

DETERMINACIÓN DE LAS PRESIONES DE CONTACTO EN EL POLIETILENO DE PRÓTESIS DE RODILLA. ESTIMACIÓN DE VIDA A FATIGA

S. Calvo*, J.L. Núñez*, B. Calvo**, M.A. Martínez**

*Área de Mecánica y Nuevos Materiales
Instituto Tecnológico de Aragón (ITA)
María de Luna, 8. 50018. Zaragoza, España. Tfno.- 976-71-60-50 Fax.- 976-71-62-01
e-mail.- scalvo@ita.es

**Área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Departamento Ingeniería Mecánica
Centro Politécnico Superior de la Universidad de Zaragoza
María de Luna, 3. Edificio B. 50018. Zaragoza, España. Tfno.- 976-76-10-00. Fax.- 976-76-25-78
e-mail.- bcalvo@posta.unizar.es

Resumen. El polietileno entrecruzado de ultra alto peso molecular (UHMWPE) está siendo utilizado en la actualidad en implantes ortopédicos debido a la mejora que muestra en resistencia al desgaste del material. Es necesario cuantificar la resistencia a fatiga y la resistencia a la propagación de grietas en este tipo de polímeros cuando se encuentran sometidos a aplicaciones de carga cíclicas para realizar un diseño óptimo de prótesis. En el presente trabajo se analiza la vida a fatiga de la componente de polietileno correspondiente a una prótesis ultra- congruente de rodilla teniendo en cuenta diferentes propiedades del material definidas mediante la relación de Basquin.

Para ello, inicialmente, se realiza el estudio de las presiones y áreas de contacto que aparecen en la componente de polietileno a lo largo del ciclo de la marcha mediante un análisis por elementos finitos utilizando el programa comercial ABAQUS v. 6.3. Posteriormente, a partir de los resultados en tensiones se estima la vida a fatiga del componente objeto de estudio de acuerdo al método de vida total o S-N, con el software MSC/Fatigue v. 2004. Con estos análisis se pretende estudiar la influencia en la vida a fatiga que en el polietileno de ultra alto peso molecular tienen los tratamientos térmicos y los distintos procesos de radiación a los que se someten para mejorar sus propiedades.

Abstract. Crosslinked ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) is being used in orthopaedic devices since improves wear characteristics. It is needed to quantify the fatigue and crack propagation resistance of the crosslinked polymer when are submitted to cyclic loading applications to achieve optimum designs. In the current work, fatigue life of polyethylene component belonging to a high congruent knee prosthesis is analysed and different material properties are taken into account by means of the Basquin's equation. Firstly, pressure and contact areas obtained on the polyethylene component along the gait cycle are studied using the commercial FE software ABAQUS v. 6.3. Secondly, fatigue life according to the S-N method is estimated on the component from the previous FE results in terms of stresses, using the MSC/Fatigue v. 2004 software. The final aim of these analyses is to analyse the influence in the fatigue life due to thermal and irradiation processes performed on the ultra high molecular weight polyethylene.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, como la mayoría de los componentes y estructuras, el diseño de prótesis de rodilla se realiza con la ayuda del diseño asistido por ordenador (CAD), análisis estructurales basados en el método de los elementos finitos (MEF) y estimaciones numéricas de vida a fatiga.

El uso conjunto de los dos primeros métodos permite la determinación de variables tales como tensiones, deformaciones, presiones, áreas de contacto y la investigación del comportamiento de prótesis con

diferentes diseños sin la necesidad de construir prototipos físicos iniciales. La evaluación de las áreas de contacto y de las presiones en prótesis totales de rodilla es un aspecto muy importante para prevenir fallos prematuros de las mismas [1]. La distribución de presiones en la componente de polietileno de estas prótesis depende de la cinemática de la articulación así como del diseño de las superficies articulares, la posición relativa de los componentes y de la tensión de los tejidos blandos limítrofes. En este trabajo se han obtenido estas variables en una prótesis ultra-congruente de rodilla.

El tercero de los métodos, principal objeto de este artículo, permite determinar la vida a fatiga del componente analizado. Para ello son necesarios los resultados en términos de tensiones y deformaciones que se producen en la componente de polietileno de la prótesis de rodilla, obtenidos del análisis realizado mediante el método de los elementos finitos, cuando se reproduce el ciclo de marcha humano, y la caracterización a fatiga del polietileno empleado en la fabricación de la prótesis.

En el presente estudio, el ciclo real de marcha que aparece de forma cíclica sobre la componente de polietileno se ha simplificado considerando tan sólo cargas estáticas correspondientes a puntos concretos del ciclo de marcha humano, dejando para estudios posteriores la simulación completa de la cinemática de la articulación.

En cuanto al tipo de material empleado en los implantes ortopédicos, desde hace más de 25 años se utiliza el polietileno entrecruzado de ultra alto peso molecular (UHMWPE) debido a la mejora que muestra en resistencia al desgaste del material. Sin embargo, tan sólo en los últimos años el procedimiento de entrecruzado ha sido realizado de manera controlada [2-3].

Es conocido que la deformación plástica es el mecanismo responsable del endurecimiento por deformación observado en el polietileno de ultra alto peso molecular no entrecruzado.

Un alto grado de entrecruzamiento produce una reducción en la movilidad de la cadena en la región amorfa, y aunque estos polímeros son susceptibles de tener endurecimiento por deformación, muestran una mejora sustancial de la resistencia al desgaste cuando interactúan con los componentes protésicos realizados en aleación de Co-Cr o aleación de Titanio.

Aunque el "entrecruzamiento" del UHMWPE se ha visto como la solución a los problemas de fallo en prótesis debido a la mejora que presenta en el comportamiento al desgaste, es conocido que modifica la resistencia a fatiga y a la propagación de grieta del material, convirtiendo en estudio obligado la relación entre el grado de "entrecruzamiento" y las propiedades de fatiga.

Este trabajo analiza la vida a fatiga en la componente de polietileno de una prótesis de rodilla teniendo en cuenta el método de vida total o método S-N. Las estimaciones de vida pretenden determinar como afecta el grado de "entrecruzamiento" a la resistencia a fatiga en UHMWPE. Se estudian materiales sometidos a tres dosis diferentes de radiación gamma seguida de un tratamiento térmico de templado para eliminar radicales libres.

Así, el objetivo final del presente trabajo es el desarrollo de una metodología que permita mejorar el diseño de prótesis de rodilla mediante herramientas numéricas

dado el alto coste y la dificultad que acarrear la medición de parámetros in vivo que permitan diagnosticar y estimar con anticipación cuando aparecerán problemas de daño y desgaste en la articulación.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En el presente trabajo se estudia el implante de polietileno de una prótesis de rodilla ultra-congruente que está formada además por la componente femoral y por la componente tibial, ambas fabricadas en aleación de Cr-Co, como puede observarse en la Fig. 1.

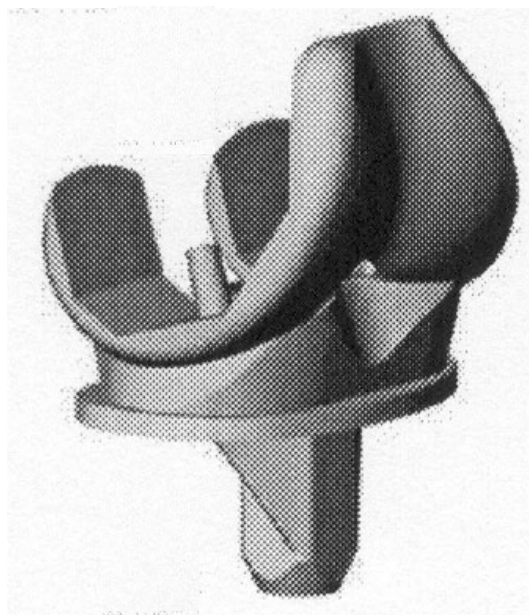


Fig. 1. Prótesis de rodilla ultra-congruente

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

3.1. Modelo de elementos finitos

El modelo de elementos finitos se ha dibujado y mallado con el programa de CAD i-DEAS. Los análisis se han realizado con el programa comercial ABAQUS v.6.3.

En el modelo se han utilizado cinco tipos diferentes de elementos, todos ellos disponibles en la biblioteca de ABAQUS. Para la modelización del polietileno se han empleado elementos sólidos del tipo C3D4, C3D6, C3D8 para lograr un buen ajuste a la geometría del modelo. Para la modelización de las superficies rígidas se han empleado elementos tipo placa, R3D4. Finalmente, se han colocado 4 elementos muelle para simular los tendones que van unidos a la prótesis y así evitar problemas de convergencia. En la Fig. 2 se muestra el modelo de elementos finitos.

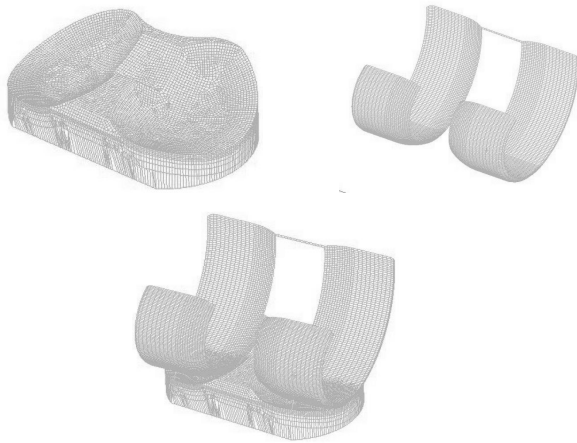


Fig. 2. Modelo de elementos finitos

3.2. Material

El material considerado en los cálculos es elastoplástico, homogéneo e isótropo. En la tabla 1 se recogen las principales características mecánicas del mismo. En la tabla 2 se recogen los datos que definen la curva plástica del material.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del polietileno utilizadas en el análisis de elementos finitos.

Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson
940	0.46

Tabla 2. Pares de datos tensión-deformación que definen la curva plástica del material.

Tensión (MPa)	Deformación plástica
13.774	0
21.740	0.0401
26.265	0.152

3.3. Hipótesis de carga y restricciones

Se estudian las tensiones y las presiones de contacto producidas por cargas estáticas y situando la componente femoral en cinco posiciones diferentes del ciclo de marcha. Las posiciones analizadas se corresponden con unos ángulos de flexión de 0°, 15°, 60°, 90° y 110° formados entre el implante de polietileno y la componente femoral.

Cada una de las cinco hipótesis de carga se compone de dos pasos el primero de ellos es únicamente para alcanzar el equilibrio y forzar a que los diferentes componentes entren en contacto, por tanto no hay cargas aplicadas. En el segundo paso es donde se aplican las fuerzas estáticas, que en el estudio realizado se han simplificado considerando exclusivamente fuerzas de compresión.

A continuación se describen las restricciones y cargas aplicadas en el modelo de elementos finitos:

- En el primer paso de equilibrio, se restringen todos los grados de libertad en los nodos piloto que controlan las dos superficies rígidas que simulan la componente femoral y la componente tibial de la prótesis.
- En el segundo paso se aplica la carga de compresión:
 - Se restringen todos los grados de libertad en el nodo piloto que controla la componente tibial.
 - Se restringen todos los grados de libertad excepto el desplazamiento vertical (dirección Z) en el nodo piloto que dirige la componente femoral.
 - Se aplica una fuerza de 726 N en dirección Z negativa en el nodo piloto de la componente femoral, que corresponde al peso nominal del cuerpo humano.

4. ESTIMACIÓN DE VIDA A FATIGA

Como se ha comentado en la introducción del presente artículo, la estimación de vida a fatiga se determina a partir de los datos obtenidos en términos de tensiones y deformaciones del análisis realizado mediante el método de los elementos finitos sobre la prótesis de rodilla.

El método de estimación de vida a fatiga utilizado en el análisis es el método de “vida total” o “S-N” y se utiliza el programa comercial MSC/Fatigue v. 2004 [4-5]. A continuación se describen las características del material y las historias de carga utilizados en el postproceso de fatiga.

4.1. Caracterización a fatiga del material

El material base considerado en el análisis es el polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) denominado GUR 1050. Las características de fatiga que definen la curva S-N de este material han sido obtenidas de [2]. Se analizan cinco curvas S-N diferentes con las propiedades que se recogen en la tabla 3. Las diferencias entre las cinco curvas S-N analizadas se debe al diferente tratamiento que se realiza sobre el material base.

Tres grupos de probetas son sometidas a radiaciones gamma y a un tratamiento posterior de templado para obtener polietilenos entrecruzados de alto peso molecular de diferentes densidades. Los otros dos grupos de probetas se utilizan como control para una posterior comparación. Uno de esos grupos no es sometido a ningún tratamiento, y es el que de ahora en adelante se denomina como control. El otro grupo es sometido al mismo tratamiento de templado que los

grupos de probetas irradiadas con objeto de evaluar la influencia de este proceso.

Tabla 3. Propiedades que definen las curvas S-N.

Relación Basquin $S = AN_f^B$	Control	Templado	50 kGy	100 kGy	200 kGy
A	26.24	25.81	23.52	25.95	27.54
B	-0.044	-0.039	-0.043	-0.050	-0.050
R2	0.99	0.97	0.98	0.96	0.96

Estas propiedades a fatiga que se recogen en [2] han sido obtenidas de ensayos experimentales sobre probetas normalizadas (“dogbone”) como la que se muestra en la Fig. 3, realizadas de material base GUR 1050 (Ticona) [6] y con las siguientes propiedades geométricas:

- Longitud: 31.75 mm
- Anchura: 2.7 mm
- Espesor: 2 mm

El ensayo sobre las probetas se realiza con un máquina INSTRON 8511 servohidráulica a temperatura ambiente, a 5 Hz de frecuencia, con una señal de entrada sinusoidal (ver Fig. 3) y en cinco niveles de ensayo. Todos los ensayos son realizados en control por carga con un ratio de carga $R=0.1$.

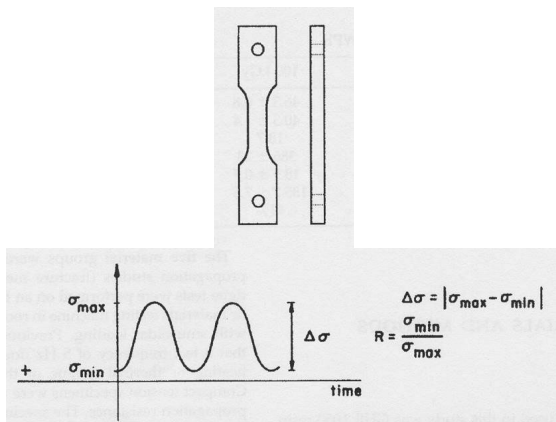


Fig. 3. Probeta e historia de carga empleada en los ensayos de caracterización de fatiga del material

El fallo de la probeta se basa en la deformación plástica asociada al criterio de plastificación del material. Por lo tanto, el número de ciclos al comienzo de la plastificación se monitoriza como una función del rango de tensión nominal para determinar la curva S-N.

En las Fig. 4 y 5 pueden verse las curvas S-N obtenidas de ensayos experimentales [2] y un ejemplo de una de las curvas introducidas en el programa MSC/Fatigue, respectivamente.

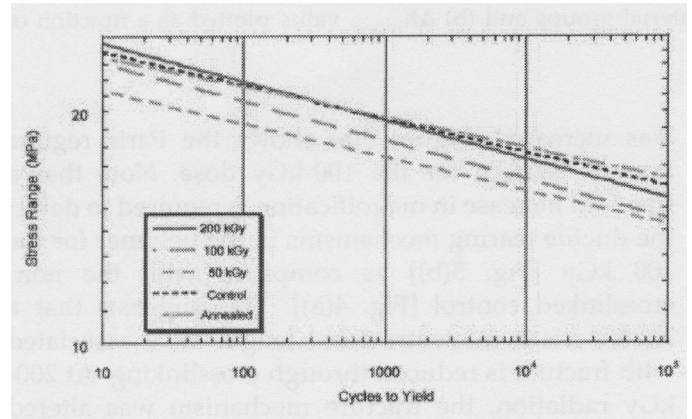


Fig. 4. Resultados de fatiga tensión-vida para los cinco grupos de materiales

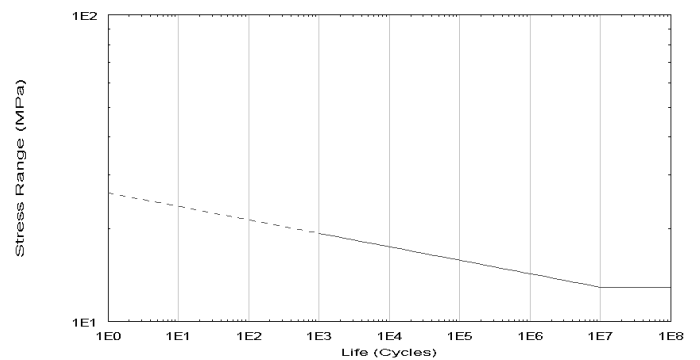


Fig. 5. Curva S-N para el material de control. MSC/Fatigue

4.2. Historia de carga cíclica

Como se ha comentado en la sección 3.3 *Hipótesis de carga y restricciones*, la cinemática del movimiento humano se ha discretizado en el análisis de elementos finitos en varios instantes correspondientes a diferentes posiciones relativas del implante de polietileno y la componente femoral y se ha tenido en cuenta una única carga de compresión para todas las hipótesis analizadas.

En el análisis de fatiga se han considerado cargas escalón unitario para reproducir la sucesión ordenada temporalmente de los casos de carga. Así mediante cargas discretas se reproduce de forma simplificada el ciclo de marcha. En la Fig. 6 se muestra a modo de ejemplo una de las cargas empleadas en el análisis.

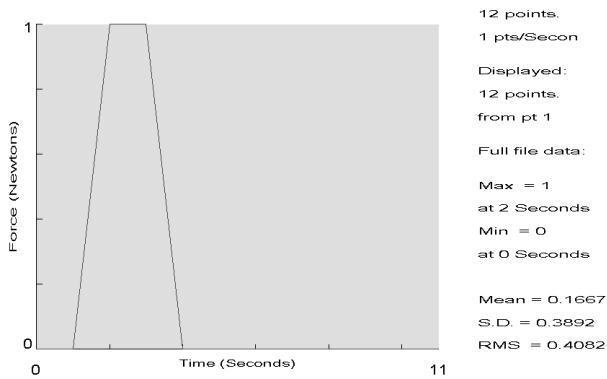


Fig.6. Carga escalón introducida en el análisis para ángulo 15°

4.3. Parámetros de la solución

A continuación se indican las principales características que definen los cálculos de fatiga realizados:

- Teoría considerada en el cálculo: uniaxialidad
- Combinación de tensiones: Máxima absoluta principal
- Corrección de la tensión media: Goodman
- Porcentaje de supervivencia: 50%

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos se analizan en término de logaritmo de vida. En la tabla 4 se recogen los resultados obtenidos de los diferentes cálculos teniendo en cuenta los cinco materiales anteriormente especificados. Además para cada material se han estudiado tres situaciones diferentes:

- 1.- El primero de los cálculos considera los cinco instantes estudiados en el análisis estructural: 0°, 15°, 60°, 90° y 110°.
- 2.- El segundo considera los 4 primeros instantes: 0°, 15°, 60° y 90°.
- 3.- Finalmente la tercera situación sólo incluye las tres primeras posiciones, puesto que los instantes de 90° y 110° son situaciones extremas que en pocas ocasiones se producen en el ciclo de marcha habitual.

En la Fig. 7, a modo de ejemplo, se muestran los resultados gráficos en término de logaritmo de vida obtenidos sobre la prótesis de rodilla en el caso en el

que se consideran las cinco posiciones (0°-110°) y el material base (control).



Fig. 7. Log de vida. Material de control sin tratamiento. 5 ángulos considerados en el ciclo de marcha

De los resultados incluidos en la tabla 4 pueden realizarse los siguientes comentarios:

- Para los cinco materiales analizados, los resultados de mayor vida se obtienen cuando se considera que el ciclo de marcha abarca los ángulos de 0° a 60°, puesto que ésta hipótesis es menos restrictiva que las otras dos, obteniéndose para estos estados analizados menores niveles tensionales. Los mismos comentarios pueden realizarse cuando se comparan los resultados obtenidos teniendo en cuenta los cinco ángulos con aquellos en los que se ha omitido el último ángulo de 110°.
- Cuando se comparan los resultados obtenidos con los materiales sometidos a diferentes grados de irradiación, se aprecian grandes diferencias en término de vida. Es por tanto imprescindible tener en cuenta el efecto que este proceso produce sobre el comportamiento a fatiga del inserto de polietileno en el diseño de prótesis. A la vista de los resultados se puede concluir que el material que presenta un peor comportamiento es el que tiene un densidad de 50 kGy.

Tabla 4. Logaritmo de vida.

LOGARITMO DE VIDA			
MATERIAL	5 instantes (0°-15°-60°-90°-110°)	4 instantes (0°-15°-60°-90°)	3 instantes (0°-15°-60°)
Control	3.54	5.16	Vida infinita
Templado	3.81	5.64	Vida infinita
50 kGy	2.65	4.35	6.40
100 kGy	3.38	4.76	6.50
200 kGy	4.31	5.62	Vida infinita

- Comparando los resultados obtenidos en los dos materiales base (control vs. templado) se aprecia una mejora en el material sometido al proceso de templado.
- En la Fig. 8 se recogen de forma gráfica todos los resultados obtenidos en este análisis. Puede verse que el material irradiado hasta una densidad de 200 kGy es el que muestra mejor comportamiento a fatiga.

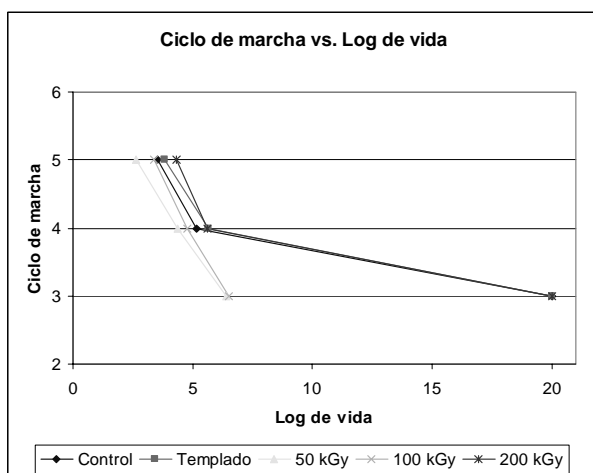


Fig. 8. Ciclo de marcha vs. Logaritmo de vida. Resumen de los resultados obtenidos en el análisis

- Hay que remarcar el bajo valor de la pendiente de las curvas S-N utilizadas en el análisis (coeficiente B del material, Tabla 3), que conducirá a diseños del componente poco robustos.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha comprobado la influencia que en el UHMWPE, material con el que actualmente se fabrican los implantes ortopédicos, tienen los tratamientos térmicos y los distintos procesos de radiación a los que se someten para mejorar sus propiedades. Es por esto, de extrema importancia, el realizar una caracterización correcta del material con el que se fabrica la pieza objeto de estudio. En el caso analizado de la prótesis de rodilla se ha comprobado que el material que peor se comporta en términos de vida es el de densidad 50 kGy, de acuerdo al criterio de fatiga definido.

El principal objetivo de este trabajo ha sido desarrollar una metodología y un procedimiento que incluya en el diseño de prótesis de rodilla una fase de estimación de vida a fatiga numérica, dada la dificultad y el coste que realizar ensayos sobre componentes reales puede acarrear. Por ello en este estudio se ha simplificado el movimiento cinemático de la articulación considerando exclusivamente posiciones discretas y simplificando las cargas que en la realidad se producen en el inserto de

polietileno. Concretamente, se han analizado para cada material tres hipótesis diferentes cuya única diferencia es la definición de ciclo normal de marcha, es decir qué ángulo abarca cada paso. Lógicamente, cuanto menor es el ángulo mayor es la estimación de vida a fatiga. En la realidad la historia de carga que aparece sobre este componente será una combinación de las tres anteriores, siendo mayor el número de apariciones que tenga la hipótesis de menor ángulo y menor la probabilidad de aparición de la hipótesis que incluye la totalidad de los ángulos analizados. Hay que remarcar además que siempre se están considerando situaciones normales de marcha aunque hay otras situaciones como subir o bajar cuestas, subir o bajar escaleras, correr,... que también habrá que tener en cuenta a la hora de conseguir resultados fiables.

Finalmente, no se puede olvidar en el proceso de diseño la poca robustez que presentan las propiedades del material en cualquiera de las opciones analizadas, así, variaciones pequeñas en términos de tensión producirán grandes diferencias en términos de vida.

REFERENCIAS

- [1].- *Contact stresses and fatigue life in a knee prosthesis: comparison between in vitro measurements and computational simulations.* T. Villa, F. Migliavacca, D. Gastaldi, M. Colombo, R. Pietrabissa.
- [2].- *The effects of degree of crosslinking on the fatigue crack initiation and propagation resistance of orthopedic-grade polyethylene.* D.A. Baker, A. Bellare, L. Pruitt.
- [3].- *Multiaxial fatigue behaviour of conventional and highly crosslinked UHMWPE during cyclic small punch testing.* M.L. Villarraga, S.M. Kurtz, M.P. Herr, A.A. Edidin.
- [4].- *MSC/Fatigue.- QuickStart Guide.*
- [5].- *MSC/Fatigue.- Fatigue theory manual.*
- [6].- *Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE).* Harvey L. Stein, P.E. Ticona LLC.