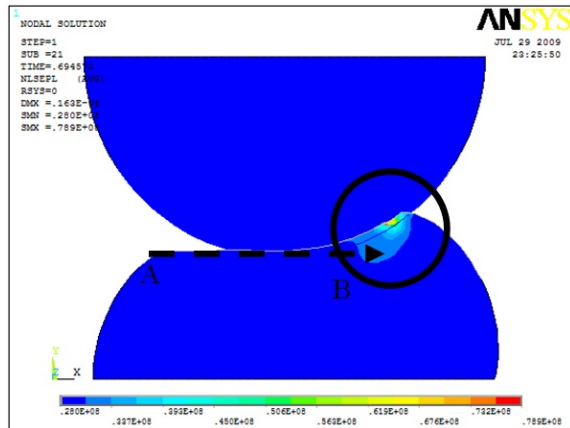


Figura 3a. Esquema de la interacción entre crestas del modelo sin fricción, como resultado de dicha interacción surgen los esfuerzos equivalentes plásticos ubicados en el círculo de color negro.

Los esfuerzos crecen a tal grado, que alcanzan un extremo de la base y con ello se genera un volumen de desgaste por deformación. El desplazamiento total de la cresta indentadora, donde se alcanza el extremo derecho de la base, es $1.6128e^{-6}$ m.

A causa de cada incremento del desplazamiento y el valor de fricción, los esfuerzos plásticos equivalentes crecen como respuesta a la indentación. El crecimiento de estos esfuerzos indica una nueva

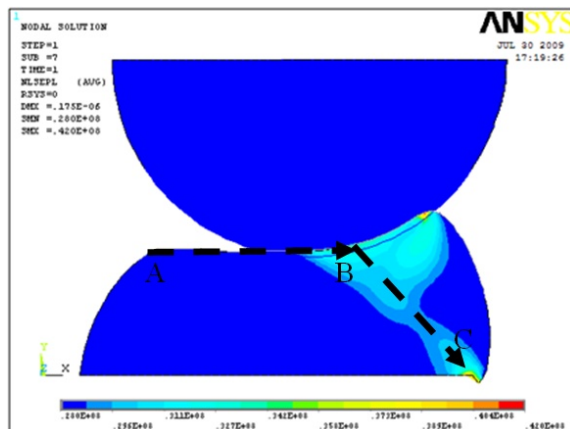


Figura 3b. Comportamiento de los esfuerzos plásticos equivalentes cuando el modelo incluye la fricción del UHMWPE.

dirección de deformación. La deformación crece de los segmentos A a B y posteriormente de B a C. El segmento de B a C se calcula con los puntos máximos de energía.

En la Figura 3c, la posición del indentador es de $1.4938e^{-6}$ m cuando los esfuerzos plásticos equivalentes alcanzan el extremo derecho de la cresta inferior.

También a causa de cada incremento del desplazamiento y las propiedades del material de indentación, los esfuerzos plásticos equivalentes crecen como respuesta a la indentación. El crecimiento de estos esfuerzos indica una nueva dirección de deformación. La deformación crece de los segmentos A a B y posteriormente de B a C como se representa en la Figura 3b.

Por último en la Figura 3d, en el modelo DLC-UHMWPE, los esfuerzos plásticos equivalentes alcanzan el extremo derecho de la base de la cresta

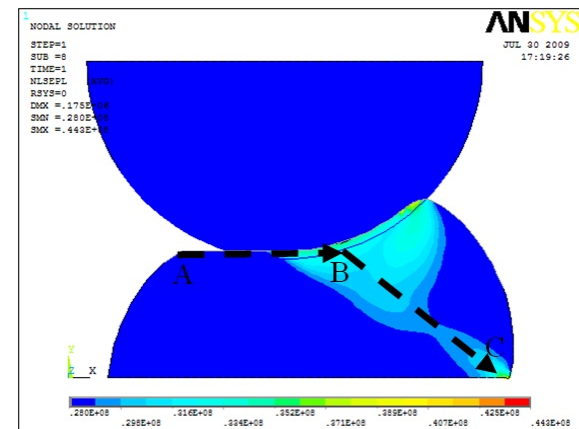


Figura 3c. Comportamiento de los esfuerzos plásticos equivalentes en el par de contacto CoCrMo-UHMWPE. Incluye la influencia de la fricción y el trabajo de adhesión.

inferior con un desplazamiento de la cresta superior igual a $1.4334e^{-6}$ m, la cual esta a menor distancia que los modelos de la Figuras 3b y 3c. Este comportamiento se presenta a causa de las

características del DLC, es decir, la dureza del diamante incrementa los esfuerzos en el contacto con un menor desplazamiento.

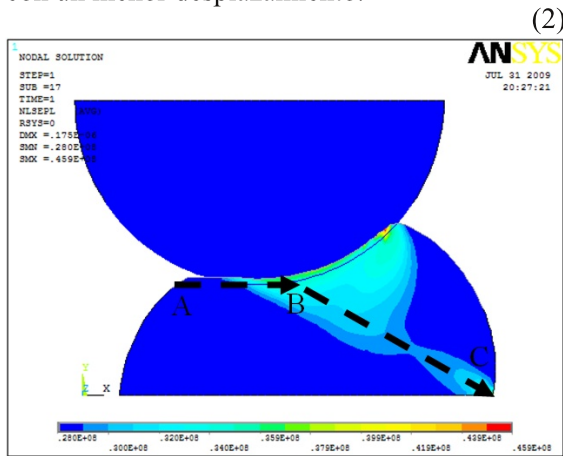


Figura 3d. Comportamiento de los esfuerzos equivalentes plásticos del par de contacto DLC-UHMWPE. Incluye la influencia de la fricción y el trabajo de adhesión.

También a causa de cada incremento del desplazamiento y las propiedades del material de indentación, los esfuerzos plásticos equivalentes crecen. El crecimiento de estos esfuerzos indica una nueva dirección de deformación. La deformación crece de los segmentos A a B y

posteriormente de B a C al igual que las Figuras 3b y 3c.

Para los modelos de las Figuras 4a y 4b, se aplica el método Shankar y Mayuram (Shankar & Mayuram, 2008) al utilizar la ecuación de Archard con 1 % y 2.5% de traslape del radio principal, y posteriormente en la Figura 4c se aplican ambos métodos, es decir Shankar y Mayuram y el método de Energía (Rodríguez et. al., 2010) con un 40% de traslape del radio principal.

En la Figura 4a se visualiza la cantidad de penetración que existe durante la indentación en el intervalo de $0 < X/X_c < 1$. Cabe mencionar que el comportamiento de la profundidad de desgaste (PD) es similar para el modelo con fricción y fricción más adhesión, es decir, que la PD no se afecta significativamente por el trabajo de adhesión en algunos puntos de la interacción. Por lo tanto, sólo se grafican los valores con fricción y sin fricción.

En la Figura 4a se observa que los puntos D, E y G tienen diferencias, las cuales se muestran para comparar los modelos con fricción y sin fricción.

Profundidad de desgaste en el UHMWPE

$$S = 0.0125 \mu\text{m}$$

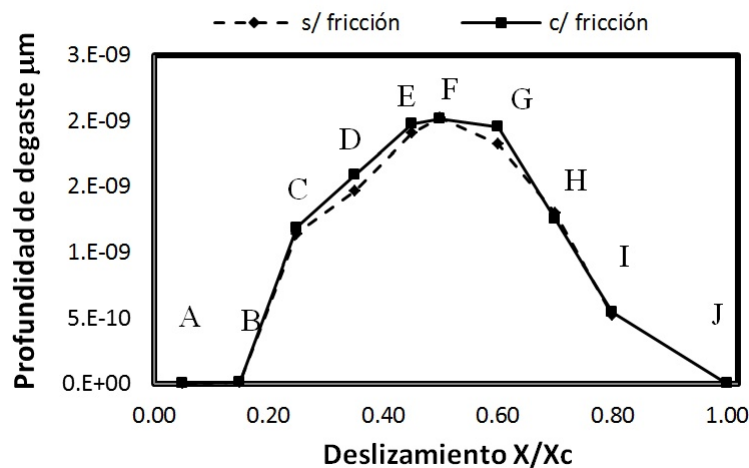


Figura 4a. Gráfica de profundidad de penetración durante la indentación en el UHMWPE. Las ordenadas indican la profundidad en micrómetros y las abscisas indican el cociente del deslizamiento.

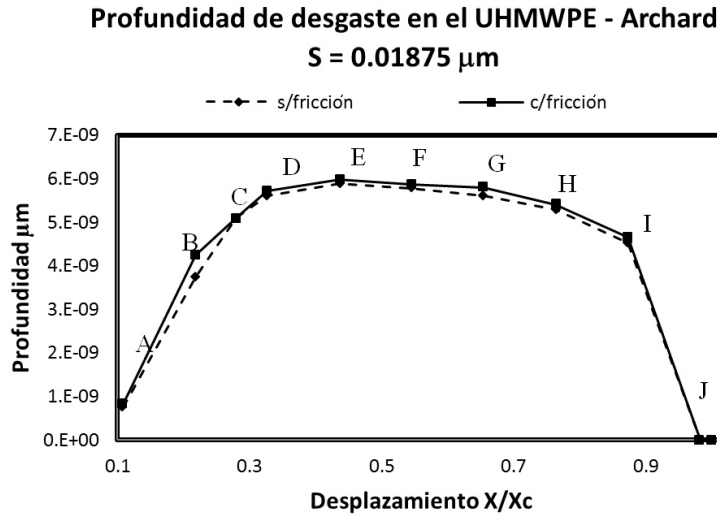


Figura 4b. Gráfica de profundidad de penetración durante la indentación en el UHMWPE. Las ordenadas indican la profundidad en micrómetros y las abscisas indican en cociente del desplazamiento.

Para este caso, el punto F presenta una profundidad máxima de desgaste a la mitad de la indentación para los dos modelos. En la Figura 4b, existe mayor profundidad de penetración para el modelo con fricción. El comportamiento de profundidad tiene características similares a la Figura 4a. Si se observa detenidamente, el valor de traslape es pequeño y el área de contacto también es pequeña

en los casos de las Figuras 4a y 4b.

La gráfica de la Figura 4c presenta un comportamiento diferente a los anteriores traslapes al aplicar los métodos de Energía y Shankar y Mayuram, es decir, en los traslapes $S=0.0125 \mu\text{m}$ y $S=0.01875 \mu\text{m}$ el modelo sin fricción tiene una profundidad de desgaste menor que el modelo

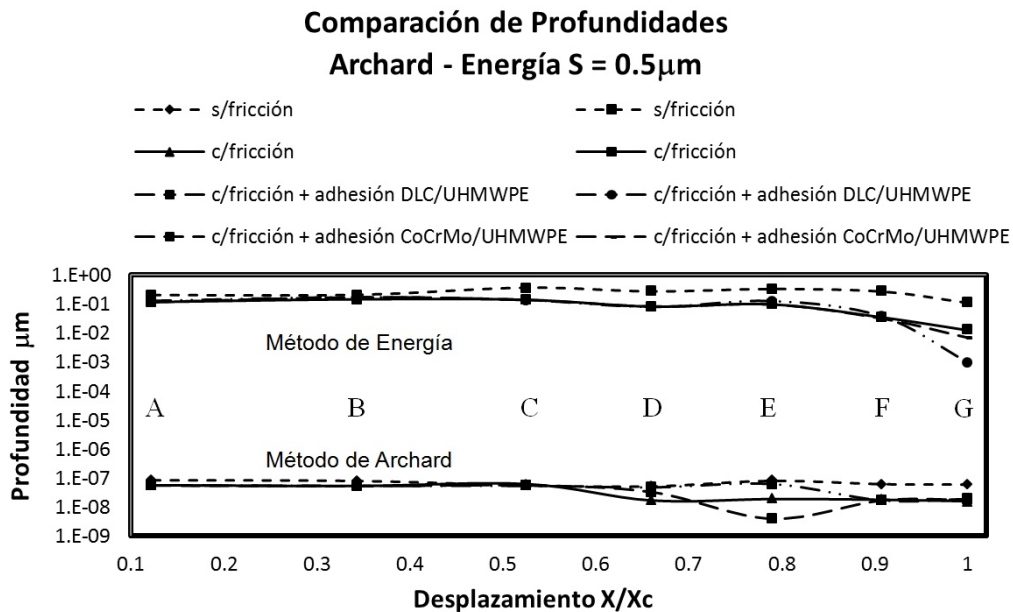


Figura 4c. Gráfica de comparación profundidades de desgaste del método de Energía y el método de Archard. Las ordenadas indican la profundidad en micrómetros y las abscisas indican en cociente del desplazamiento.

con fricción. Sin embargo, el comportamiento en el traslape $S=0.5 \mu\text{m}$ indica que la profundidad de desgaste es mayor con el modelo sin fricción que cuando se incluye la fricción. Este comportamiento se atribuye al comportamiento de las fuerzas sobre el área, que se traducen a esfuerzos plásticos equivalentes. Los esfuerzos están concentrados en un área pequeña en el modelo sin fricción, mientras que en el modelo con fricción los esfuerzos se distribuyen en un área más grande. Esto causa que los esfuerzos en el modelo sin fricción sean mayores a causa de la distribución en un área pequeña y por lo tanto la profundidad de desgaste es mayor.

Con el método de Archard en la Figura 4c, se obtuvieron profundidades de desgaste en picómetros, es decir con valores alrededor de $h=1e^{-12} \text{ m}$ ó $h=1e^{-6} \mu\text{m}$. Los resultados que se obtuvieron indican que el desgaste que sufre la cresta inferior, es superficial; a pesar de que el comportamiento de las simulaciones indica lo contrario, es decir que el valor de la profundidad se encuentra en micrómetros. Para el método de Energía se observa que la magnitud de la profundidad de desgaste está en el intervalo de $h=1e^{-6} \text{ m}$ a $h=1e^{-9} \text{ m}$. Se observa que la profundidad de menor magnitud corresponde al modelo del DLC/UHMWPE e igualmente se comparan las magnitudes de las profundidades que se obtuvieron por ambos métodos. Se observa que las profundidades de mayor magnitud son las del método de Energía, las cuales se validan con las simulaciones.

En la Figura 4c, para el método de Energía la comparación de las profundidades de los modelos con fricción y fricción mas adhesión presenta un comportamiento de penetración similar hasta el punto F, con una disminución de profundidad en el punto G del modelo DLC/UHMWPE de fricción más adhesión; sin embargo el modelo sin fricción tiene variaciones partiendo del punto A hasta el G, con una notoria diferencia en la profundidad

con respecto a los otros modelos, atribuido a la concentración de los esfuerzos y a la falta de oposición del deslizamiento del DLC sobre el UHMWPE.

Para el método de Archard, los modelos de fricción y fricción más adhesión presentan comportamiento de penetración similar del punto A hasta el punto C, donde también coinciden todos los modelos y a su vez es el punto de inflexión en el comportamiento de penetración de estos modelos; del punto C al F todos los modelos varían su profundidad de desgaste, después en este punto los modelos con fricción y fricción más adhesión nuevamente tienen un mismo comportamiento de F a G, sin embargo el modelo sin fricción presenta una mayor profundidad con respecto a los otros.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El cálculo de profundidad de desgaste de Archard se rige por la ecuación $dh=K_w pds$, mientras que el método de Energía utiliza los puntos máximos de energía de distorsión para iniciar un corte. Estos puntos de energía se localizan mediante coordenadas y para construir el área de corte en el modelo.

La característica del método de Shankar y Mayuram, que utiliza la ecuación de Archard para el cálculo del desgaste es que considera un coeficiente experimental, la presión y la distancia del deslizamiento para determinar la profundidad de penetración y por tanto sólo calcula el “volumen desplazado o de deformación”

La cualidad del método de Energía propuesto en (Rodríguez et. al., 2010), es que determina a detalle el desgaste abrasivo y por deformación al calcular el punto de energía máximo durante la interacción; además incluye el criterio de E. Rabinowicz (Rabinowicz, 1995) para sumar la influencia del desgaste adhesivo.

El efecto de la fricción en el desgaste por abrasión puede presentar comportamientos distintos, a causa del traslape:

Cuando existe un traslape pequeño, la concentración de presión es mayor a causa de un área pequeña, $r \ll R$. Con esto, cuando se considera la fricción, la profundidad de penetración y el volumen que se pierde son mayores que cuando no se considera la fricción.

Cuando el traslape es grande, el área que se genera en el contacto y la indentación es grande, $r \leq R$, y por lo tanto la concentración de presión es menor. Cuando se considera la fricción, la profundidad de penetración y el volumen que se pierde son menores que cuando no se considera la fricción.

CONCLUSIONES

El desgaste abrasivo, que se calculó por el método de Energía y el método de Archard, está en función de la fricción y el radio de contacto; es decir que durante el contacto, si se considera la fricción, la presión disminuye cuando el área de la interacción se incrementa. Esto disminuye la profundidad de penetración la cual es proporcional a la presión.

El desgaste por deformación se presentó en los modelos con fricción, ya que la fricción se opone al deslizamiento del indentador, lo cual se traduce en esfuerzos plásticos que sobrepasan el esfuerzo de fluencia y por tanto el material comienza a deformarse.

El desgaste adhesivo, de acuerdo con Rabinowicz, está en función del aumento o disminución de la energía volumétrica, por tanto con la presencia de la fricción existen menores probabilidades de que exista desgaste adhesivo, ya que los esfuerzos normales se distribuyen y se reducen, lo cual disminuye el valor de la energía volumétrica.

La fricción tiene efecto sobre los tres tipos de desgaste, por lo tanto la finalidad de este trabajo, es mostrar su influencia para posteriores investigaciones.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue llevado a cabo bajo un proyecto financiado por Conacyt, No. 91019 y DGEST No 882.08. César Maza agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACyT por el otorgamiento de la beca.

REFERENCIAS

- Bhushan, B. (Ed.), 2002, "Introduction to Tribology", John Wiley and Sons, New York.
- Johnson, K. L., 1985, "Contact Mechanics", Cambridge University Press.
- Paul A. Williams, Kengo Yamamoto, Toshinori Masaoka, Hironobu Oonishi, Ian C. Clarke, 2007, "Highly Crosslinked Polyethylenes in Hip Replacements: Improved Wear Performance or Paradox?", Tribology Transactions, 50: 277-290.
- R.M. Hall, A Unsworth, B.M. Wroblesky. P. Siney, N. J. Powell, 1997, "The Friction of Explanted Hip Prostheses, British Journal of Rheumatology, 30, 20-26.
- Rabinowicz E., 1995, "Friction and Wear of Materials", Second Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- Rodríguez, L., et. al. 2010, "An energy based method for wear analysis of a CrCoMo-UHMWPE and DLC-UHMWPE couples for hip prosthesis"
- S. Ravichandran., 2006, "Mitigating Osteolysis in Clinical Total Hip Arthroplasty: The Role of Polyethylene Wear in Limiting the Life of Biomechanical Hip Implants", Undergraduate Research Journal for the Human Sciences, volume 5, Case Western Reserve University.
- S. Shankar S., Mayuram M. M., 2008, "Sliding interaction and wear studies between two

- hemispherical asperities based on finite element approach”, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Madras, India
- Sadd, M. H., 2005, “Elasticity: Theory, Applications and Numerics”, Ed. Elsevier, USA
- Schey, J.A., 1996, “Systems View of Optimizing Metal on Metal Bearings”, *Clinical Orthopaedics Research*, N. 329S, pp. S115-S127
- Clinical Orthopaedics Research*, N. 329S, pp. S11-S34.
- Schmidt, M., et. al., 1996, “Cobal Chromium Molibdenum Metal Combination for Modular Hip Prostheses”, *Clinical Orthopaedics Research*, N. 329S, pp. S35-S47.
- Timothy McTighe, Ying Ko, Ph.D., Russell B. Bennett, James Adams, 1995, “A new approach to bearing surfaces for total hip arthroplasty”, AAOS meeting New Orleans, Louisiana.
- Willert, H.G. and Semlitsch, M.; 1977, “Reactions of the Articular Capsule to Wear Products of Artificial joint Prostheses”, *J.Biomed. Mater. Res.*, 11:157.