

Articulaciones sinoviales artificiales de alta movilidad: investigaciones para el desarrollo de prótesis de por vida

Tesista: Bioing. Brenda Anahí Weiss

Los implantes metal-polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) –implantes MoP– son los más populares para el reemplazo de articulaciones de cadera y rodilla. Las consecuencias del desgaste de las superficies protésicas constituyen el principal factor limitante de su vida útil, la cual resulta insatisfactoria para pacientes jóvenes. Al igual que las articulaciones naturales, el implante está lubricado con fluido sinovial.

Esta Tesis tiene como objetivo general *investigar, desde el marco de la Mecánica Computacional el fenómeno de contacto lubricado entre las superficies de los componentes de prótesis para miembro inferior, con el fin de predecir combinaciones de parámetros geométricos, materiales y operativos que aseguren la existencia de una película lubricante que evite el contacto sólido-sólido entre las partes, y que además minimicen la fricción, con el objeto de incrementar la vida útil del implante.*

Los mecanismos de lubricación predominantes durante el ciclo de marcha son la lubricación por aplastamiento de la película lubricante (fase de contacto inicial) y la lubricación elasto-hidrodinámica (fase de apoyo simple). En esta última, los componentes deslizan entre sí impulsando fluido hacia la zona de contacto, donde se forma un canal de lubricación y el fluido se presuriza deformando las superficies lubricadas. El acoplamiento de las ecuaciones gobernantes y su no linealidad dificultan la convergencia del algoritmo de solución simultánea, especialmente para situaciones de carga elevada. En la mayoría de los trabajos publicados hasta el presente, la ecuación de Reynolds y la ecuación de deformaciones elásticas se resuelven en forma desacoplada. Usualmente se realizan fuertes simplificaciones: i) el fluido sinovial se asume como fluido newtoniano o newtoniano generalizado (a pesar de su comportamiento viscoelástico y pseudoplástico), ii) se utilizan viscosidades relativamente grandes; iii) se ignora la curvatura de las superficies articulares; iv) y en ocasiones, se ignora la deformabilidad del cartílago hialino y del UHMWPE.

Uno de los principales aportes de esta Tesis es el *desarrollo de un modelo de lubricación* que satisface las características descriptas en el primer objetivo específico de esta Tesis:

- a. *Apto para su aplicación en articulaciones naturales y protésicas de cadera y rodilla.* El modelo Elipsoide sobre Plano deformable (EoPE) contempla la curvatura de las superficies articulares y su deformabilidad.
- b. *Factible de resolverse mediante métodos numéricos.* Se utiliza el software comercial COMSOL Multiphysics, basado en el método de elementos finitos.
- c. *Que posibilite el análisis de los fenómenos predominantes de lubricación (lubricación por aplastamiento de la película y lubricación elastohidrodinámica).*
- d. *Que contemple la deformación de las superficies articulares que delimitan el canal de flujo.* La deformación se obtiene a partir de la resolución de las ecuaciones de elasticidad lineal o a partir del modelo simplificado de columna.
- e. *Que considere al líquido sinovial como fluido no-Newtoniano.* La ecuación constitutiva de Phan-Thien y Tanner (PTT) para fluidos viscoelásticos no lineales, es considerado como uno de los modelos más realistas para describir el comportamiento de este tipo de soluciones. Se detalla el trabajo analítico que da lugar a la ecuación de Reynolds modificada aplicable a la lubricación de película delgada con fluidos de PTT.

En el desarrollo de este modelo, se deriva que la viscosidad aparente del fluido sinovial PTT muestra un comportamiento cualitativo similar al modelo pseudoplástico de Cross, capturando apropiadamente observaciones experimentales. Sin embargo, a diferencia del modelo de Cross, las componentes del tensor de tensiones viscosas dependerán de un parámetro (ξ) del fluido viscoelástico PTT.

El segundo objetivo específico de esta Tesis consiste en *delinear procedimientos numéricos y construir un algoritmo de solución de las ecuaciones que permita estudiar un amplio rango de parámetros, de diseño y operativos, y sea independiente de complejas estimaciones iniciales de las variables.* Se emplearon dos estrategias para facilitar la convergencia; ambas consisten en la obtención de resultados para cargas gradualmente crecientes, utilizándose como inicialización en cada cálculo los resultados obtenidos para una carga inferior.

La no linealidad de las componentes del tensor de tensiones viscosas del fluido PTT conduce a la estimación de algunas variables en términos de sus análogos Newtonianos (obtenidos a partir de la solución simultánea de las ecuaciones gobernantes del mismo problema pero considerando al fluido como newtoniano). Posteriormente se resuelven – simultáneamente– las ecuaciones gobernantes del problema con fluido PTT .

Los últimos objetivos específicos proponen: a) *Obtener resultados para los fenómenos de lubricación por aplastamiento y lubricación elastohidrodinámica* y b) *analizar la influencia de los parámetros materiales, operativos y geométricos en la performance de la prótesis*. Si bien el modelo desarrollado es aplicable a una amplia variedad de fenómenos que involucren un proceso de lubricación de juntas, se presentan resultados correspondientes a prótesis de rodilla de tipo MoP.

Se resuelven las ecuaciones gobernantes para el caso de la lubricación por aplastamiento, se valida el modelo y estrategia de resolución contrastando con resultados publicados por otros autores, se analiza la influencia del modelo geométrico y del modelo de deformación, y se realizan estudios paramétricos (variando la constante de relajación del fluido λ , el módulo de elasticidad y el espesor del material polimérico y los radios equivalentes del elipsoide) a fin de orientar el desarrollo de prótesis de rodilla. Se obtienen resultados considerando la lubricación elastohidrodinámica adoptando distintas λ , se realiza una comparación con resultados publicados por otros autores y se predice el régimen de lubricación en base a los resultados obtenidos en esta Tesis.

Los resultados manifiestan la importancia de un modelado apropiado para obtener información cuantitativa. El espesor de película lubricante disminuye al aumentar λ (aumento de la naturaleza elástica del fluido). Modelar al fluido como un fluido PTT conduciría a predicciones más conservadoras, en comparación con asumirlo newtoniano, ya que el espesor de la película lubricante no sería sobre-estimado. El aumento de λ conduce a la reducción del coeficiente de fricción y del coeficiente de fricción relativo, lo cual podría explicar parcialmente las mejores propiedades tribológicas de articulaciones sanas y jóvenes, las cuales presentan mayores λ respecto a articulaciones patológicas o envejecidas.

Los resultados sugieren que, mientras el régimen de lubricación sea de película delgada (lo cual sucede con $\lambda \leq 2,5 \times 10^{-5} s$), la viscosuplementación y consiguiente aumento de λ conduciría a menores coeficientes de fricción.

Trabajos futuros se centrarán en la simulación simultánea de la lubricación elastohidrodinámica y por aplastamiento, la exploración de otras combinaciones de parámetros, la incorporación del fenómeno de exudación presente en articulaciones naturales y la incorporación de modelos de deformación viscoelástica del sustrato.