

Modelado y simulación del contacto lubricado en una prótesis total de rodilla: metal-metal o cerámica-cerámica

José Di Paolo, Marcelo E. Berli, Diego M. Campana y Sebastián Ubal, Grupo Biomecánica Computacional, Facultad de Ingeniería, UNER, e-mail: jdipaolo@bioingenieria.edu.ar

Introducción

La performance mecánica de las prótesis (ver figura 1) respecto a la rodilla natural es muy baja, siendo el desgaste y la consecuente liberación de partículas de polietileno la causa más frecuente para su remoción. El desgaste puede ser disminuido modificando las propiedades mecánicas de los materiales, la geometría del implante y la velocidad de deslizamiento, aspectos que influyen fuertemente sobre la formación de la película de fluido lubricante que evita el contacto sólido – sólido (Di Paolo, 2006).



Figura 1: radiografía de una prótesis implantada

Con este fin y alternativamente, se están estudiando y desarrollando prótesis totalmente rígidas y de gran dureza, las cuales podrían tener una mayor duración una vez implantadas (Hutchings, 2003; Udofia, 2003). El acabado superficial de los materiales empleados en prótesis también influye el desgaste y el régimen de lubricación desarrollado (Hutchings, 2003; Berli, 2008), pudiendo éste ser de película completa, mixta o de frontera. Los estudios sobre prótesis construidas con metal sobre metal (MOM) o cerámica sobre cerámica (COC), han sido inspirados en la reducción de las tasas de desgaste, evitando la osteólisis y el aflojamiento aséptico producto de las partículas de polietileno de las prótesis convencionales, como también por presentar menores rugosidades superficiales (Hutchings, 2003). Adicionalmente, un factor importante en la reducción del desgaste es el régimen de lubricación que en una prótesis -como en la rodilla natural- lo posibilita el líquido sinovial, el cual posee características no-newtonianas (Di Paolo, 2006), que inducen cambios en el espesor de la película lubricante. Por ello, el espesor de fluido entre los elementos en contacto es el parámetro más importante a ser estudiado cuando se aborda un diseño (Chaoimleffel, 2007) para asegurar una vida útil lo más larga posible.

En este trabajo se modela la zona de contacto lubricado en una prótesis total de rodilla cuyos componentes femoral y tibial se suponen construidos con un material de muy alta rigidez (indeformable a los fines del

modelado), lubricados por un fluido no newtoniano (líquido sinovial). El mismo se resuelve para las condiciones de la articulación durante la fase de apoyo, con el objetivo de determinar las relaciones óptimas entre factores geométricos, carga de la articulación y espesores de película que superen a las rugosidades superficiales de los materiales.

Materiales y métodos

El modelo propuesto se basa en las siguientes hipótesis simplificadoras: 1) Aproximación de lubricación; 2) Fluido no newtoniano (pseudoplástico) modelado como ley de potencia; 3) Flujo laminar, unidireccional y Couette dominante. Estado estacionario; 4) Velocidades tangenciales de deslizamiento promedio en la articulación; 5) Fuerzas de torsión despreciables actuando en la articulación; 6) Rugosidad superficial despreciable; 7) Temperatura constante.

Las ecuaciones que gobiernan el problema surgen de plantear los balances de masa y cantidad de movimiento al canal de flujo mostrado en el esquema equivalente de la Figura 2 (Di Paolo, 2006). La generación de presión en el fluido, en función de la viscosidad y la altura del canal de flujo están relacionadas por la ecuación de Reynolds. Bajo la hipótesis de estado estacionario, el modelo se resuelve asumiendo valores de los parámetros correspondientes a la fase de apoyo de la marcha. Los valores representativos para ambas fases son la carga y la velocidad. La ecuaciones no se exponen en el presente artículo por razones de espacio disponible.

El sistema no lineal de ecuaciones fue resuelto con un robusto algoritmo basado en el método de elementos finitos e implementado por los autores en FORTRAN.

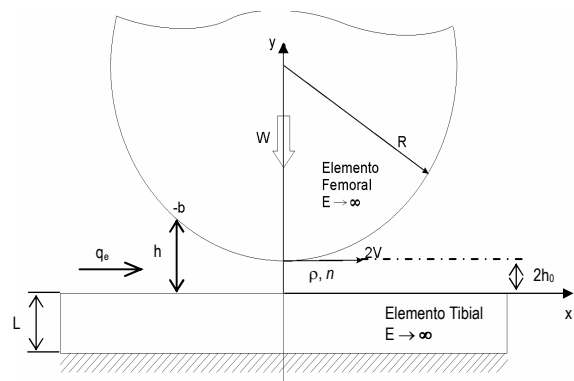


Figura 2: esquema equivalente del contacto entre el elemento femoral y el tibial

Resultados y discusión

En la Figura 3 se exponen resultados en términos de los parámetros más representativos para abordar el diseño de las prótesis de rodilla desde el punto de vista de la

teoría de la lubricación. En el eje de abscisas el parámetro adimensional que relaciona la viscosidad a la entrada del canal con la velocidad y la carga específica y, en el eje de ordenadas, el parámetro (también adimensional) que relaciona la altura de película lubricante mínima con el radio del cilindro (ver Figura 3).

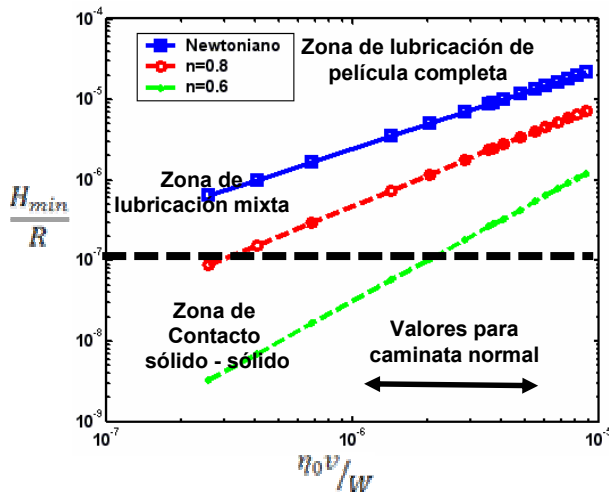


Figura 3: zonas de lubricación posibles en función de parámetros adimensionales, de carga y espesor.

Las curvas indican que al incrementarse la velocidad de operación de la junta o disminuir la carga, el sistema responde con mayores películas de lubricación.

En el diseño de prótesis de rodilla será deseable que éstas siempre se encuentren en régimen de película completa, donde las separaciones mínimas de las superficies sean al menos tres veces la rugosidad conjunta del material. Para la geometría considerada en este trabajo, un grado de conformidad del 95% (relación entre los radios femoral y tibial) y rugosidades combinadas de 80 nm -correspondientes a una prótesis CoCrMo/CoCrMo (Scholes, 2003), es posible trazar una línea paralela al eje de las abscisas determinando el mínimo valor de H_{min}/R para este diseño, por encima del cual, cualquier valor del parámetro adimensional $\eta_0 v/W$, se corresponde con un régimen de película completa. La prótesis en diseño debería poseer un H_{min}/R por encima del mínimo. No cumplido este requisito, el mismo se consigue modificando R u optando por materiales que permitan mejores acabados superficiales. Es evidente que las rugosidades de los materiales influenciarán el régimen de lubricación, dependiendo del material éstas pueden variar entre 80 nm y 5 nm (Scholes, 2003).

De los resultados se observa que para fluidos newtonianos puede asegurarse un régimen de lubricación de película completa, sin embargo este no es el caso más real, ya que el líquido sinovial tiene características pseudoplásticas.

Sin embargo, el empleo de alúmina de tercera generación en la construcción de las prótesis, dadas su extrema dureza y las muy bajas rugosidades superficiales aseguraría, aún en el caso más exigente

(fase de apoyo), la formación de una película de lubricación.

Mayores grados de conformidad favorecerían la formación de una película de lubricación, pero un exceso podría provocar limitaciones en el movimiento de la articulación, fundamentalmente en el plano transversal, lo que conduciría al desarrollo de altos torques que terminen aflojando el componente tibial.

Conclusiones

Se han obtenido predicciones de alturas de película lubricante mínimas bajo condiciones de estado estacionario para distintas relaciones entre velocidad media, viscosidad y carga, para una prótesis total de rodilla metal – metal o cerámica – cerámica. Se concluye que la formación de una película lubricante depende sensiblemente de los parámetros geométricos de la prótesis, como también de las rugosidades del material y la característica pseudoplástica del fluido lubricante. Es importante destacar que para evitar el contacto directo entre los componentes de las prótesis MOM o COC, éstas debieran contemplar grados de congruencia cercano al 95 %, cuidando que ello no limite el movimiento de la articulación sobre otros ejes. Los resultados mostrados en éste trabajo indican que el régimen de lubricación que predominaría sería el de lubricación mixta, sin embargo podría presentarse lubricación de película completa atendiendo al grado de conformidad y las terminaciones superficiales de los componentes.

Referencias bibliográficas

- Berli M, Campana D M, Ubal S and Di Paolo J, Lubrication model of a knee prosthesis, with non newtonian fluid and porous rough material, Latin American Applied Research, in press.
- Chaomleffel J P, Dalmaz G, Vergne P. Experimental Results and Analytical Predictions of EHL Film Thickness, **Vol. 40**, pp 1543-1552, 2007.
- Di Paolo J y Berli M. Numerical análisis of the effects of material parameters on the lubrication mechanism for knee prosthesis. *Computational Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* **Vol. 9**, pp 79-89, 2006.
- Hutchings I M. Biotribology – A personal View. Friction, Lubrication and Wear of artificial Joints. Chapter 1 Professional Engineering Publishing, UK 2003.
- Scholes S C, Smith S L, Ash H E and Unsworth A. The lubrication and friction of conventional UHMWPE, novel compliant layer, and hard bearing surfaces for use in total hip prosthesis. Friction, Lubrication and Wear of artificial Joints, Chapter 5, 2003.
- Udofia I J, Jin Z M. Elastohydrodynamic lubrication analysis of metal-on-metal hip-resurfacing prosthesis. *Journal of Biomechanics* **Vol. 36** pp 537-544, 2003.