



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza



VALIDACIÓN DE UN SIMULADOR DE RODILLA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD: MECÁNICA DE CONTACTO Y EFECTOS EN LAS PROPIEDADES DE UHMWPE MÉDICOS

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería Técnica Industrial. Especialidad Mecánica

Curso: 2012-2013 Convocatoria de Junio

Autor: Javier Sánchez Sánchez

Director: Francisco Javier Medel Rezusta

Departamento: Ingeniería Mecánica

ÍNDICE

1. Introducción. El polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM) y su uso en prótesis articulares.....	4
1.1. Simuladores de rodilla	9
2. Objetivos del proyecto.....	12
3. Materiales y métodos	13
3.1. Tipos de PEUAPM	13
3.2. Simulador de rodilla	16
3.2.1. Protocolo puesta en marcha	18
3.2.2. Mejoras del simulador	21
3.3. Mecánica de contacto.....	22
3.3.1. Teoría de Hertz	23
3.3.2. Fricción y deslizamiento.....	27
3.3.3. Cálculo presión de contacto simulador.....	30
3.3.4. Simulación SolidWorks	34
3.4. Microscopio confocal.....	38
3.5. Caracterización de la oxidación y radicales libres en el PEUAPM.....	40
3.6. Técnica FTIR.....	42

3.7. Búsqueda de radicales libres. Técnica ESR	44
3.8. Otros métodos o máquinas	46
4. Resultados y conclusiones.....	48
5. Referencias.....	61
6. Agradecimientos.....	62

1. Introducción. El polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM) y su uso en prótesis articulares

Desde un punto vista químico, el polietileno es un polímero producido a partir del etileno (C₂H₄). El etileno es un gas que tiene un peso molecular de 28g/mol. La fórmula química del polietileno es (C₂H₄)_n, donde n es el grado de polimerización. Un esquema de la estructura química del polietileno se muestra en la figura 1.

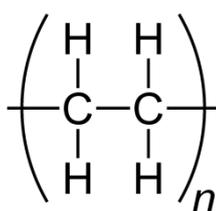


Figura 1. Estructura química del polietileno

Existen diferentes variedades de polietileno dependiendo básicamente del peso molecular que alcancen en el proceso de polimerización. En el caso del polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM), la cadena molecular puede constar de hasta 200.000 etilenos. Dicho de otra manera, la cadena molecular del PEUAPM contiene hasta 400.000 átomos de carbono [1].

La cadena molecular del PEUAPM no es estática y puede alcanzar una cierta movilidad a temperaturas elevadas. Cuando se enfría por debajo de la temperatura de fusión (137 °C), la cadena molecular de polietileno tiende a girar alrededor de los enlaces C=C y crear pliegues de la cadena. Este plegado permite formar regiones laminares conocidas como lamelas (laminillas) cristalinas. El grado y la orientación de las regiones cristalinas dentro de un polietileno dependen de una variedad de factores, incluyendo su peso molecular, condiciones de procesamiento y condiciones ambientales, entre otras.

Estructuralmente, el polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM) es un polímero semicristalino con una región cristalina (entre el 45-55%) y otra región amorfa. La región cristalina está formada por estructuras lamelares muy definidas, mientras que la región amorfa se caracteriza por una alta densidad de ovillamiento. Finalmente, ambas regiones están conectadas debido a la existencia de moléculas lazo.

Estas características morfológicas de PEUAPM se muestran esquemáticamente en la figura 2 [1].

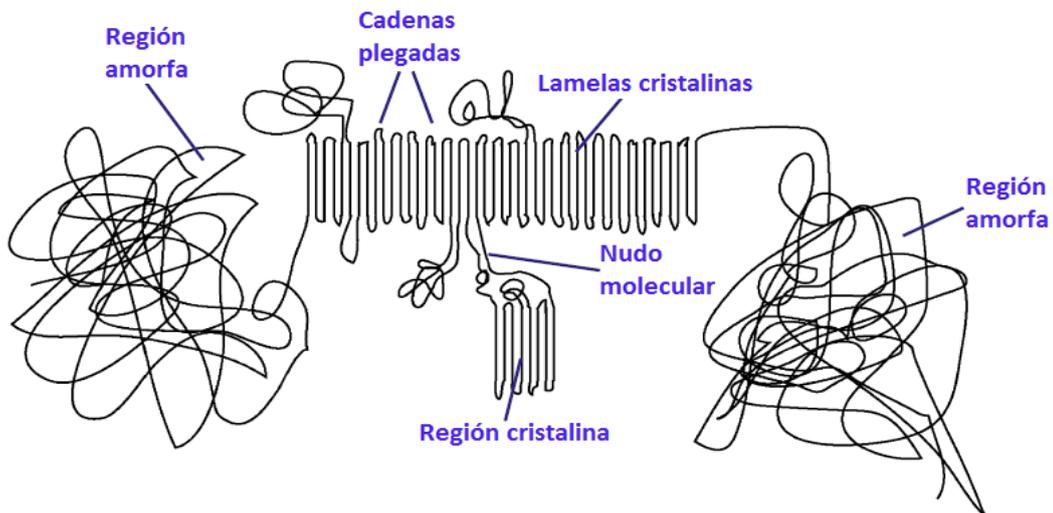


Figura 2. Estructura del PEUAPM

Las lamelas cristalinas son microscópicas por lo que no son visibles a simple vista. Estas laminillas difractan la luz visible, lo que confiere al PEUAPM un aspecto blanco y opaco a temperatura ambiente. A temperaturas superiores a la de fusión (137 °C), el PEUAPM se vuelve translúcido.

Estas características microestructurales son las responsables de la notable resistencia al desgaste, la elevada deformación antes de ruptura, así como del alto límite elástico, tensión a rotura, tenacidad y resistencia a la fatiga. Además de todas estas características mencionadas, cabe destacar sus propiedades de autolubricación, bajo coeficiente de fricción, alta resistencia química, y, especialmente, su biocompatibilidad.

Estas características de PEUAPM han sido explotadas desde la década de 1950 en una amplia gama de aplicaciones industriales, incluyendo recolectores para maquinaria textil, revestimientos para rampas de carbón, camiones volquetes, líneas de producción de embotelladoras, así como en parachoques y en los revestimientos de buques y puertos. En conclusión más del 90% de PEUAPM producido en el mundo es utilizado en el campo de la industria [1].

Desde principios de los años 60, el polietileno de ultra alto peso molecular mantiene una gran relevancia como biomaterial para aplicaciones ortopédicas. Sir John Charnley introdujo el PEUAPM en 1962 como material destinado a desempeñar la

función de cojinete en articulaciones artificiales destinadas a reemplazar a las articulaciones humanas enfermas. En la actualidad, se realizan anualmente cerca de 2 millones de procedimientos de reemplazo articular en todo el mundo, y la mayoría de ellos incorpora al menos un componente de PEUAPM. Se uso está extendido a prácticamente todas las articulaciones: cadera, rodilla, hombro, codo, tobillo y columna. No obstante, las configuraciones principales y más aceptadas son las prótesis de cadera y de rodilla las cuales se basan en el par de fricción metal (acero inoxidable, aleaciones Cobalto-Cromo-Molibdeno) – PEUAPM o cerámica (alúmina) – PEUAPM. A continuación se muestran fotografías de prótesis y reemplazos de las articulaciones nombradas anteriormente:

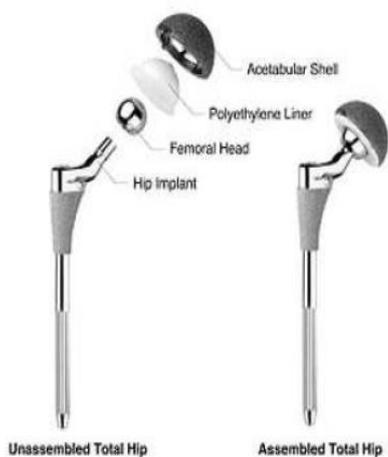


Figura 3. Reemplazo total de cadera

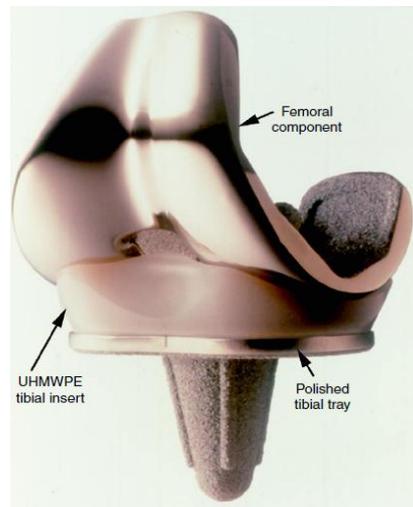


Figura 4. Prótesis de rodilla



Figura 5. Reemplazo total de hombro



Figura 6. Reemplazo total de codo



Figura 7. Prótesis de tobillo



Figura 8. Prótesis de columna

En el presente proyecto nos centraremos en el estudio del comportamiento del polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM) en condiciones próximas a las existentes en las prótesis de rodilla.

Se podría pensar que estos implantes de PEUAPM son perfectos, pero tienen el inconveniente de la durabilidad. Su supervivencia está establecida y limitada en unos 15 años para el 80% (un tiempo muy bajo para una persona que necesita un implante de este tipo para toda su vida). Este fallo se ha atribuido al desgaste y los daños que reciben estas prótesis por su uso durante actividades cotidianas. La generación de partículas de desgaste y su irrupción en el medio biológico se ha asociado a reacciones adversas del organismo ante estos cuerpos extraños que pueden implicar daños irreparables a los propios huesos (osteólisis) o tejidos musculares. El problema del desgaste ha sido y es uno de los temas principales de estudio por científicos e ingenieros del campo de la biomedicina.

El PEUAPM es, de entre los materiales utilizados en las prótesis articulares, el material más susceptible al desgaste. La aplicación repetida de carga y movimiento entre las partes de la prótesis resulta en el desgaste del PEUAPM, que a su vez resulta en la liberación de un alto número de partículas de PEUAPM en tamaños de máxima reactividad biológica (submicrónicos), que puede llegar a implicar una osteólisis y el aflojamiento del implante. En este modo de fallo, generalmente a largo plazo, la generación de partículas ocurre no sólo en las superficies articulares del par de fricción, sino en cualquier interfaz modular.

Para solucionar el problema de desgaste, se utiliza la radiación gamma la cual afecta a la microestructura del material. Inicialmente, el uso de la radiación gamma se reducía a la esterilización ya que elimina todo tipo de microorganismos del polietileno de manera rápida, segura y completa. Con este método se introduce una cierta reticulación (o entrecruzamiento) que beneficia a la resistencia al desgaste. No obstante, esta aplicación de carga radiactiva genera radicales libres en la región amorfa del PEUAPM lo que produce una alteración en las cadenas moleculares. La radiación pueden dar lugar a enlaces C=C, a puntos de reticulación, y a radicales libres que no se recombinan y que en presencia de oxígeno pueden iniciar el ciclo de oxidación. Además de la radiación, otros agentes pueden generar cambios físicos y químicos en el polietileno. En el presente proyecto estudiaremos, entre otras cosas, si la aplicación de una carga cíclica en el PEUAPM tiene algún efecto en su estructura.

Tras intensos estudios de los efectos de la irradiación gamma del PEUAPM, la comunidad ortopédica industrial ha llegado a las siguientes conclusiones:

- La irradiación gamma debe realizarse en atmósferas inertes o en vacío para reducir el proceso de oxidación [2].
- PEUAPM irradiados con altas dosis ($\geq 100\text{KGy}$) tienen una mejor resistencia al desgaste producida por la alta densidad de reticulación, siempre que se controle la aparición de radicales libres mediante procesos de estabilización térmica [2].
- Actualmente, el método de mayor aceptación frente a tratamientos térmicos es la incorporación de la vitamina E (α -tocoferol). La vitamina E es un producto natural, eficiente como estabilizador contra la radiación y con productos de descomposición biocompatibles. Este antioxidante se ha utilizado extensamente para mejorar la bio-estabilidad y bio-compatibilidad de diferentes materiales. Además su carácter lipofílico y su cola de naturaleza hidrofóbica favorecen las interacciones con PEUAPM. Todo esto ha llevado al estudio de polietilenos altamente reticulados incorporando vitamina E para que ésta reaccione con los radicales libres producidos por la irradiación, y así disminuir el proceso de oxidación en todo lo posible [2].
- El aumento del porcentaje de cristalinidad en el PEUAPM fue otra estrategia de mejora. Se pretendía conseguir propiedades mecánicas mejoradas en base a la mayor cristalinidad. A pesar de esto, su mayor susceptibilidad a la generación de radicales bajo la esterilización por radiación en aire, y por tanto a la oxidación, llevaron a esta modificación al fracaso [2].

1.1. Simuladores de rodilla

El aumento de la demanda de prótesis de rodilla de una parte significativa de la población de edad avanzada ha generado la aparición de más fabricantes, tipos y modelos de prótesis de rodilla. También se ha constatado un aumento en el número de cirujanos que llevan a cabo estas operaciones. Ante este aumento los ingenieros y la comunidad científica han creado simuladores de rodilla. Gracias a los simuladores, se pueden realizar pruebas sobre nuevos diseños y prototipos de componentes usados en la artroplastia de rodilla, con la ventaja de estimar los riesgos antes de su uso clínico.

Los ensayos Pin-on-disk (POD) se corresponden esencialmente a una configuración tribológica (cilindro sobre disco) que se utiliza frecuentemente para ensayar pares de materiales en lugar de los sistemas completos de artroplastia de rodilla. En las pruebas POD sobre PEUAPM para sistemas de artroplastias podemos encontrar tanto máquinas de una sola estación como máquinas multi-estación. En ambos casos están configuradas de modo que el extremo de un pasador articula sobre un disco plano, a la vez que se mide la fricción y las características de desgaste de la pareja material dada [3].



Figura 9. Equipo de seis estaciones controlado por "Pin-On-Disk"

En otros campos de la ingeniería (fuera de ortopedia), las pruebas POD proporcionan un movimiento alternativo lineal o movimiento curvilíneo donde un disco se hace girar en contacto con un pasador estacionario y con una compresión

aplicada. En ortopedia, el PEUAPM protésico es ensayado en una configuración POD como material articular frente a un metal, un metal revestido o una cerámica. Para llevar a cabo estas simulaciones se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- El acabo superficial tiene que mantenerse lo más constante posible en las pruebas de POD que simulen condiciones de reemplazo de articulaciones. Es aconsejable tener superficies metálicas pulidas con rugosidades inferiores a $R_a \sim 50 \text{ nm}$ [3].
- Los niveles de tensión que se esperan en la rodilla varían entre 2-50 MPa dependiendo del diseño de la prótesis [3].
- Para simular la carga de una artroplastia de rodilla, la compresión a realizar en una prueba de POD debe ser dinámica e intermitente para inducir tensiones dinámicas al UHMWPE. El área de contacto se puede aproximar relativamente bien a un sencillo contacto mecánico hertziano [3].

La articulación de la rodilla intacta, o con implante total de rodilla instalado, tiene 6 grados de libertad. Debido a que no existe un vínculo rígido entre los huesos, el fémur ejerce tres desplazamientos y tres rotaciones (en relación a la tibia), y viceversa, en distintos niveles. Diversos esquemas han sido publicados para caracterizar el movimiento natural de la rodilla. El sistema de coordenadas más aproximado en simuladores de rodilla, fue propuesto por Groot y Suntay y se ilustra a continuación en la Figura 10 [3].

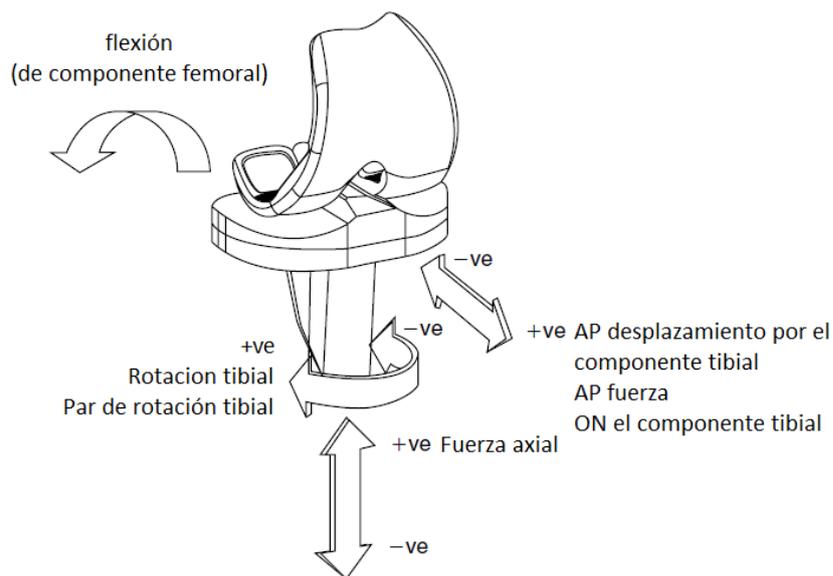


Figura 10. Grados de libertad de una artroplastia de rodilla

Este convenio de signos es compatible con la norma ISO 14243-1: *Implantes para la cirugía. El desgaste de un remplazo total de rodilla protésica*. En esta norma se especifican los parámetros de carga y desplazamiento para máquinas de ensayo de desgaste con control en carga, así como las correspondientes condiciones ambientales para la prueba.

La constatación de que los ensayos de desgaste con equipos Pin-On-Disk no reproducen totalmente el desgaste que se produce en las prótesis de rodilla, así como la necesidad de realizar ensayos de larga duración (del orden del millón de ciclos), y en condiciones próximas a las de una rodilla real (con líquido sinovial, etc.), ha llevado al diseño y construcción de equipos de desgaste y simulación de tres grados de libertad que se aproximan a la rodilla humana. En el actual proyecto se utilizará un simulador de rodilla de dos grados de libertad construido por el Grupo de Biomateriales de Universidad de Zaragoza. Este simulador es del tipo “Ball-on-Flat” (Bola sobre Plano) consta de dos grados de libertad (angular y traslacional), y trabaja bajo una carga constante. En los capítulos posteriores se explicará con más detalle sus características y su funcionamiento.



Figura 11. Simulador de rodilla de la Universidad de Zaragoza

2. Objetivos del proyecto

En el presente proyecto se plantean los siguientes objetivos:

El objetivo principal de este proyecto es validar el mencionado simulador como herramienta para la discriminación entre diferentes PEUAPMs en base a su comportamiento a desgaste. Con este propósito estudiaremos cómo afectan la radiación, los diferentes tipos de tratamientos térmicos post-irradiación (Remelting y Annealing), la carga cíclica y el envejecimiento acelerado a las propiedades del PEUAPM. Para ellos nos fijaremos en la posible delaminación del PEUAPM producida durante el ensayo de desgaste, así como en la huella dejada en las probetas por el ensayo.

Previo al estudio de los efectos de los agentes mencionados sobre las propiedades del PEUAPM, se pondrá a punto el equipo de desgaste y simulación de rodilla. Además se propondrán mejoras de diseño y funcionamiento y se elaborará un protocolo de puesta en marcha para mejorar y optimizar los próximos usos del simulador. Asimismo, se hará un estudio de la mecánica de contacto para comparar las tensiones y las deformaciones producidas por el simulador de rodilla sobre diferentes PEUAPMs. Para ello nos basaremos en la teoría de Hertz y usaremos un software especializado en la mecánica de contacto, y un programa de CAD "SolidWorks". Este estudio será estático, aunque se hará una breve introducción al deslizamiento y la fricción en la mecánica de contacto. También se realizara una animación dinámica mediante SolidWorks para ver y comprender mejor el funcionamiento del simulador de rodilla.

Finalmente, como se verá en la sección de Materiales y Métodos, las técnicas elegidas para evaluar los potenciales cambios sobre los diferentes PEUAPMs serán la microscopia confocal, que permite obtener perfiles ópticos de la huella de desgaste tras el ensayo mecánico, la espectroscopia de resonancia paramagnética de espín (EPR ó ESR), que permite detectar radicales libres en polímeros, y la espectroscopia de infrarrojo (FTIR) que permite evaluar cambios asociados a la oxidación, y a la rotura y recombinación de enlaces en las cadenas del polietileno. En algunos casos, para poder explorar en profundidad los efectos de la aplicación de carga mecánica (i.e., posible generación de radicales o cambios en la estructura de las cadenas), se han realizado ensayos de fatiga uniaxial sobre probetas de PEUAPM sin irradiar.

3. Materiales y métodos

3.1. Tipos de PEUAPM

Tanto para los ensayos de fatiga como para los ensayos realizados en el simulador de rodilla, se utilizaron probetas de PEUAPM (Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular) como material base. Estas probetas se habían preparado mediante diferentes procesos (radiación a diferente dosis, tratamiento térmico...) para proyectos de investigación anteriores del Grupo de Biomateriales de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza. El primer trabajo fue hacer un inventario de las probetas de PEUAPM existentes y clasificarlas en bolsas según su estructura y características. A continuación en la tabla 3.1.1, se muestra el inventario total de probetas de PEUAPM.

	150 KGy	100 KGy	50 KGy	Total
Probeta Simulador TT (150 °C)	3	3	3	9
Probeta Simulador TT (130 °C)	3	3	3	9
Probeta Simulador sin TT (Virgen)	4	4	3	11
Probeta Simulador con TT (t2) mayor tamaño	5	0	9	14
Probeta Simulador con TT (t2) menor tamaño	3	0	0	3
Probetas Simulador especiales	3	0	1	4
Probeta fatiga sin mecanizar Virgen	9	0	9	18
Probeta fatiga sin mecanizar con TT (150 °C)	0	9	0	9
Probeta fatiga sin mecanizar con TT (t2)	0	1	2	3
Probeta fatiga mecanizada Virgen	0	4	1	5
Probeta fatiga mecanizada TT (150 °C)	1	2	5	8
Probeta fatiga mecanizada TT (130 °C)	5	10	4	19
Total	36	27	40	103

Tabla 3.1.1. Inventario de probetas de PEUAPM

Aunque todas estas probetas fueron clasificadas y ordenadas según sus propias características, para el presente proyecto sólo se utilizaron las siguientes probetas de PEUAPM:

- (1) Probeta simulador PEUAPM β 50KGy sin TT
- (2) Probetas simulador PEUAPM β 50KGy Remelting (TT-150°C)
- (1) Probetas simulador PEUAPM β 50KGy Annealing (TT-130°C)
- (1) Probeta fatiga PEUAPM Virgen
- (1) Probeta fatiga PEUAPM Virgen

Como ya se ha comentado el PEUAPM es un polímero perteneciente a la familia del polietileno. Este homopolímero lineal-no ramificado presenta notables valores de rigidez, resistencia al impacto y a la abrasión, y un bajo coeficiente de fricción debido fundamentalmente a su alto peso molecular. A continuación se muestra los valores típicos de las propiedades más significativas del PEUAPM virgen (no irradiado) utilizado en este proyecto, así como sus unidades y el método/norma por la que se rige:

Propiedad	Valor Típico	Unidades	Método / Norma
Peso Molecular	(3,5–7,5)x10 ⁶	g/mol	-
Peso Especifico	0,925–0,945	gr/cm ³	DIN 53479
Grado de cristalinidad	39–75	%	DSC

Tabla 3.1.2. Propiedades físicas del PEUAPM

Propiedad	Valor Típico	Unidades	Método / Norma
Coeficiente de Poisson	0,46	-	-
Modulo de tensión elástico	500–800	MPa	DIN 53457
Tensión de fluencia	21–28	MPa	DIN 53455 / ISO 527
Resistencia de rotura	39–48	MPa	DIN 53455
Elongación a rotura	350–525	%	DIN 53455
Resistencia al impacto, Izod	> 1070 (No Rompe)	J/m	Método de prueba interna
Dureza	61–64	Shore D	DIN 53505

Tabla 3.1.3. Propiedades mecánicas del PEUAPM

Propiedad	Valor Típico	Unidades	Método / Norma
Temperatura de fusión	132–138	°C	ISO 3146
Calor específico	0,54	Kcal/Kg°C	-
Conductividad térmica a 23°C	0,41	W/(Km)	DIN 52612
Punto de ablandamiento Vicat VST	79	°C	DIN ISO 306/B

Tabla 3.1.4. Propiedades térmicas del PEUAPM

Propiedad	Valor Típico	Unidades	Método / Norma
Resistividad volumétrica	>10 ¹⁴	Ω x cm	VDE 0303/3
Resistencia superficial	>10 ¹¹	Ω	VDE 0303/3
Resistencia dieléctrica	45	KV/mm	VDE 0303/2
Resistencia al arco	L4	Grado	VDE 0303/5

Tabla 3.1.5. Propiedades dieléctricas del PEUAPM

Las probetas utilizadas en los estudios del simulador de rodilla fueron irradiadas en aire a una dosis de 50KGy mediante radiación beta. La irradiación (método para la reticulación del PEUAPM) tiene como primer efecto la creación de radicales libres por

la escisión que se produce en las largas cadenas moleculares. Estos radicales pueden recombinarse entre sí, dando lugar a dobles enlaces C=C y puntos de reticulación, o bien pueden participar en el ciclo de oxidación del material en presencia de oxígeno. El entrecruzamiento en general hace que el polímero aumente su dureza y su densidad de reticulación, lo que supone una mejora de la resistencia al desgaste prolongando la duración del material en las prótesis además de su esterilización. Sin embargo, la irradiación también provoca que algunos radicales libres sobrevivan atrapados en la fase cristalina, y con el tiempo pueden tomar parte en el ciclo oxidación y alterar las propiedades del PEUAPM, empeorándolas [4].

Para estabilizar el polímero frente a la oxidación producida por la radiación a 50 kGy y los radicales libres asociados se utilizan varios métodos consistentes en tratamientos térmicos. Los métodos más utilizados por la comunidad ortopédica y científica para esta estabilización son el refundido (Remelting) y el recocido (Annealing). En la figura 12 se muestra el proceso para la obtención de las probetas de PEUAPM β 50Kgy Remelting y Annealing.

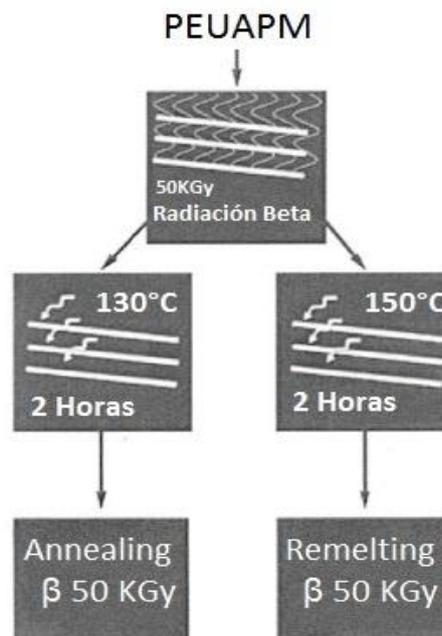


Figura 12. Esquema del proceso de irradiación y tratamiento térmico para el polietileno.

3.2. Simulador de rodilla

Como se ha comentado en la introducción, la maquina utilizada para los ensayos de rodilla es un simulador construido por el Grupo de Investigación en Biomateriales de la Universidad de Zaragoza. Este simulador fue construido en el año 2001 y está formado por tres partes principales: la máquina de desgaste, el armario de control y el ordenador.



Figura 13. Máquina de desgaste (simulador), armario de control y ordenador.

El simulador funciona bajo la plataforma LabVIEW 6.1. Esta plataforma y entorno de desarrollo permite diseñar sistemas, con un lenguaje de programación G (visual gráfico). LabVIEW está recomendado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño (simulado o real). Este programa informático acelera la productividad, permite resolver problemas, da seguridad para innovar continuamente y para crear y desplegar sistemas de medidas y control.

El simulador (Ball-on-Flat) posee de dos grados de libertad (angular y traslacional), los cuales son producidos por dos servomotores que tienen la capacidad de controlar su velocidad y su posición de giro. El primer servomotor produce el movimiento angular de la bola (que se correspondería con la componente femoral de la prótesis de rodilla). Este movimiento angular puede regularse mediante la interfaz del programa entre una velocidad nominal de 0 y 2 m/seg de la bola. El segundo servomotor controla el movimiento traslacional de la mesa (componente tibial). Este último movimiento de deslizamiento puede establecerse entre 0 y 1 m/seg.

La carga aplicada a la probeta se puede graduar entre 10N y 500N. Esta carga es producida por un conjunto de pesas que se sitúan en la parte superior de la máquina. El conjunto de pesas se desplaza mediante un sistema tornillo sin fin y, según su posición en la máquina y gracias a un sistema de balancín, este peso crea un momento con respecto al eje de la balanza. La carga correspondiente al mencionado momento es la que transmitirá la bola de acero a la probeta que se vaya a ensayar. El peso es medido por cuatro pesas electrónicas que mandan la señal a la torre de control, y en todo momento se puede observar la carga generada a través de la interfaz del programa.

La cubeta se encuentra situada en la parte superior del carro que controla el desplazamiento del eje x. Esta cubeta se puede desmontar y montar fácilmente para una mejor extracción de la probeta, ya que se encaja sobre cuatro bulones del propio carro. Un detalle importante de la cubeta son sus cuatro orificios para controlar el sistema de calentamiento y enfriamiento del líquido lubricante (imitando en lo posible al líquido sinovial de una rodilla humana). La probeta se sitúa dentro de esta cubeta amarrada por un soporte y sujeta por 2 tornillos de cabeza hexagonal (Allen), que permiten una fácil extracción de la probeta.

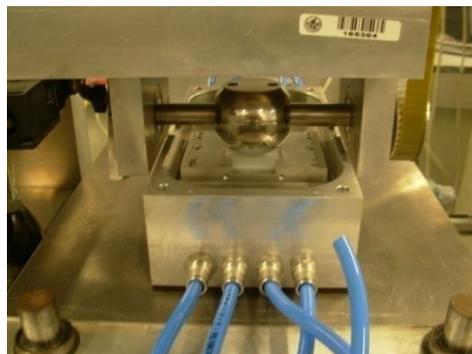


Figura 14. Detalles de la cubeta durante el ensayo del PEUAPM

La bola está fabricada en acero inoxidable 316-L, y existe la posibilidad de extraer esta bola y sustituirla por otras de materiales similares para distintos ensayos. El desmontaje de la bola implica desmontar el eje entero que porta la bola y extraerla liberando dos tornillos Allen.

Como se puede apreciar en la figura 13, el simulador está sobre una bancada de acero y cuenta con un armario de protección de plástico para proteger de polvo y otros contaminantes el ensayo, así como para prevenir daños y proteger la integridad física del operario si ocurriera un fallo mecánico. Este armario dispone de dos puertas,

una frontal y otra lateral, para poder acceder a las diferentes operaciones que permite el simulador.

El equipo también cuenta con 4 finales de carrera que se utilizan tanto para la orientación y colocación de los diferentes dispositivos del simulador, como para la detención del programa y, por tanto el paro inmediato de los motores.

Todos los datos producidos por el simulador (nº ciclos, temperatura, velocidades, ángulo de la bola, etc.) son recogidos en tablas Excel por el ordenador, permitiendo el posterior tratamiento y análisis.

3.2.1. Protocolo puesta en marcha

Para el arranque y puesta en marcha del simulador se elaboró un protocolo previo con las indicaciones a seguir para que evitar en lo posible incidencias no deseadas. A continuación se describen paso a paso las indicaciones recogidas en el protocolo.

1. Nos aseguraremos de que el interruptor general del simulador está en OFF para poder levantar el peso (mediante la manivela), si así fuera necesario.
2. Encendemos el Ordenador.
3. Ponemos el interruptor general del simulador en ON.
4. Entramos a la sesión de Windows con **Usuario: Invitado** **Contraseña:** .
5. Abrimos el programa LabVIEW 6.1.
6. Seleccionamos la pestaña OPEN↓ y escogemos la ruta señalada a continuación.

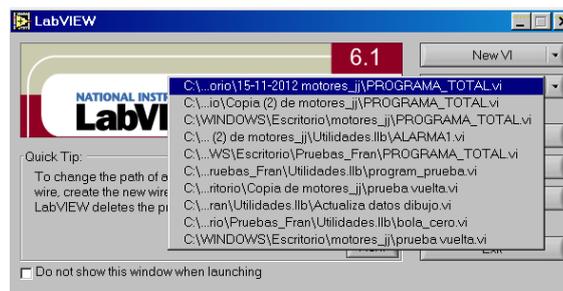


Figura 15. Ruta específica del programa de simulación.

7. Rellenamos los datos de la interfaz del programa:

The screenshot shows a window titled "Control de desgaste" with a sub-header "DATOS DEL ENSAYO". It contains several input fields and a button:

- Nombre del ensayo: Ensayo_6
- Material: B50KGy_Remelting
- Condiciones especiales: NO
- Directorio de datos: C:\WINDOWS\Escritorio\15-11-2012 motores_jj\
- Guardar cada: 2000 ciclos
- Dibujar cada: 1 ciclos
- OK button

Figura 16. Introducción de datos al programa.

8. Introducimos las condiciones deseadas para el ensayo:

The screenshot shows a window titled "Control de desgaste" with a sub-header "Frecuencia". It contains several controls for setting test parameters:

- Frecuencia: 1,00 ciclos/segundo
- Ángulo negativo: A circular gauge with a scale from -45,0 to -5,0 and a value of 0,0.
- Ángulo positivo: A circular gauge with a scale from 0,0 to 45,0 and a value of 0,0.
- Desplazamiento negativo: A horizontal scale from -5 to 0 with a value of 0,0.
- Desplazamiento positivo: A horizontal scale from 0 to 5 with a value of 0,0.
- OK button

Figura 17. Introducción parámetros de funcionamiento al programa.

- Introducimos en número de ciclos a realizar y pulsamos el botón de la derecha:

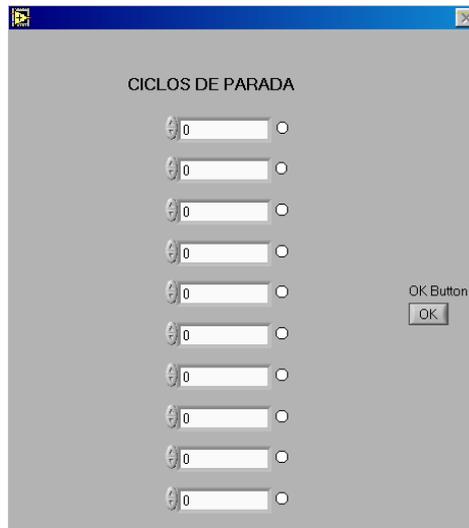


Figura 18. Introducción de los ciclos al programa.

- El simulador automáticamente se posicionará en su posición de inicio. Para ello, la mesa irá a tocar los dos finales de carrera, y por su parte, la bola alcanzará la posición 0° . Cuando terminen de posicionarse pondremos el interruptor en la posición OFF.
- Pulsamos el botón “Reset” en la interfaz, nos saldrá un mensaje para poder bajar el peso.
- A continuación, bajamos el peso mediante la manivela hasta alcanzar el deseado.



Figura 19. Peso establecido para realizar la simulación.

- Una vez establecemos el peso ponemos el interruptor general en ON.

14. Inmediatamente después pulsamos el botón “Continuar” en el interface.
15. El ensayo comenzará a funcionar en las condiciones establecidas. Si no ocurre ningún fallo extraño el simulador parará a los ciclos programados.

3.2.2. Mejoras del simulador

Durante el tiempo transcurrido en la elaboración del presente proyecto y según la experiencia adquirida en la puesta en marcha y seguimiento del funcionamiento del simulador, he llegado a la conclusión de que es un gran equipo de trabajo y se puede utilizar para posteriores ensayos e investigaciones. No obstante, también he podido darme cuenta de posibles mejoras que aumentarían el rendimiento del equipo. A continuación se describen dichas mejoras.

- El sistema de pesas situado en el tornillo sin fin que produce la carga aplicada en el ensayo se podría mejorar orientándolo de forma longitudinal al brazo del tornillo. En la configuración actual el sistema de pesas (ver figura 11) se sitúa transversalmente dando lugar a dos voladizos. Esta disposición en voladizo produce una notable vibración durante la simulación. Los momentos flectores asociados al doble voladizo podrían generar una rotura por fatiga de este sistema tras millones de ciclos de funcionamiento.
- El sistema de cableado actual en el armario de control es caótico. Se debería mejorar con una instalación más óptima y organizada. Además habría que contar con unos planos eléctricos con representación gráfica de todo el sistema, de modo que se pudieran conocer las funciones de cada parte del cableado.
- Otra posible mejora, sería la colocación de una cámara dentro del armario de protección que se encargara de grabar toda la simulación. Así sería posible detectar posibles fallos del simulador o movimientos extraños de éste.
- Otro problema se encuentra en la limitación del ordenador, ya que su RAM no es muy potente. Como resultado, mientras está en marcha la simulación no se puede tocar el ordenador, porque si no el ensayo falla. La solución sería cambiar la RAM o el equipo.
- Un fallo por el cual se retrasó la puesta en marcha del simulador fue la existencia de una corriente parásita en el sistema. Esta corriente afectaba a los motores una vez que estos habían alcanzado la posición de equilibrio o posicionamiento inicial, moviendo bien la mesa o bien la bola pero sin haber comenzado el ensayo. Se intentó buscar dicha corriente sin éxito. El

problema se solucionó cortándole la corriente a los motores a través del interruptor OFF/ON general una vez que el simulador se había posicionado. A continuación se establecía la carga, y se daba comienzo al ensayo mediante el mencionado interruptor.

3.3. Mecánica de contacto

La mecánica de contacto se ocupa del análisis de los cuerpos elásticos, viscoelásticos o plásticos que se encuentran en contacto estático o dinámico. La mecánica de contacto es una disciplina fundamental dentro de la ingeniería para el diseño de sistemas técnicos basados en la seguridad y el ahorro de energía. Los principios de la mecánica de contacto pueden ser aplicables en áreas como el contacto rueda-carril, mecanismos de acoplamiento, sistemas de frenos, neumáticos, rodamientos deslizantes, articulaciones, juntas, estudio de materiales, soldadura por ultrasonidos, contactos eléctricos y muchos otros. Los desafíos actuales en este campo incluyen desde la verificación de resistencia entre elementos de contacto y la influencia de la lubricación, o el diseño de material en la fricción y el desgaste. Otras aplicaciones de la mecánica de contacto se amplían al campo de la micro y nanotecnología.

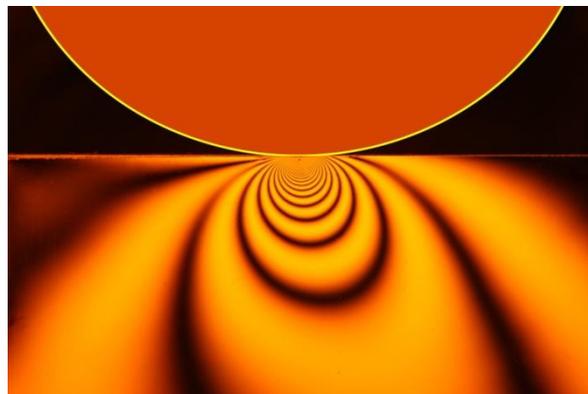


Figura 20. Tensiones en el área de contacto, cargados simultáneamente con una fuerza normal y tangencial. Tensiones visibles usando fotoelasticidad

La mecánica de contacto clásica suele relacionarse con Heinrich Hertz. En 1882, Hertz resolvió el problema del contacto entre dos cuerpos elásticos con superficies curvas. Esta solución clásica, todavía relevante, supone el fundamento para problemas más modernos de la mecánica de contacto. No fue sino hasta casi cien años después cuando Johnson, Kendall, y Roberts encontraron una solución similar para el caso del contacto adhesivo (Teoría JKR). Nuevos avances en el campo de la mecánica de contacto en la primera mitad del siglo XX se pueden atribuir a nombres como Bowden

y Tabor. Bowden y Tabor fueron los primeros en destacar la importancia de la rugosidad de la superficie de los cuerpos en contacto. A través de la investigación de la rugosidad de la superficie, se confirmó que la verdadera área de contacto entre las partes en fricción es típicamente inferior en varios órdenes de magnitud al área de contacto aparente. Tal comprensión cambió también drásticamente el rumbo de las empresas dedicadas a la tribología. Los trabajos de Bowden y Tabor originaron varias teorías sobre mecánica de contacto para superficies rugosas. La contribución de Archard (1957) debe ser también mencionada en relación a trabajos pioneros en este campo. Archard concluyó que, incluso para superficies elásticas rugosas, el área de contacto era aproximadamente proporcional a la fuerza normal. Otras cuestiones incluidas en estas líneas fueron ofrecidas por Greenwood and Williamson (1966), Bush (1975), y Persson (2002). Los descubrimientos más importantes sobre estos trabajos fueron los siguientes: la verdadera superficie en contacto en materiales rugosos es generalmente proporcional a la fuerza normal, mientras que los parámetros de micro-contacts individuales (es decir, presión, dimensión del micro-contacto) dependen muy ligeramente de la carga [7].

3.3.1. Teoría de Hertz

Consideremos dos cuerpos ásperos sólidos introducidos en contacto físico a través de la acción de las fuerzas aplicadas. El contacto entre los dos cuerpos se produce en muchas áreas pequeñas, cada una de las cuales constituye una aspereza de contacto única. La solución de este problema se desarrolló a finales del siglo XIX por Hertz. Los supuestos por los que se ha conocido el problema de contacto de Hertz son [8]:

1. El área de contacto es elíptica.
2. Cada cuerpo se aproxima por un semi-espacio elástico cargado sobre el plano del área de contacto elíptica.
3. Las dimensiones del área contacto deben ser pequeñas en comparación con las dimensiones de cada cuerpo y de los radios de curvatura de las superficies.
4. Las deformaciones son lo suficientemente pequeñas por lo que la suposición de situación elástica lineal es válida.
5. El contacto es sin fricción, de modo que sólo una presión normal se transmite.

En la figura 21 se muestran dos sólidos en contacto después de la deformación. El punto de primer contacto se toma como el origen de un sistema coordenado cartesiano con el plano x-y como plano tangente común, y el eje z dirigido hacia abajo.

Usando la notación de Johnson, durante la compresión de la carga normal P, la distancia entre los puntos T1 y T2 varía debido al desplazamiento paralelo al eje z y hacia O de ambos puntos, recorriendo las distancias d1 y d2, respectivamente [9].

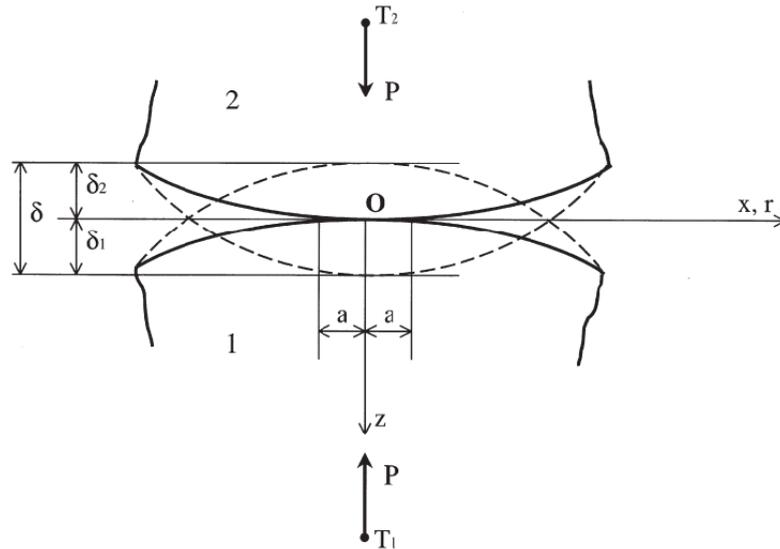


Figura 21. Contacto de Hertz de dos cuerpos elásticos no conformes

La cantidad δ ($\delta_1 + \delta_2$) se llama el enfoque normal o interferencia. La interferencia, el radio de contacto (a), y la máxima presión de contacto vienen dadas por las siguientes expresiones:

$$\delta = \left(\frac{9P^2}{16RE^2} \right)^{1/3} \quad a = \left(\frac{3PR}{4E^*} \right)^{1/3}$$

$$P_0 = \left(\frac{6PE^2}{\pi^3 R^2} \right)^{1/3} \quad \frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Donde:

Po: Es la presión de contacto máxima (que se produce en $r = 0$).

E *: Es el módulo de Young compuesto para los dos sólidos en contacto de módulos, E_1, E_2 .

ν_1 y ν_2 : Son los coeficientes de Poisson para el cuerpo inferior y superior, respectivamente.

R: Es el radio de curvatura compuesto de los radios de curvatura, R_1 , y R_2 de los cuerpos inferior y superior, respectivamente.

P: Carga normal aplicada.

Así el área de contacto y la interferencia varían como la fuerza aplicada elevada a la potencia 2/3. La distribución de la presión de contacto es semi-elíptica con un radio r , y tiene un valor máximo en el origen que depende de la carga normal aplicada elevada a 1/3. Estas ecuaciones, son casos especiales de resultados más generales para el contacto entre cuerpos de perfiles elipsoidales, el área de contacto es elíptica y la distribución de la presión de contacto es semi-elipsoidal. Los resultados detallados para el área de contacto y la interferencia vs fuerzas normales son bastante complicados y están dados por Johnson y Cooper [9].

Las soluciones para el contacto de Hertz son válidas hasta que la carga aplicada es lo suficientemente grande como para iniciar deformación plástica. La teoría del máximo esfuerzo cortante de Tresca afirma que la deformación plástica empieza en un punto en el cuerpo en el que el esfuerzo cortante máximo alcanza un valor crítico

$$\max \{ |\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1| \} = Y$$

Donde $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ son las tensiones principales e Y es la tensión de tracción simple. Otra teoría, el criterio de von Mises, afirma que la plastificación ocurre cuando la energía de deformación distorsional alcanza un valor crítico.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2Y^2$$

Que, por cizalla pura, predice ceder a un esfuerzo un 15,5% mayor que el esfuerzo en el que comienza la plasticidad según el criterio de Tresca. Así, ambas teorías, las de Tresca y von Mises, predicen:

$$(Po)_y = 1.6Y \quad P_y = 21.2 \frac{R^2 Y^3}{E^{*2}} \quad \delta_y = 6.32R \left(\frac{Y}{E^*} \right)^2$$

Para el contacto de Hertz, el máximo esfuerzo cortante (para $\nu = 0,3$) se produce a una profundidad de $0,48a$ y un tiene un valor de $0,31Po$ [9].

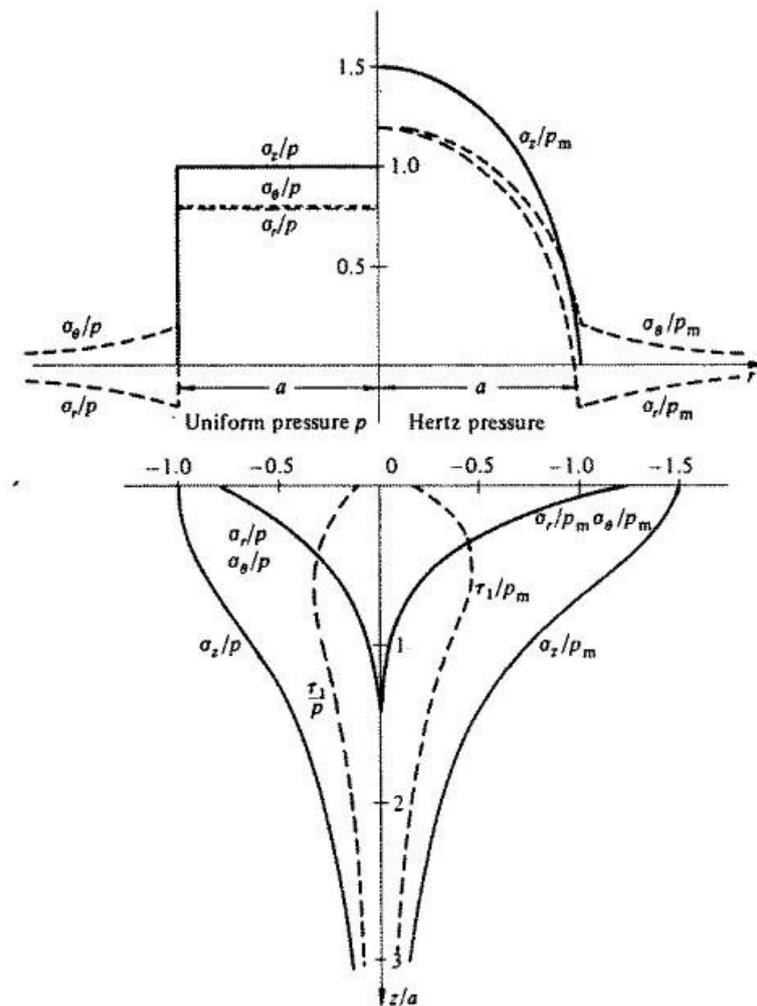


Figura 22. Distribución de tensiones en la superficie y a lo largo del eje de simetría causada por la presión uniforme y la presión de Hertz que actúa sobre un área circular de radio a .

Consideremos ahora la aplicación de una carga tangencial (F) a un contacto hertziano. La primera situación a tratar es aplicable para cualquiera de los tres casos:

- Un par de materiales idénticos.
- Un material rígido y otro incompresible ($N = 1/2$).
- Ambos materiales incompresibles.

En estos casos las tensiones normales no causan desplazamientos relativos tangenciales y el esfuerzo cortante no produce desplazamientos normales relativos. Este desacoplamiento simplifica el análisis enormemente. En ausencia de una fuerza tangencial, los puntos de contacto no tienden a sufrir desplazamientos tangenciales y el deslizamiento por lo tanto no tiende a ocurrir independientemente de si la fricción o no está presente [8].

3.3.2. Fricción y deslizamiento

El movimiento de deslizamiento relativo de las dos superficies es resistido por una fuerza tangencial que se llama fuerza de fricción. La proporción de esta fuerza tangencial a la fuerza normal es el llamado el coeficiente de fricción cinético (μ). Aunque este coeficiente puede ser determinado experimentalmente con facilidad, la mecánica de contacto y fricción es un campo bastante complejo ya que la fricción es una consecuencia de muchos fenómenos y causas interactuantes. Estas causas de la fricción se han explorado durante muchos años. De acuerdo con la moderna concepción de la tribología, hay dos causas principales de disipación de energía que dan lugar a una resistencia en contacto deslizante [10].

La primera se asocia con el trabajo realizado en hacer y romper la adhesión de enlaces formados en los puntos de contacto de las superficies de deslizamiento. El mecanismo para la formación de enlaces de adhesión depende de las propiedades de los cuerpos en contacto y sobre las condiciones de fricción. La ruptura de los puentes de soldadura entre las superficies de contacto se realiza por contacto deslizante de las superficies. Por contacto deslizante de cauchos, y polímeros similares al caucho, la disipación de energía tiene lugar en el proceso de salto térmico de las cadenas moleculares de un estado de equilibrio a otro. El componente adhesivo de la fuerza de fricción depende de las propiedades de la superficie de ambos cuerpos en contacto. Un interesante enfoque de modelado de la interacción adhesiva en contacto deslizante fue desarrollado en trabajos por Godet (1984), Alekseev y Dobyichin (1994), donde se investigó el movimiento de la sustancia del tercer cuerpo. El tercer cuerpo es una delgada capa entre los cuerpos en contacto. Sus propiedades dependen de las propiedades mecánicas de las capas superficiales de los cuerpos en contacto, sin embargo, hasta ahora no existe un modelo teórico para el cálculo de la componente adhesiva de la fuerza de fricción [10].

La fricción adhesiva se tiene en cuenta en la formulación de problemas de contacto por alguna relación entre las tensiones en la zona de contacto. La ley que fue establecida por Coulomb (1785) experimentalmente para la fricción, se utiliza generalmente para describir la relación entre la presión normal y la tensión tangencial en la zona de contacto:

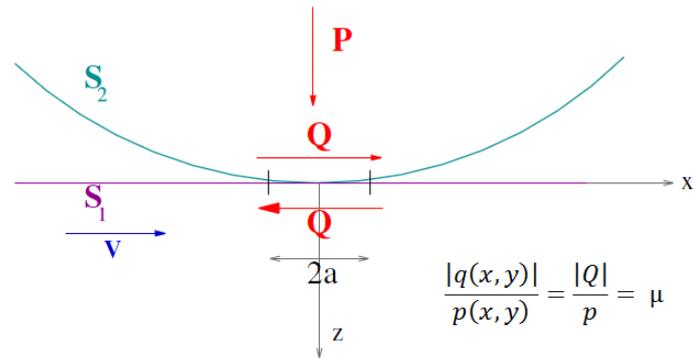


Figura 23. Relación entre la tensión tangencial y la presión normal. Ley de Coulomb

La segunda causa de la disipación de energía es la deformación cíclica de los cuerpos en contacto deslizante. La fuerza de resistencia conectada con este proceso se denomina componente mecánico de la fricción. Este proceso depende de las propiedades mecánicas de los cuerpos en contacto deslizante, la geometría de las superficies, las fuerzas aplicadas, etc. A diferencia del componente adhesivo, el componente mecánico de la fuerza de fricción depende en lo esencial de la deformación de los cuerpos en contacto, y por lo tanto puede ser estudiada por los métodos de la mecánica de contacto [10].

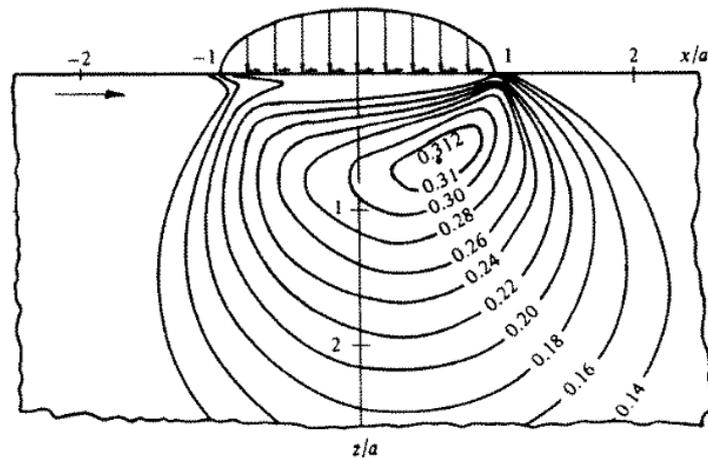


Figura 24. Contornos principales del esfuerzo cortante τ bajo un contacto de deslizamiento ($Q_x = 0.2P$).

A continuación en la figura 25 se muestra un contacto mecánico desglosado en dos partes, una de ellas está formada por la zona de deslizamiento y la otra por una zona de contacto, se estudia cómo afectan estas zonas a las tensiones cortantes principales.

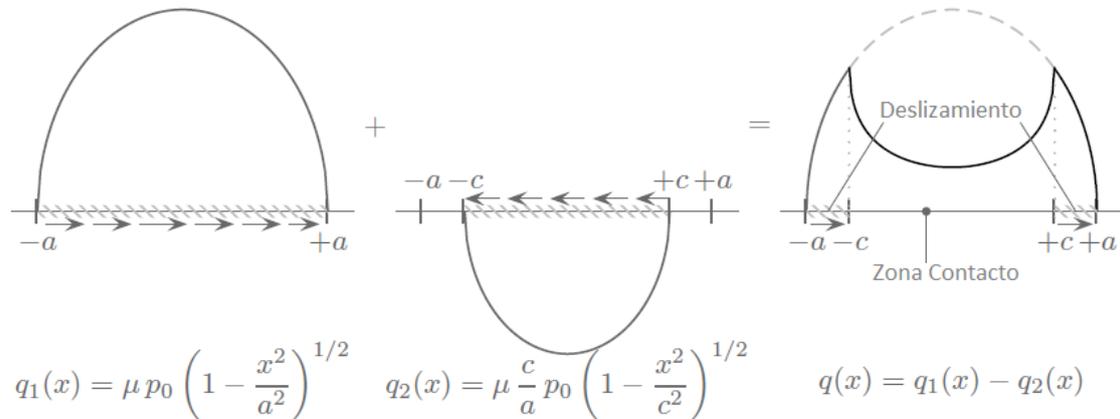


Figura 25. Relación entre la zona de deslizamiento (c) y la zona de contacto (a)

Si $x < c$: Condición de paro. El esfuerzo cortante en el contacto local es:

$$\tau_{xz} = \mu p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} - \frac{c}{a} p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{c^2}}$$

Si $c < x < a$: Condición de deslizamiento. El esfuerzo cortante en el contacto local es:

$$\tau_{xz} = \mu p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}$$

Un estudio teórico más detallado sobre el deslizamiento y la fricción en la mecánica de contacto está fuera del alcance de este proyecto. No obstante, más adelante mediante se empleará un programa CAD para realizar un estudio de la mecánica de contacto entre dos sólidos Plano-Esfera.

3.3.3. Cálculo presión de contacto simulador

A continuación se muestran los cálculos y resultados calculados mediante la teoría de Hertz, para el caso especial del simulador de la Universidad de Zaragoza con el cual se realizaron los ensayos.

- **Cuerpo 1: Bola de Acero Inoxidable 316-L**
- **Cuerpo 2: Probeta de PEUAPM**

- Radio cuerpo 1 = 25mm
- Radio cuerpo 2 = 0mm
- Fuerza normal = 20 Kg = 200N
- Modulo de Young cuerpo 1 = 193000MPa
- Modulo de Young cuerpo 2 = 720Mpa
- Coeficiente de Poisson cuerpo 1 = 0.3
- Coeficiente de Poisson cuerpo 2 = 0.46

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} = \frac{1 - 0.3^2}{193000} + \frac{1 - 0.46^2}{720} = 0.0010997$$

$$E^* = 909.326 \text{ N/mm}^2$$

$$\delta = \left(\frac{9P^2}{16RE^2} \right)^{1/3} = \sqrt[3]{\frac{9 * 200^2}{16 * 25 * 909.326^2}} = 0.1028 \text{ mm}$$

$$a = \left(\frac{3PR}{4E^*} \right)^{1/3} = \sqrt[3]{\frac{3 * 200 * 25}{4 * 909.326}} = 1.603 \text{ mm}$$

$$P_0 = \left(\frac{6PE^2}{\pi^3 R^2} \right)^{1/3} = \sqrt[3]{\frac{6 * 200 * 909.326^2}{3.1415^3 * 25^2}} = 37.13 \text{ N/mm}^2$$

También se realizaron estos cálculos mediante un programa especializado en la presión de contacto “MESYS Hertzian Stress Calculation v1”. Con este programa se pueden obtener más resultados así como representaciones graficas. A continuación se exponen dichos resultados:

- **Cuerpo 1: Bola de Acero Inoxidable 316-L**
- **Cuerpo 2: Probeta de PEUAPM**

Datos de entrada:

- Radio principal cuerpo 1 = 25mm
- Radio secundario cuerpo 1 = 25mm
- Radio principal cuerpo 2 = 0mm
- Radio secundario cuerpo 2 = 0mm
- Longitud efectiva para cilindros = 0.0000mm
- Fuerza normal = 20 Kg =200N
- Modulo de Young cuerpo 1 = 193000MPa
- Modulo de Young cuerpo 2 = 720Mpa
- Coeficiente de Poisson cuerpo 1 = 0.3
- Coeficiente de Poisson cuerpo 2 = 0.46
- Ángulo entre los planos de radios $\alpha = 0.0000$ mm

Resultados:

- Eje mayor medio de contacto con elipsis (a) = 1,6036 mm
- Eje menor medio de contacto con elipsis (b) = 1,6036 mm
- Aproximación de ambos cuerpos (δ) = 0.1029 mm
- Rigidez de contacto (R) = 2921.3 N/mm
- Tensión de Hertz (pH) = 37.133 MPa
- Máximo esfuerzo cortante cuerpo 1 (τ_{Max_1}) = 11.512 MPa
- Máximo esfuerzo cortante octaédrico cuerpo 1 (τ_{OctMax_1}) = 10.854 MPa
- Profundidad máxima para esfuerzo de corte cuerpo1 $z(\tau_{Max_1}) = 0.7710$ mm
- Tensión equivalente “Tresca” cuerpo 1 ($\sigma_{eTresca_1}$) = 23.024 MPa
- Tensión equivalente “Von Mises” cuerpo 1 (σ_{eMises_1}) = 23.024 MPa
- Máximo esfuerzo cortante cuerpo 2 (τ_{Max_2}) = 10.201 MPa
- Máximo esfuerzo cortante octaédrico cuerpo 2 (τ_{OctMax_2}) = 9.6177 MPa
- Profundidad máxima para esfuerzo de corte cuerpo2 $z(\tau_{Max_2}) = 0.8569$ mm
- Tensión equivalente “Tresca” cuerpo 2 ($\sigma_{eTresca_2}$) = 20.402 MPa
- Tensión equivalente “Von Mises” cuerpo 2 (σ_{eMises_2}) = 20.402 MPa

Gráficas:

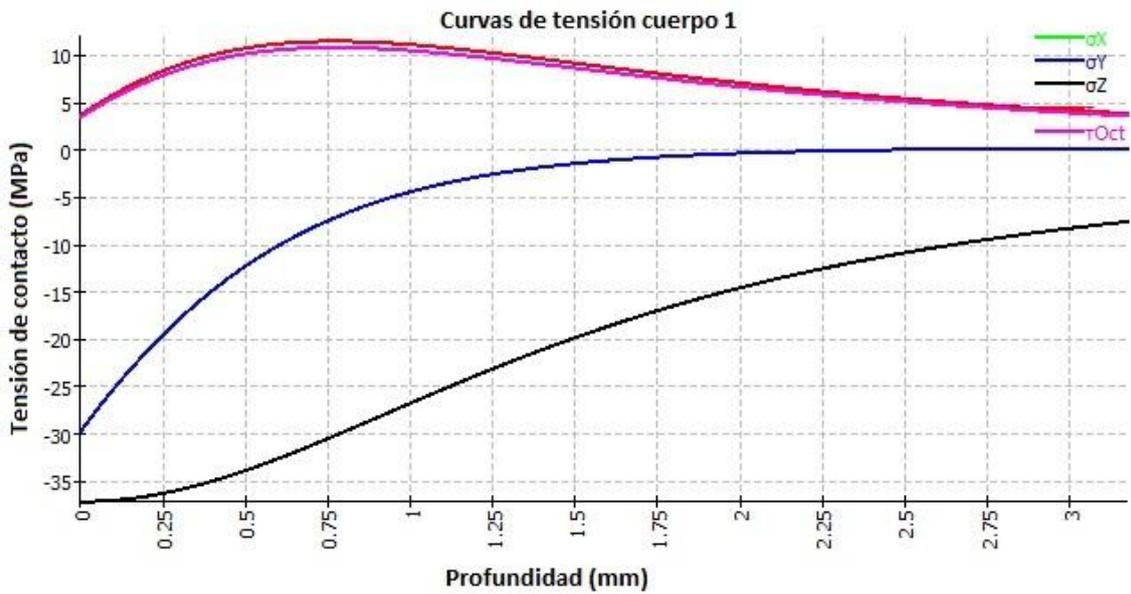


Figura 26. Curvas de tensión para el cuerpo 1 (Bola de acero inoxidable 316-L)

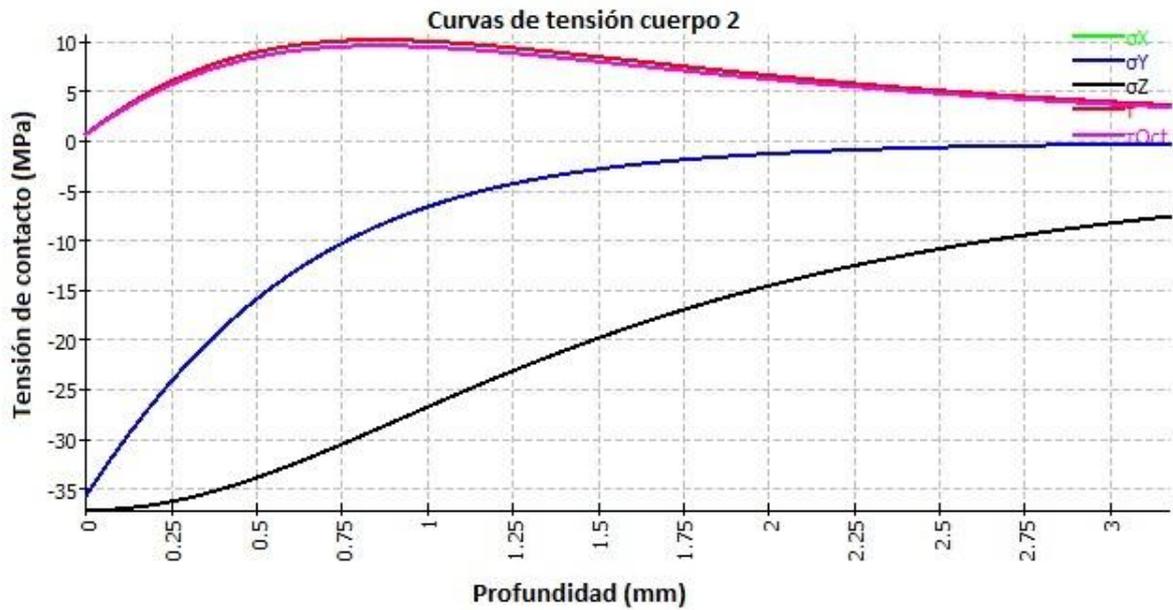


Figura 27. Curvas de tensión de cuerpo 2 (Probeta de PEUAPM)

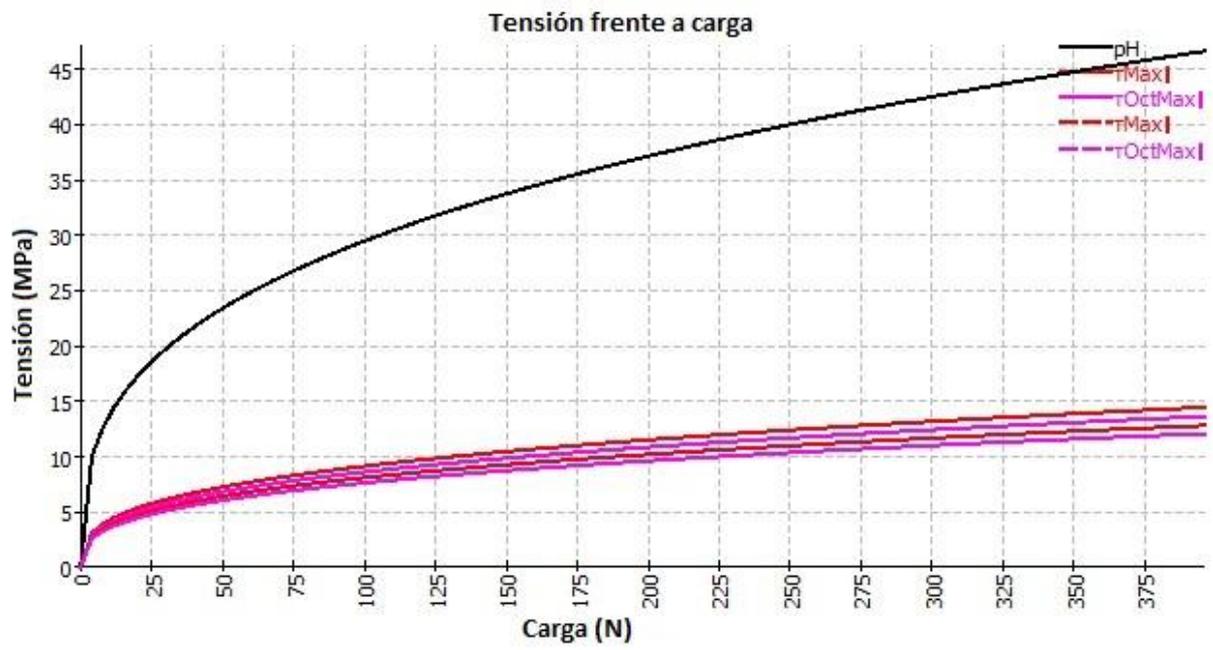


Figura 28. Curvas de tensión frente a carga

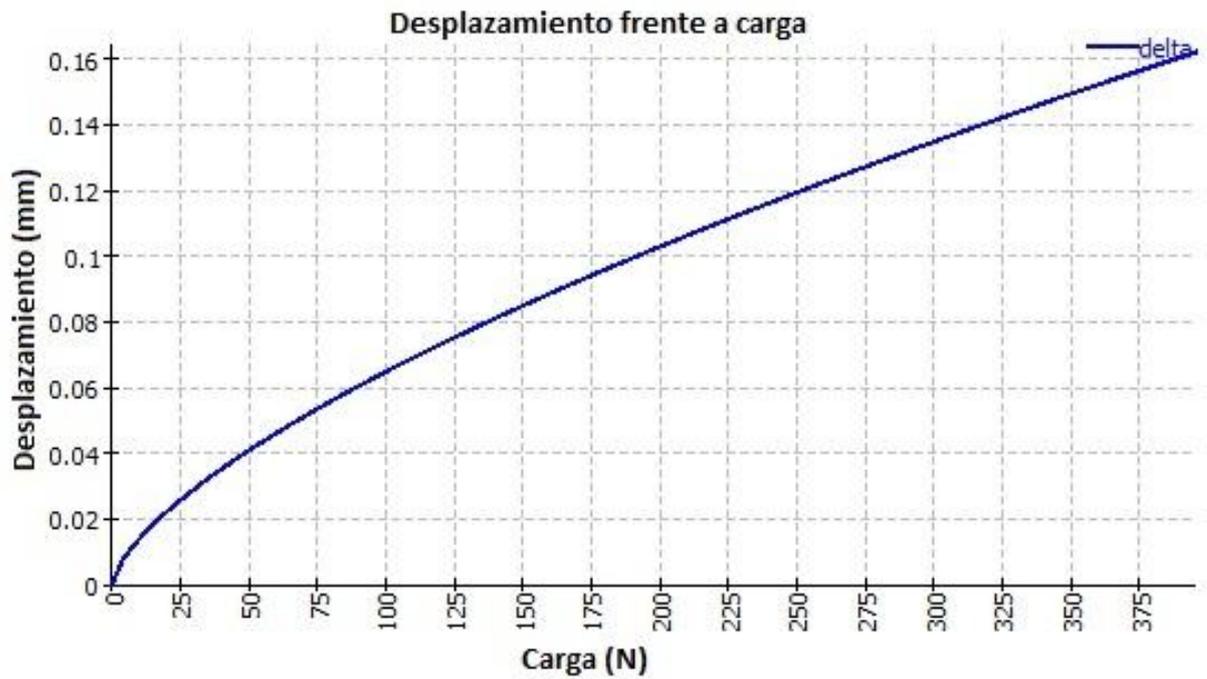


Figura 29. Curvas de desplazamiento frente a carga

3.3.4. Simulación SolidWorks

En este apartado se describirá la creación de los modelos “bola-plano” en SolidWorks. Estos modelos permiten simular la situación de contacto del equipo de desgaste (simulador de rodilla) utilizado para los ensayos de PEUAPM. El programa permite variar las propiedades de los materiales de los sólidos en contacto, así como las condiciones de contorno impuestas, la malla utilizada, etc.

Primero, se realizará un estudio estático de la presión de contacto entre la bola de acero y la probeta de PEUAPM. Para ello se creó un modelo simplificado del equipo de desgaste (simulador de rodilla) utilizado para los ensayos. Este modelo solamente consta de dos piezas, una de ellas la bola de acero inoxidable 316-L sobre la cual se impondrá la carga aplicada, y la otra será la probeta de PEUAPM.

A continuación, se impusieron las condiciones de apoyo (sujeciones) de modo que el movimiento de la probeta PEUAPM es impedido en todas direcciones. En el simulador de rodilla la probeta está totalmente fija en la cubeta mediante dos tornillos Allen que imposibilitan su movimiento. Se impuso una carga de 200N sobre la parte truncada de la bola de acero. En los ensayos la probeta soporta un peso de 20Kg aproximadamente. La malla de elementos finitos utilizada se compuso de prismas triangulares con un tamaño global de 4.542mm y una tolerancia de 0.227mm.

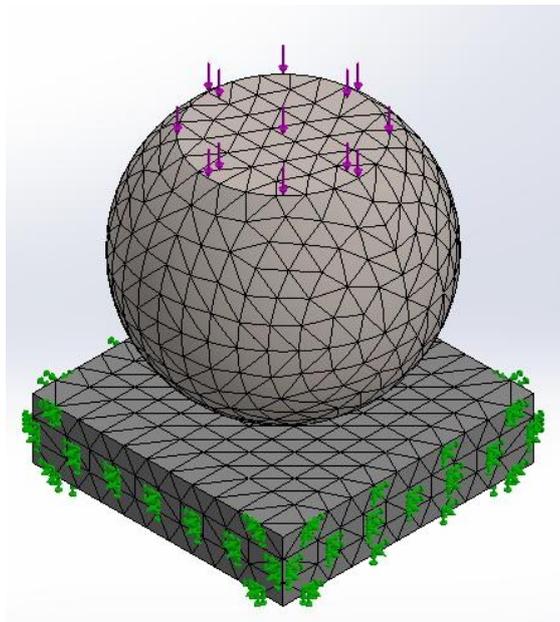


Figura 30. Ensamblaje bola-plano utilizado en SolidWorks

A continuación se crearon tres modelos de análisis dependiendo de las propiedades de los materiales utilizados en los ensayos, los cuales fueron los siguientes:

Probeta PEUAPM	E (Mpa)
β 50KGy (sin TT)	803
β 50KGy Remelting (TT-150°C)	642
β 50KGy Annealing (TT-130°C)	764

Imponiendo las condiciones anteriores se obtuvieron los siguientes resultados para la presión de contacto.

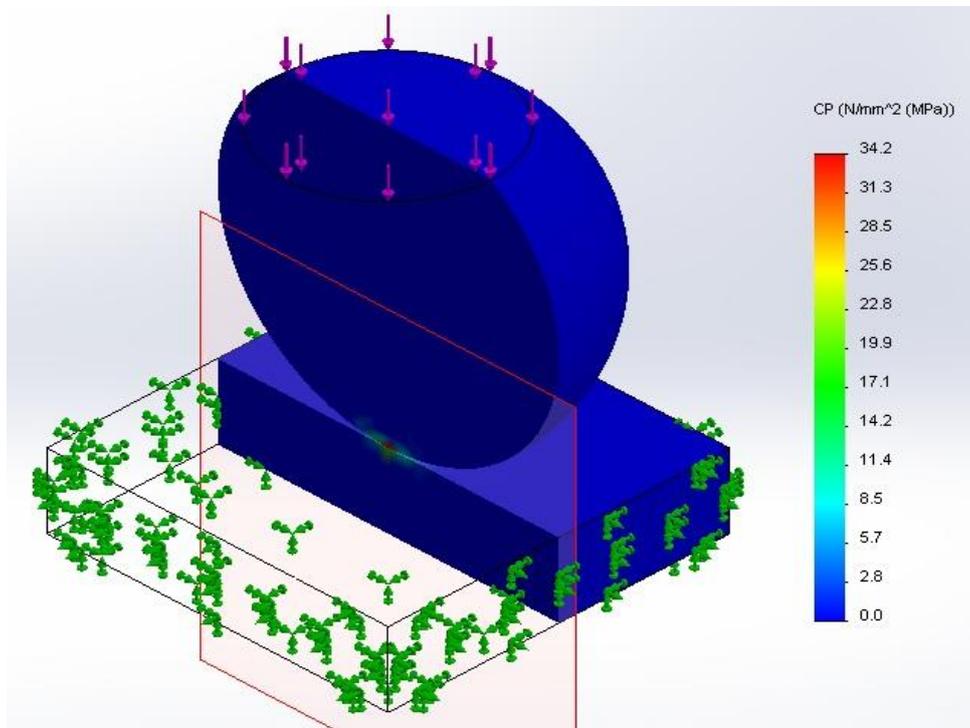


Figura 31. Presión de contacto β 50KGy (sin TT)

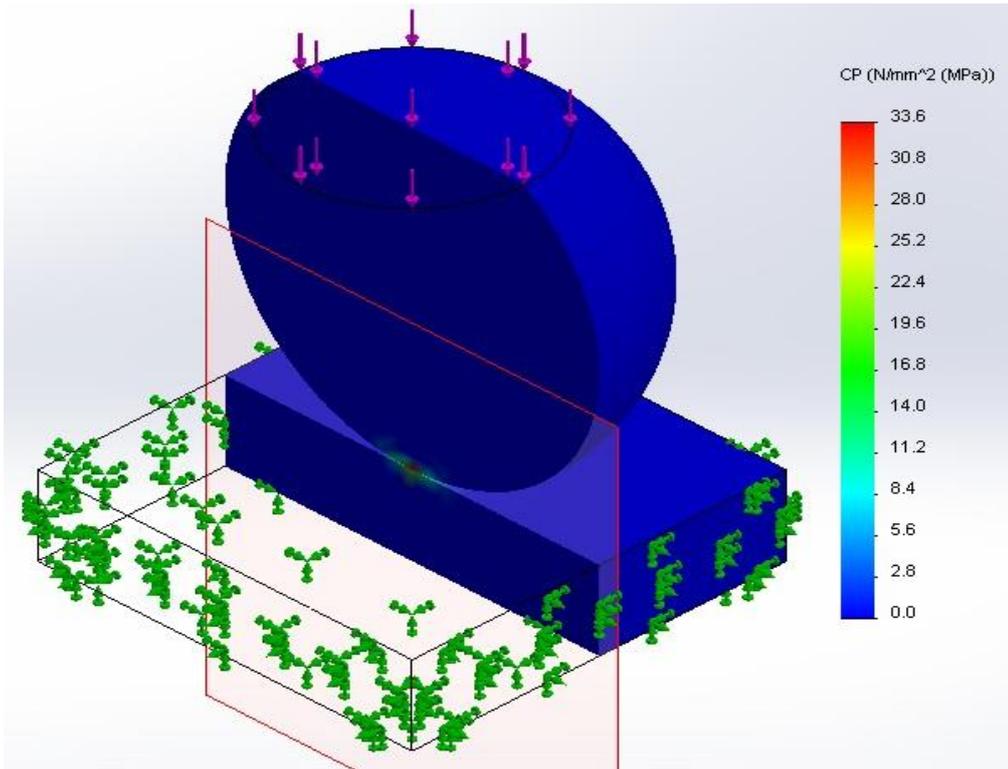


Figura 32. Presión de contacto β 50Kgy Remelting (TT-150°C)

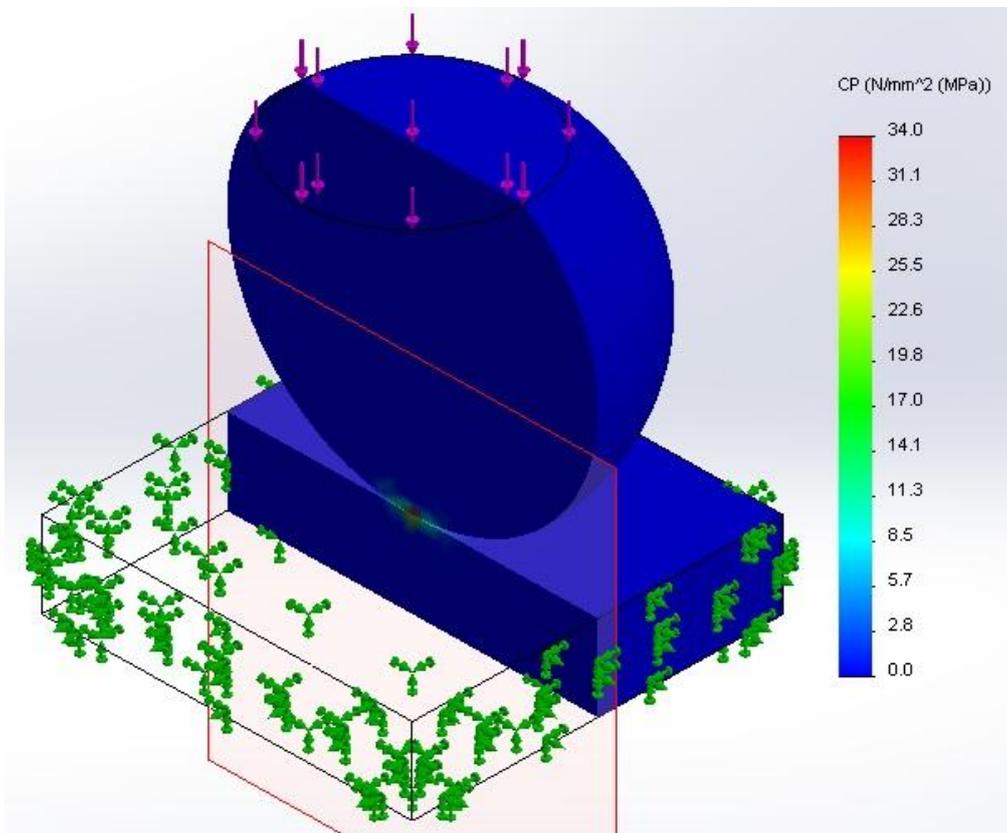


Figura 33. Presión de contacto β 50Kgy Annealing (TT-130°C)

Vemos como la tensión de contacto se asemeja bastante a las calculadas por la teoría de Hertz y por el software anteriormente citado *MESYS Hertzian Stress Calculation v1*. En este caso se han calculado las tensiones para las tres probetas que han sido ensayadas en el simulador.

También se realizó una simulación dinámica del funcionamiento del equipo de desgaste y simulación de rodilla. Para ello, se simplificó la estructura del simulador y solamente se crearon tres partes del equipo, a saber: La cubeta en donde se encuentra la probeta de PEUAPM, el soporte que aguanta el peso del ensayo y la bola de acero 316-L.

En la animación dinámica se reproducen los movimientos principales de translación de la probeta (-1mm, +1mm) y de rotación de la bola (-5°, +5°). Es un esquema sencillo que solamente tiene como función mostrar y enseñar cómo se producen los dos grados de libertad del simulador. En base a este modelo sencillo, podrían variarse las configuraciones de contacto del simulador usando otros sólidos con formas diferentes y comprobar así el funcionamiento mediante SolidWorks.

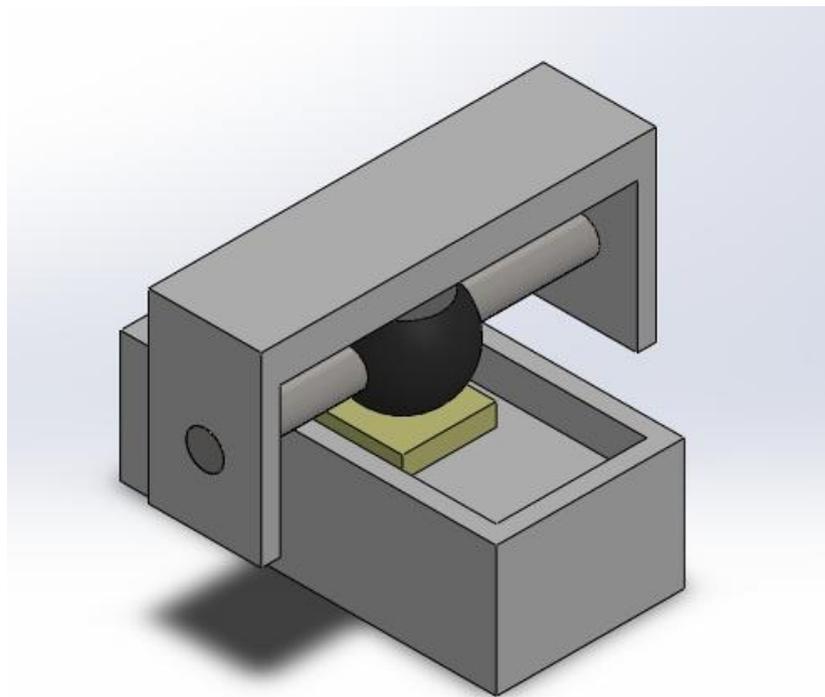


Figura 34. Representación dinámica del simulador de rodilla

3.4. Microscopio confocal

El microscopio confocal emplea una técnica óptica de imagen para incrementar el contraste y/o reconstruir imágenes tridimensionales utilizando un "pinhole" espacial (agujero confocal) que elimina la luz desenfocada o destellos de la lente en especímenes que son más gruesos que el plano focal. El pinhole es una apertura localizada delante del fotomultiplicador que evita el pasaje de fluorescencia de las regiones de la muestra que no están en foco. La luz que proviene de regiones localizadas por encima o por debajo del plano focal no converge en el pinhole y no es detectada por el fotomultiplicador. Esta técnica ha ido adquiriendo cada vez mayor popularidad entre las comunidades científica e industrial. El concepto de imagen confocal fue patentado por Marvin Minsky en 1957.

El rayo laser (luz azul) es filtrado por un agujero y un espacio dicroico. A continuación éste es enfocado mediante una lente objetivo sobre el espécimen y estimula la fluorescencia presente en el mismo (luz verde). La fluorescencia es recolectada por el objetivo y dirigida al espejo dicroico que la refleja y dirige hacia un detector. Un segundo filtro con agujero se coloca frente al detector y solo deja pasar la luz proveniente del plano de enfoque (línea continua). La fluorescencia fuera de foco de las zonas que están por encima y por debajo del plano de enfoque (líneas discontinuas) no pasa por el agujero y por lo tanto no formará parte de la imagen.

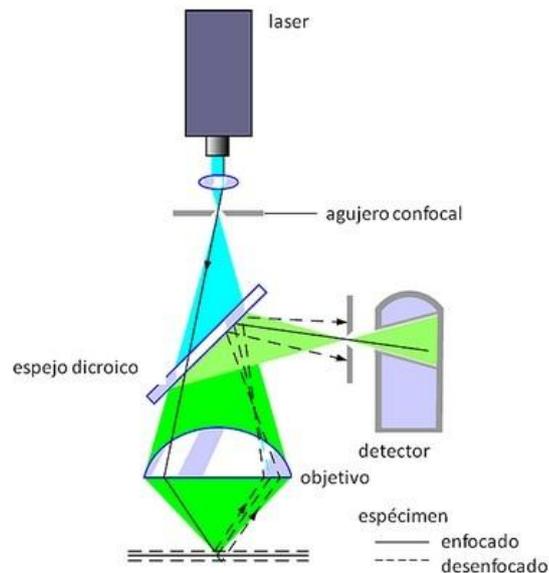


Figura 35. Esquema del principio de funcionamiento del microscopio confocal.

La luz coherente del rayo laser es dirigida por espejos hacia el espécimen (el cual ha sido previamente tratado mediante marcadores fluorescente) iluminándolo punto por punto y de manera seriada, la fluorescencia resultante es medida también punto por punto. Para obtener la información completa, el rayo laser debe ser desplazado por todo el espécimen (en los planos x, y, z) y este proceso es lo que se conoce como escaneo o barrido. Para reconstruir las imágenes a partir de los datos obtenidos, se emplean programas de computación adecuados.

En el presente proyecto se utilizo un microscopio confocal "Sensofar PL μ 2300" como el que se muestra en la figura 36, perteneciente al Departamento de Ciencia y tecnología de Materiales y Fluidos. En nuestro caso, se utilizó para la obtención de topografías de las huellas dejadas en el PEUAPM por el simulador de rodilla en los ensayos. Las topografías fueron realizadas con el objetivo EPI 10X.



Figura 36. Microscopio confocal Sensofar PL μ 2300.

3.5. Caracterización de la oxidación y radicales libres en el PEUAPM

Se sabe que la irradiación tiene como primer efecto la creación de radicales libres por la escisión que se produce en las largas cadenas moleculares. Estos radicales pueden dar lugar a dobles enlaces C=C y a puntos de reticulación, o bien pueden participar en el ciclo de oxidación del material en presencia de oxígeno.

Después de la irradiación de oxidación de UHMWPE a temperatura ambiente se produce la formación de cetonas como principales productos del ciclo de oxidación, junto con hidroperóxidos y cantidades variables de ácidos, alcoholes, ésteres y lactonas.

Se ha demostrado que los hidroperóxidos en UHMWPE son estables a temperatura ambiente, y empiezan a descomponerse a temperaturas superiores a 70 ° C. Por lo tanto, las cetonas y otras especies oxidadas observadas durante la oxidación post-irradiación no pueden resultar sólo de la descomposición de los hidroperóxidos. Teniendo en cuenta estos resultados, se puede suponer que las cetonas también se forman durante el primer paso de oxidación del UHMWPE como consecuencia de una reacción directa entre los radicales libres y el oxígeno [5].

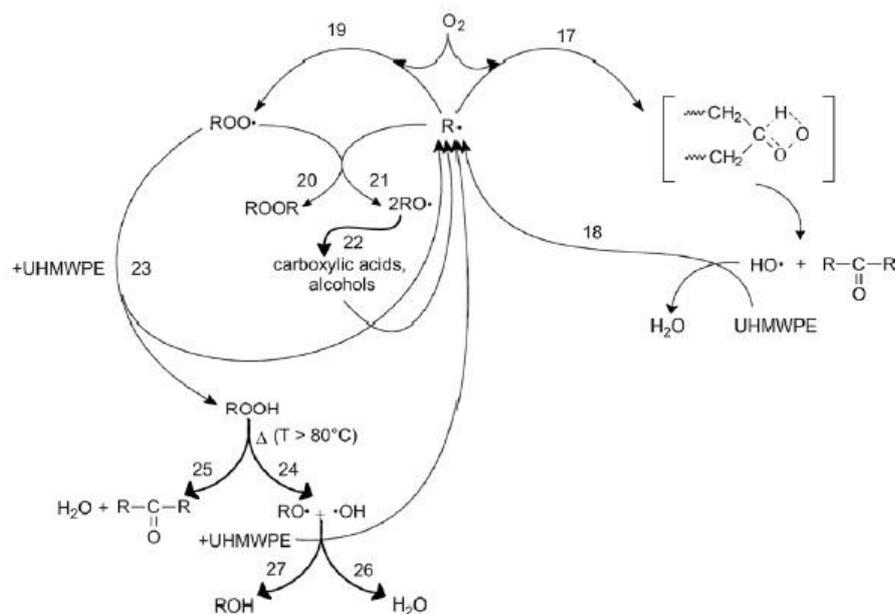


Figura 37. Esquema de oxidación del PEUAPM.

En el proceso de oxidación que se inicia después de la irradiación, la tasa de oxidación disminuye en más de un orden de magnitud en las primeras 100 horas, aunque los radicales alquilo son conformados de manera continua junto con la formación de hidroperóxidos (Esquema 38). La reacción de terminación de los procesos termo-oxidativos se describe generalmente como una reacción entre dos peróxidos. La relativa inmovilidad y la estabilidad del radical peróxido hacen que la terminación bimolecular esté fuertemente desfavorecida en el estado sólido a temperatura ambiente. Lo más probable es que la terminación del ciclo se produzca entre radicales peróxidos (fijados sobre la cadena polimérica) y radicales alquilo, que migran a lo largo de la cadena polimérica, dando lugar a nuevos peróxidos (Figura 38). Esta reacción no se ve impedida cinéticamente y también es posible desde el punto de vista termodinámico. Sin embargo, los peróxidos resultantes no pueden ser revelados con las técnicas de caracterización habituales, por lo tanto su presencia sólo se puede suponer [5].

A continuación se muestran los productos críticos del proceso de oxidación (macro-radicales y productos oxidados).

- **Macro-radical Alquilo (R^\bullet):** Se originan ya sea por interacción directa del polímero con rayos gamma (o haz de electrones) o por abstracción de hidrógeno de los radicales reactivos, tales como, ROO^\bullet , HOO^\bullet , RO^\bullet , OH^\bullet y H^\bullet . Su concentración real depende de la radiación (beta o gamma), la dosis, la tasa de dosis, y el tiempo de observación.
- **Macro-radical Peróxido (ROO^\bullet):** Se forman inmediatamente después de la irradiación a través de la reacción entre los macro-radicales alquilo y el oxígeno presente en la fase amorfa de PEUAPM. La decadencia de ROO^\bullet es tan lenta que han sido encontrados aún después de muchas semanas de almacenamiento a temperatura ambiente en aire.
- **Macro-radical Alcoxi (RO^\bullet):** Es usualmente descrito como un producto de la descomposición térmica de los hidroperóxidos. Sin embargo, en el proceso de oxidación después de la irradiación en temperatura ambiente, no puede originarse a partir de esta reacción porque todos los productos formados siguen una cinética similar a la de la formación de la cetona.
- **Hidroperóxido ($ROOH$):** El radical peróxido puede extraer un átomo de H de una molécula cercana de PEUAPM con la formación asociada de otro macro-radical alquilo en una posición adyacente. La determinación de hidroperóxidos es un factor clave para medir el nivel y el comportamiento de la oxidación.

- **Cetonas (R_2CO):** Se suele identificar como el principal producto de descomposición de hidroperóxidos, su formación tiene el comportamiento semejante al de ROOH.
- **Ácido Carboxílico ($RCOOH$):** Estos ácidos son producidos por la escisión de la cadena polimérica, con un mecanismo que aún no ha sido determinado. La formación de ácido conduce a una disminución de la masa molecular y por lo tanto a un deterioro progresivo de las propiedades mecánicas del PEUAPM.
- **Alcohol Secundario (R_2CHOH):** Los alcoholes se pueden formar a través de la extracción de un hidrógeno de la cadena polimérica por un radical alcoxi.
- **Éster:** Su formación se produce durante la degradación oxidativa, aunque el mecanismo exacto de la formación no es completamente claro.

3.6. Técnica FTIR

La espectroscopia de infrarrojos (IR) es la medición de la absorción de diferentes frecuencias en el infrarrojo por una muestra posicionada en la trayectoria de un haz de luz infrarroja. El objetivo principal del análisis espectroscópico de IR es determinar los grupos funcionales químicos en la muestra. Diferentes grupos funcionales absorben a frecuencias características de la radiación IR. Utilizando varios accesorios de muestreo, los espectrómetros de IR pueden aceptar una amplia gama de muestras, tales como gases, líquidos y sólidos. Por lo tanto, la espectroscopia IR es una herramienta importante y popular para elucidación estructural y la identificación de compuestos.

En términos simples, los espectros de IR se obtienen mediante la detección de cambios en la transmitancia (o absorción), es decir en la intensidad del haz de luz infrarroja en función de la frecuencia.

La Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) ha sustituido recientemente a los instrumentos de dispersión para la mayoría de aplicaciones, debido a su velocidad y sensibilidad superior. Ha ampliado en gran medida las capacidades de espectroscopia de infrarrojos y se ha aplicado a muchas áreas en las que son muy difíciles o casi imposibles los análisis por instrumentos dispersivos. En lugar de considerar cada componente de frecuencia de forma secuencial, como en un Espectrómetro dispersivo de IR, todas las frecuencias son examinadas simultáneamente con la Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR). Hay tres componentes básicos del espectrómetro en un sistema FT: la fuente de radiación, el interferómetro, y el detector.

Esta técnica (FTIR) es utilizada para medir la estructura química del PEUAPM. Se puede realizar bien en polvo de PEUAPM usando la técnica de preparación de pastillas de bromuro de potasio (KBr), o bien sobre el PEUAPM consolidado. Esta última es la técnica que vamos a utilizar en el presente proyecto.

El funcionamiento básico de un espectrómetro FTIR típico sería el siguiente. La radiación IR desde una fuente de banda ancha se dirige en primer lugar a un interferómetro, donde allí la radiación IR es dividida y luego recombinada. Después viajan los haces en diferentes caminos ópticos para generar interferencia constructiva y destructiva. A continuación, el haz resultante pasa a través del compartimento de la muestra y llega al detector.

Para llevar a cabo las medidas en el microscopio FTIR en material consolidado, es necesario preparar una película delgada del material y luego realizar el análisis de infrarrojos en el modo de transmisión. Esta delgada película tiene que tener un espesor aproximado de 200 μm . Para ello esta muestra tiene que ser preparada con un micrótopo. Una vez realizada la muestra, ésta se coloca en la platina del microscopio FTIR. En nuestro caso, el microscopio FTIR utilizado fue un Magna-IR-Espectrómetro 550 Nicolet con microscopio accesorio (Irplan; Spectra Tech.), y con condiciones de ensayo de 32 barridos, resolución 4 cm^{-1} , y midiendo en el rango de frecuencias 4000–400 cm^{-1} . A continuación se realiza la medida con el microscopio FTIR, que nos da un espectro en la pantalla del ordenador. En la figura 38 se muestra un ejemplo de espectro del PEUAPM, en este están indicados los lugares claves para buscar evidencias de degradación y de oxidación.

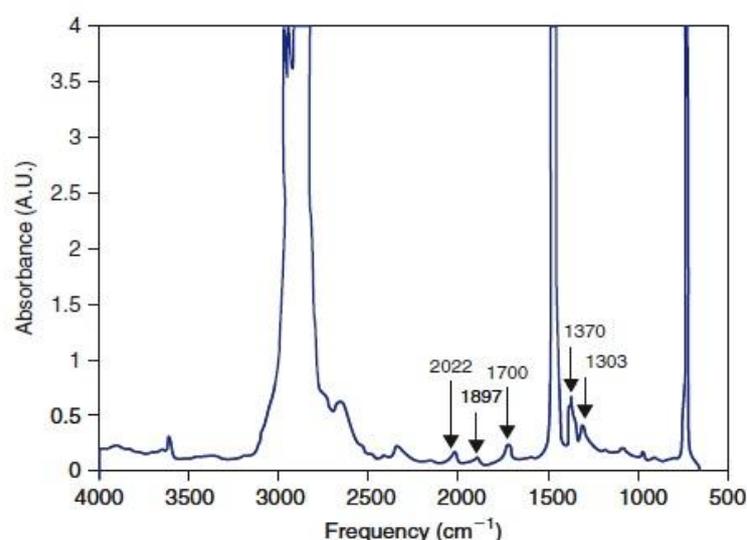
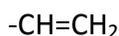


Figura 38. Espectro FTIR de PEUAPM.

La norma ASTM F2102 describe la técnica para medir el índice de oxidación. Este índice de oxidación (OI) se definió como la relación entre el área bajo el pico de absorción pico de carbonilo ($1650-1850\text{ cm}^{-1}$) y el área bajo el pico de metilo / metileno ($1330-1390\text{ cm}^{-1}$). También se ha calculado un índice transvinileno (TVI) que se define como la relación entre el área bajo el pico de los grupos transvinileno ($950-1000\text{ cm}^{-1}$) y el área bajo el pico de metilo / metileno ($1330-1390\text{ cm}^{-1}$). Además se ha estudiado en general la absorción de los grupos correspondientes a dobles enlaces a las frecuencias de $900, 965$ y 990 cm^{-1} .



La presencia de un grupo vinilo terminal por lo general implica que la cadena del polímero se ha roto, lo que dejará atrás un grupo vinilo en cada final de cadena.

3.7. Búsqueda de radicales libres. Técnica ESR

Como se ha comentado anteriormente, uno de los objetivos de este proyecto es la búsqueda de radicales libres en el PEUAPM que hayan sido generados por la aplicación de carga cíclica mediante el simulador de rodilla. Para saber si las probetas de PEUAPM se pueden llegar a oxidar debido a la presencia de radicales libres, éstas son sometidas a ensayos del orden de medio millón de ciclos aproximadamente en el simulador y posteriormente analizadas mediante espectroscopia ESR (resonancia de espín electrónico).

ESPECTROSCOPIA DE RESONANCIA DE ESPIN ELECTRÓNICO

Ya hemos visto que los radicales libres residuales atrapados en el PEUAPM causan problemas a largo plazo en la estabilidad del componente de PEUAPM en una prótesis implantada. El único método conocido de medición directa de radicales libres residuales se base en la espectroscopia de resonancia de espín electrónico, o ESR.

El ESR (resonancia de espín electrónico) es una técnica espectroscópica para el estudio de materiales con electrones desapareados. El funcionamiento básico es la excitación de los espines de los electrones. La espectroscopia ESR se basa en las propiedades fundamentales de electrones, con una masa $m_e = 9,11 * 10^{-31}\text{ Kg}$ y una carga de $e = -1,6 * 10^{-19}\text{ Coulomb}$. Un electrón desapareado en átomos o moléculas

posee tanto momento magnético como momento angular, y la relación entre ambos se conoce como relación giromagnética [6].

La espectroscopia ESR mide las diferencias de energía entre los estados originados por el desdoblamiento que se genera al poner un sistema con electrones desapareados en un campo magnético externo. La diferencia de energía ΔE entre los estados se conoce como la energía Zeeman, y viene dada por $g\beta H_Z$, donde g es el factor de división espectral (factor de Landé), comúnmente conocido como el g -valor; β es el magnetón de Bohr ($\beta = 9,27 * 10^{-24} \text{J/T}$); y H el campo magnético aplicado. Las transiciones entre estos estados pueden ser estimuladas por un campo magnético oscilante de frecuencia f sólo cuando la energía de excitación sea igual a ΔE , es decir, $hf = \Delta E = g\beta H$, donde h es la constante de Planck ($h = 6,63 * 10^{-34} \text{J.s.}$). La condición $hf = g\beta H_r$; se conoce como condición de resonancia, donde H_r , es el campo magnético externo en la resonancia [6].

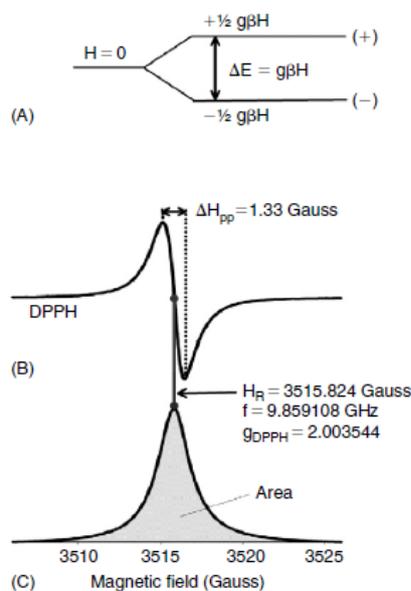


Figura 39. (A) Energía de Zeeman ΔE de un spin electrón desapareado en un campo magnético externo H . (B) En primer espectro ESR derivado de (DPPH). (C) La curva de absorción obtenida mediante la integración del espectro de primera derivada

Las medidas de ESR realizadas para este proyecto fueron realizadas a temperatura ambiente en un espectrómetro Bruker Elexsys E580 trabajando en la banda X. La potencia de microondas fue 0.2 mW y la modulación de la amplitud 0.1 mT. Se prepararon muestras $2 \times 2 \times 10 \text{ mm}^3$ que fueron fijadas con grasa de vacío a un portamuestras de metacrilato.

3.8. Otros métodos o máquinas

Para la elaboración y desarrollo de dicho proyecto también se utilizaron diferentes máquinas de las descritas anteriormente, a continuación se muestran los distintos elementos utilizados en el presente proyecto.

Se utilizó un horno de vacío para realizar un rápido envejecimiento de las probetas una vez eran ensayadas, este horno pertenece a la compañía "LTE Scientific". Este horno se calienta por medio de calentadores eléctricos sujetos en ambos lados, superior e inferior de la cámara, lo que garantiza una calor uniforme distribución y la eliminación de los posibles puntos fríos. La temperatura es controlada por medio del controlador electrónico, tiene una capacidad de 63 litros.



Figura 40. Horno de vacío LTE Scientific Qualivac 63

Como se comentará posteriormente el horno se utilizó a una temperatura de 120°C durante 36h y con atmósfera de aire.

Para la preparación de las probetas para ESR se utilizó una fresadora "Wabeco F1210E" del departamento de Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos. Para realizar los ensayos de ESR se necesitan probetas de 2x2x10 (mm) lo que supone un gran trabajo de precisión de mecanizado con la fresa. Las probetas se mecanizaron reduciendo su tamaño a 2x20x10 con la fresa y posteriormente fueron cortadas al tamaño final mediante una hoja de cúter.

El PEUAPM al igual que otros plásticos, es un material que por sus características no es muy cómodo de mecanizar. La extracción de viruta no es ni fluida ni constante, y además el material se deforma fácilmente mientras es mecanizado. Para el mecanizado con la fresa, se utilizó una broca de 10mm y unas velocidades de alrededor de 60 m/min.



Figura 41. Fresadora wabeco F1210E

Además de estos equipos mencionados, también se han utilizado un micrómetro para medir las muestras tanto de FTIR como ESR, una balanza analítica “METTLER TOLEDO” para pesar las muestras ESR, un micrótopo “LEICA SM 2000R” para preparar las muestras de 200 μm utilizadas en el FTIR.

4. Resultados y conclusiones

A continuación se expondrán los resultados y conclusiones obtenidos en la elaboración del proyecto. Primero, se va a mencionar qué probetas han sido ensayadas en el simulador de rodilla:

- (1 probeta) PEUAPM β 50KGy Sin TT (virgen)
- (2 probetas) PEUAPM β 50KGy Con TT a 150 °C (Remelting)
- (1 probeta) PEUAPM β 50KGy Con TT a 130 °C (Annealing).

Para una información más detallada de los ensayos consultar el “ANEXO 1: Tablas ensayo simulador de rodilla” adjunto a la presente memoria.

MICROSCOPIA CONFOCAL

El día 14/02/2013 se comenzó con los ensayos de la primera probeta β 50KGy Remelting. Estos ensayos fueron programados a 86400 ciclos diarios, y se siguió esta rutina hasta el día 22/02/2013 en el que la probeta había alcanzado ya los 518400 ciclos en total. El día 25/02/2013 la probeta se introdujo al horno a 120 °C durante 36h. Una vez la probeta cumplió el tiempo establecido de envejecimiento artificial se conservó en un lugar seco y fresco. El día 07/03/2013 se continuaron los ensayos con la probeta ya envejecida. Se siguió el mismo protocolo que anteriormente de 86400 ciclos diarios hasta el día 15/03/2013, en el que la probeta alcanzó un total de 1036800 ciclos. La probeta se congeló para posteriores observaciones y medidas.

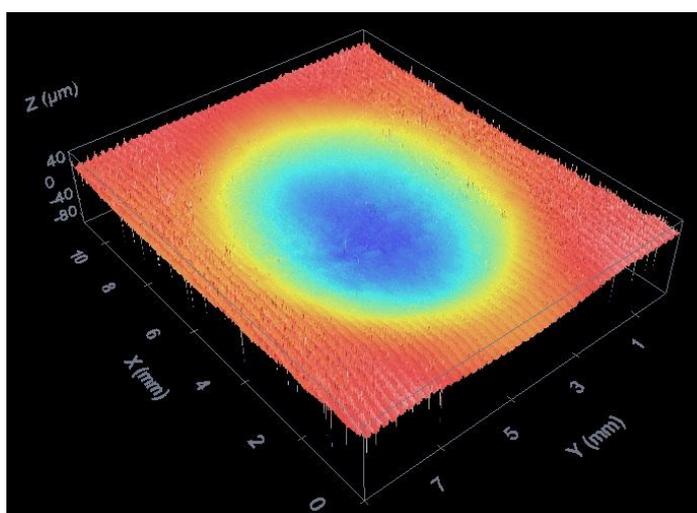


Figura 42. Topografía huella β 50KGy Remelting (ensayada + envejecimiento + ensayada).

En la figura 42 se muestra la topografía de la huella dejada por el simulador de rodilla en la probeta β 50KGy Remelting (1036800 ciclos en total). Esta probeta se analizó con el microscopio confocal para ver las dimensiones de la huella de desgaste, su profundidad y más características que nos puedan dar información acerca de la deformación plástica y del desgaste sufridos por el plástico.

Como se observa en la topografía el simulador ha dejado una huella uniforme y prácticamente simétrica tanto en el eje X como en el eje Y. La huella dejada por el simulador tiene las siguientes dimensiones:

- Eje X = 7,96mm
- Eje Y = 6,45mm
- Profundidad máxima eje Z = 92,61 μ m

La siguiente probeta de PEUAPM ensayada fue β 50KGy Annealing. De nuevo, se siguió la misma rutina que para la anterior probeta β 50KGy Remelting. Se comenzó la aplicación de carga cíclica mediante el simulador el 18/03/2013, y terminó el 26/03/2013 con 531000 ciclos. Al finalizar la probeta β 50KGy Annealing fue congelada. El día 09/04/2013 la probeta fue envejecida en el horno a 120 °C durante 36h. Una vez envejecida se continuaron los ensayos en el simulador hasta el día 19/04/2013 donde la probeta alcanza 1044000 ciclos en total.

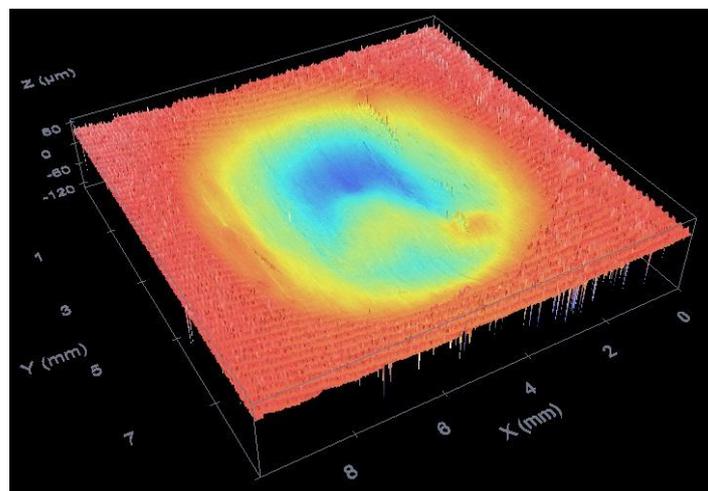


Figura 43. Topografía huella β 50KGy Annealing (ensayada + envejecimiento + ensayada).

En la topografía de la huella de la probeta β 50KGy Annealing se puede observar como no existe simetría respecto al eje X. Esto se debe a que el tratamiento térmico post-irradiación (annealing) hace que la probeta tenga menos resistencia a la oxidación, y por tanto desarrollar una elevada oxidación se produzca la delaminación

del PEUAPM. Como se observa en la figura 44 la probeta β 50KGy Annealing dejó muchos restos de PEUAPM delaminado en la bola del simulador. La delaminación se produjo en el segundo día de ensayo en el simulador después del envejecimiento acelerado. No se observaron indicios de delaminación en los días sucesivos.

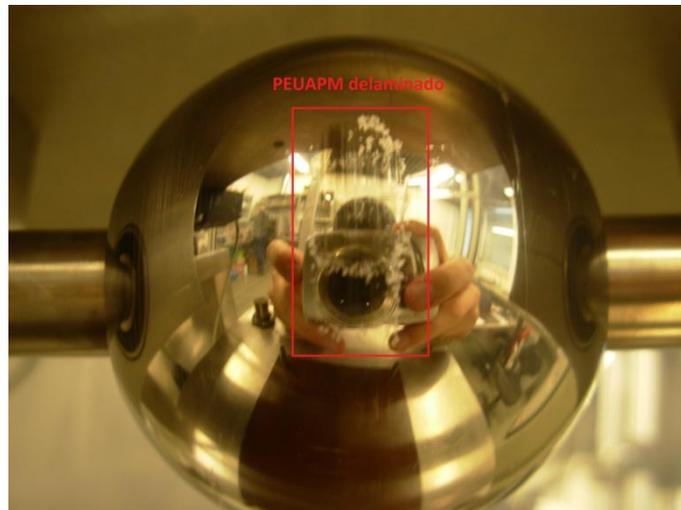


Figura 44. PEUAPM dejado en la bola durante el ensayo

Las dimensiones de la huella dejada por el simulador en la probeta β 50KGy Annealing tras 500000 ciclos, envejecimiento y otros 500000 ciclos son las siguientes:

- Eje X = 6,61mm
- Eje Y = 7,85mm
- Profundidad máxima eje Z = 112,24 μ m

La última probeta de PEUAPM a ensayar fue β 50KGy Remelting, esta probeta se empezó a ensayar el día 03/05/2013 y terminó el 10/05/2013 con 518400 ciclos. Esta probeta no fue envejecida.

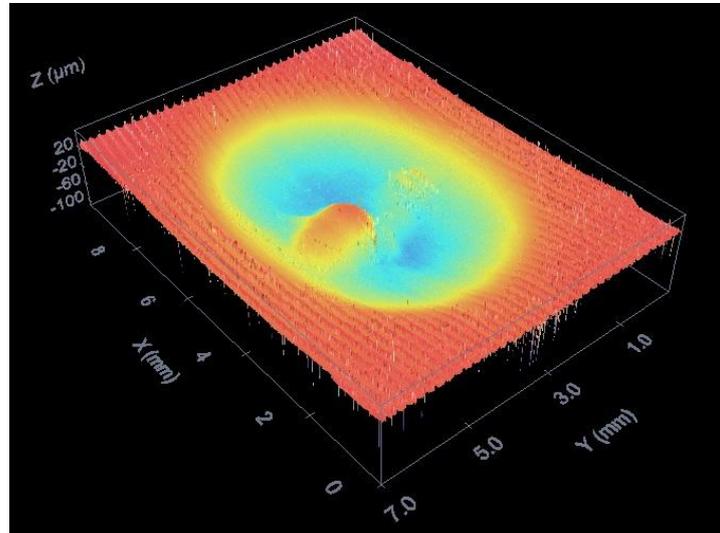


Figura 45. Topografía huella β 50KGy Remelting (ensayada).

Las dimensiones de la huella dejada por el simulador en la probeta β 50KGy Remelting sin envejecimiento son las siguientes:

- Eje X = 7,27mm
- Eje Y = 5,42mm
- Profundidad máxima eje Z = 79,51 μ m

Se llega a la conclusión evidente que el material que más desgaste sufre durante todo el proceso es β 50KGy Annealing, ya que su huella es la de mayor volumen. Esto permite validar el simulador de rodilla como equipo para discriminar el comportamiento a desgaste de diferentes materiales, en particular de aquellos que ven disminuidas sus propiedades por la oxidación.

ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

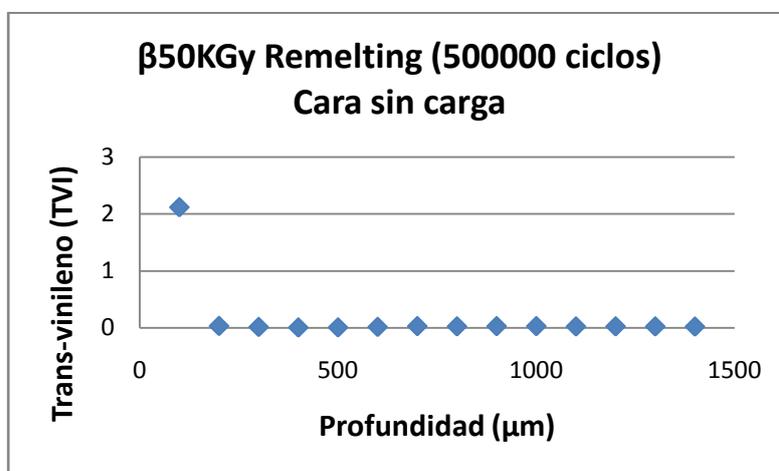
Las muestras de PEUAPM obtenidas de las probetas ensayadas en el simulador FTIR fueron medidas en el Instituto de Carboquímica de Zaragoza (ICB). Una vez obtenidos los espectros, que se tomaban a distancias cada vez mayores de la superficie, estos fueron estudiados y analizados especialmente en los picos a frecuencias en torno a los

1715 cm^{-1} , a los 1330 cm^{-1} y a los 965 cm^{-1} aproximadamente. Se realizaron medidas para las siguientes probetas:

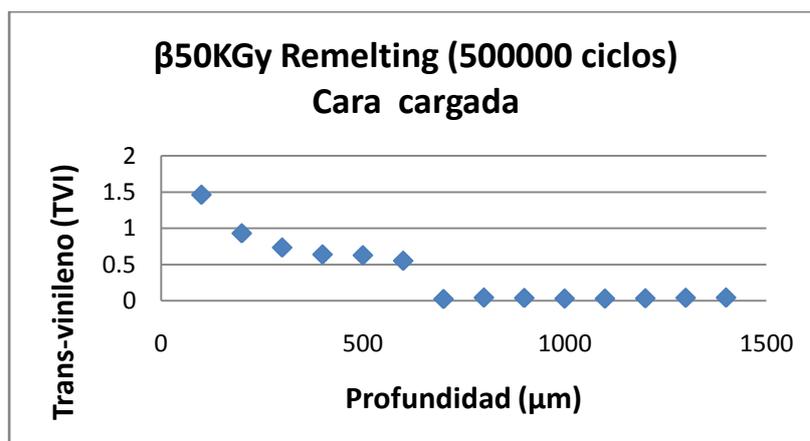
- (2 probetas) PEUAPM β 50KGy Con TT a 150°C (Remelting)
- (1 probeta) PEUAPM β 50KGy Con TT a 130 °C (Annealing).

Se calcularon las áreas por debajo de los picos mencionados anteriormente y se elaboraron las siguientes graficas con el índice de oxidación (OI) y con el Transvinileno (TVI).

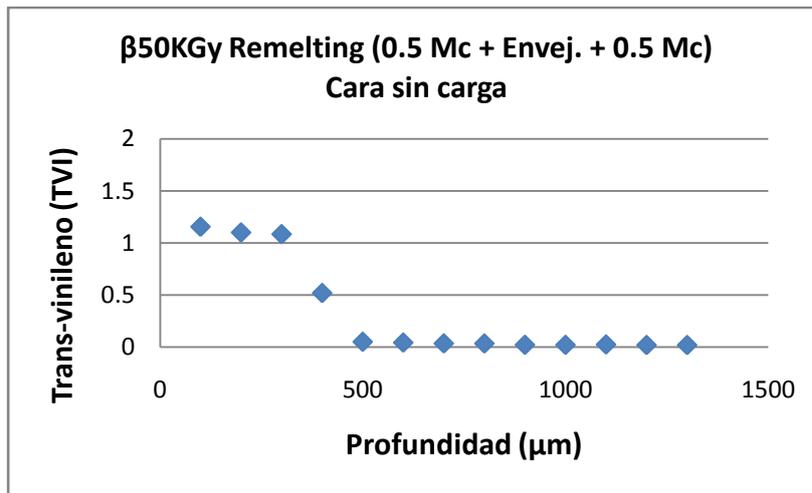
Primero se expondrán las graficas de Transvinileno (TVI).



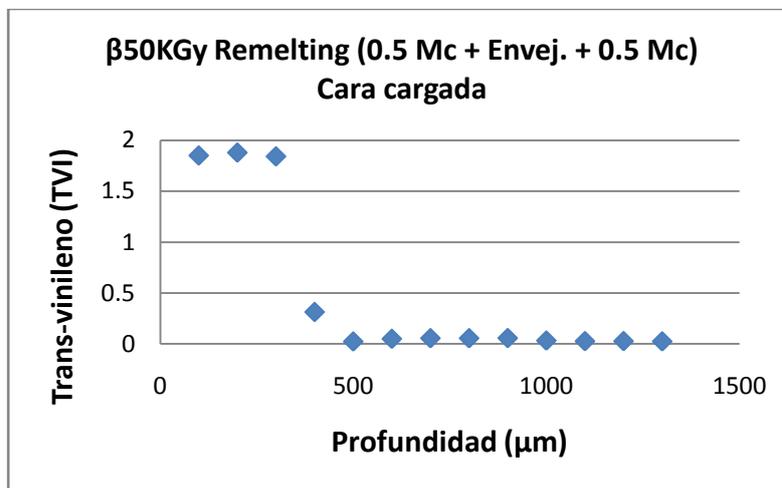
Grafica 4.1. β 50KGy Remelting (sin envejecimiento) Cara sin carga.



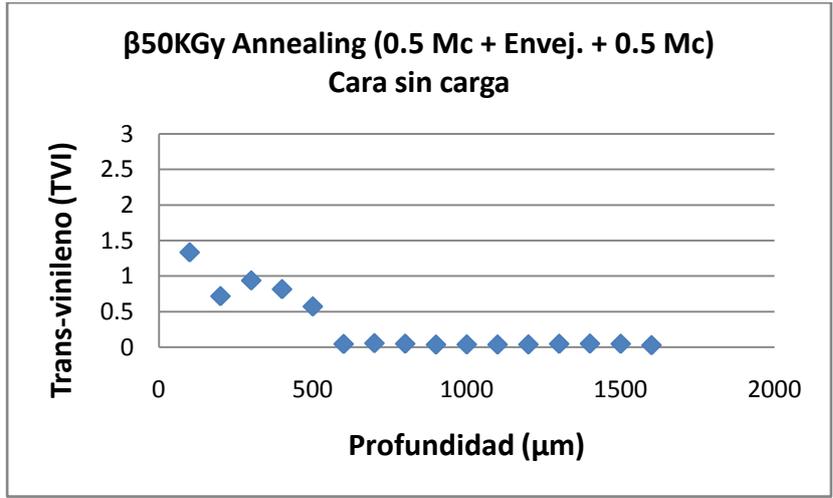
Grafica 4.2. β 50KGy Remelting (sin envejecimiento) Cara cargada.



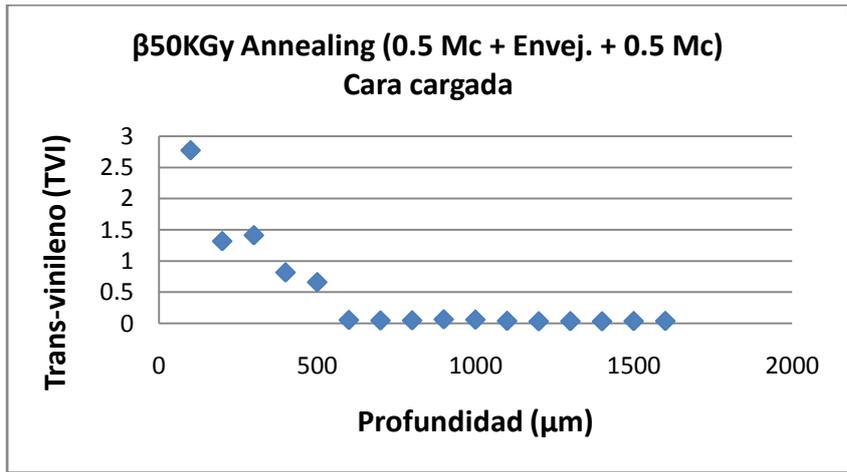
Grafica 4.3. β50KGy Remelting (envejecimiento) Cara sin carga.



Grafica 4.4. β50KGy Remelting (envejecimiento) Cara cargada.



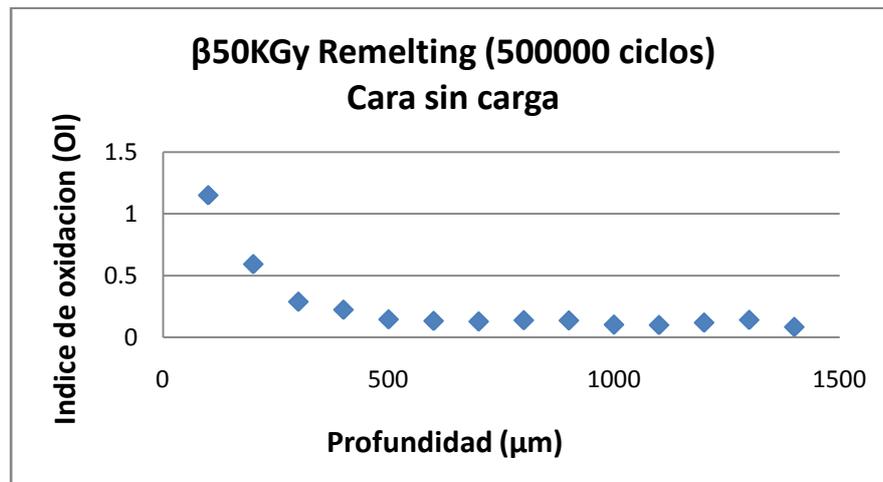
Grafica 4.5. β50KGy Annealing (envejecimiento) Cara sin carga.



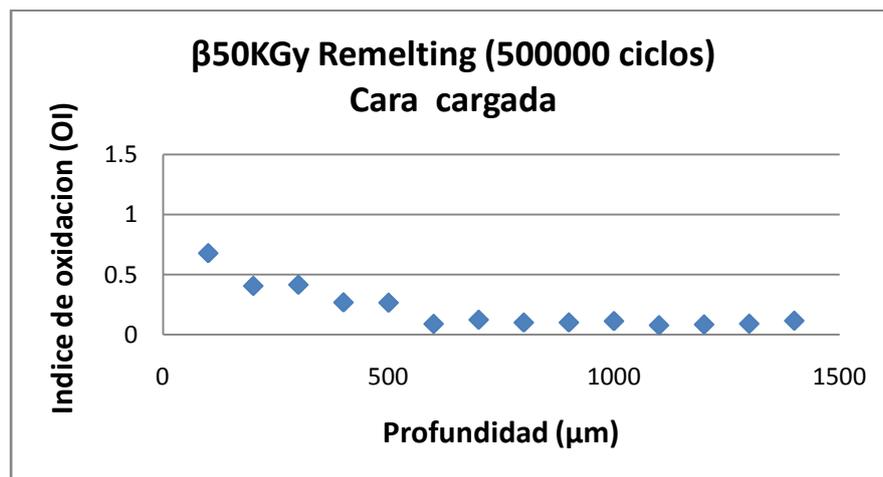
Grafica 4.6. β50KGy Annealing (envejecimiento) Cara cargada.

Las gráficas del índice Transvinileno (TVI) deben analizarse con precaución, ya que a la hora de analizar los espectros en el pico de transvinileno ($950-1000\text{ cm}^{-1}$) se constató que el espectro en esta zona presentaba mucho ruido.

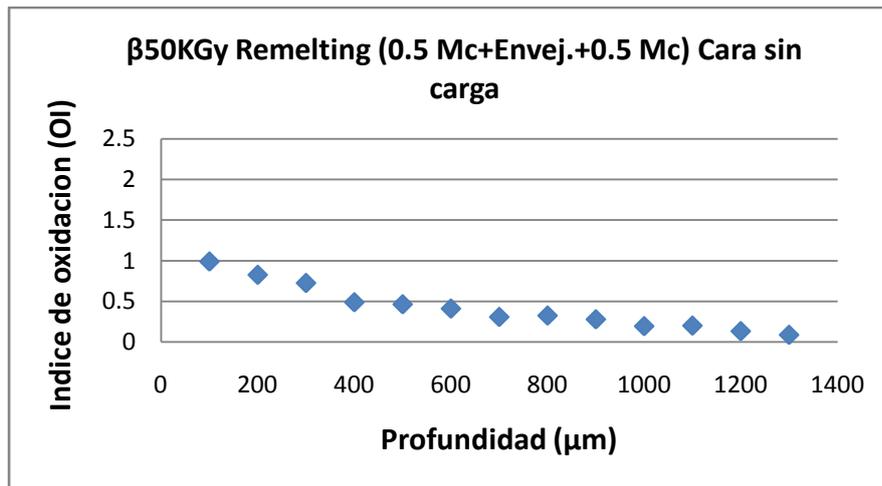
A continuación se van a analizar las graficas del índice de oxidación (OI).



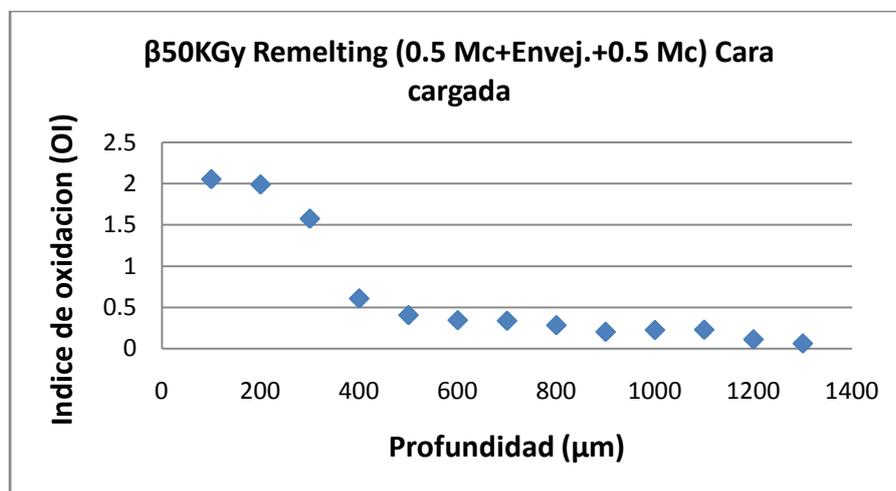
Grafica 4.7. β50K Gy Remelting (sin envejecimiento) Cara sin carga.



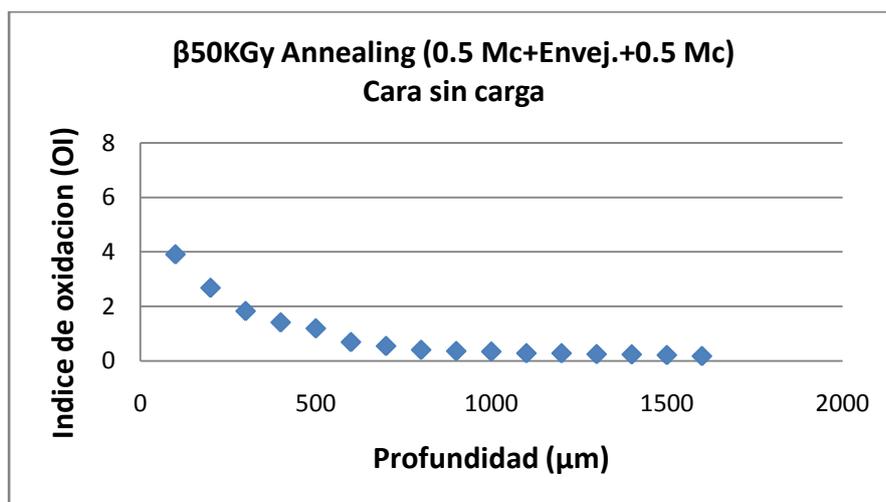
Grafica 4.8. β50K Gy Remelting (sin envejecimiento) Cara cargada.



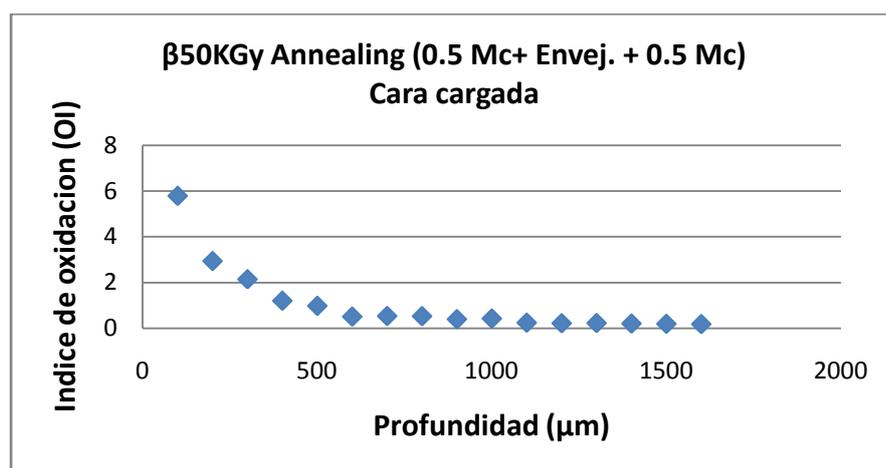
Grafica 4.9. β50KGy Remelting (envejecimiento) Cara sin carga.



Grafica 4.10. β50KGy Remelting (envejecimiento) Cara cargada.

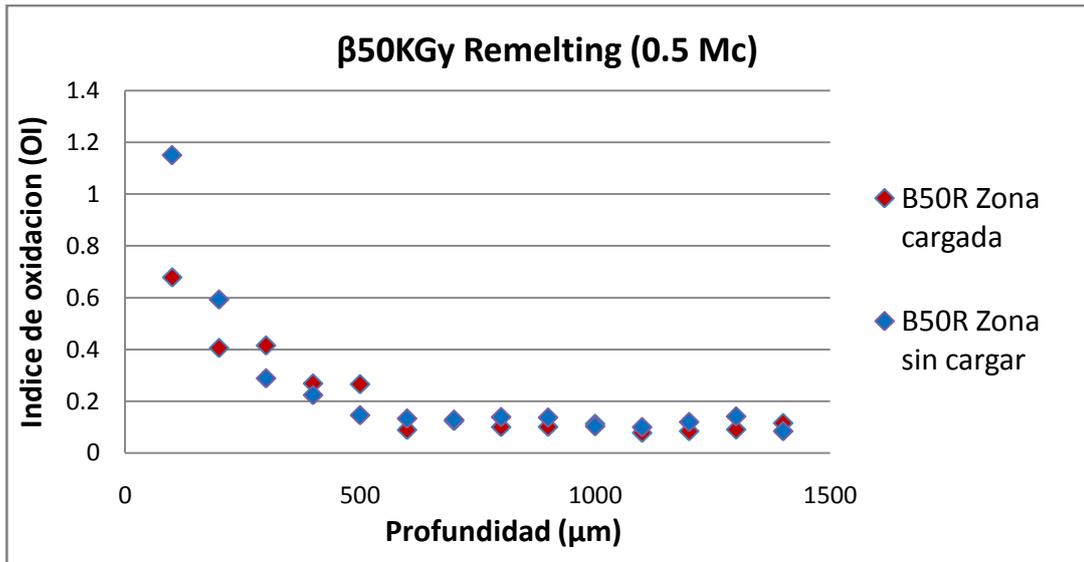


Grafica 4.11. β50K Gy Annealing (envejecimiento) Cara sin carga.

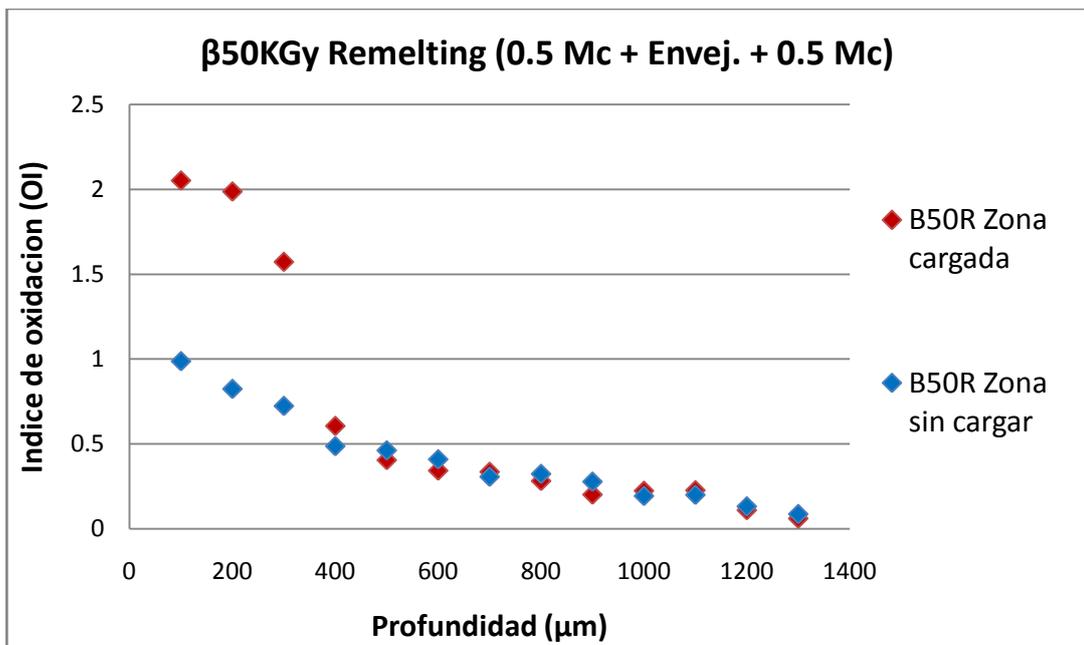


Grafica 4.12. β50K Gy Annealing (envejecimiento) Cara cargada.

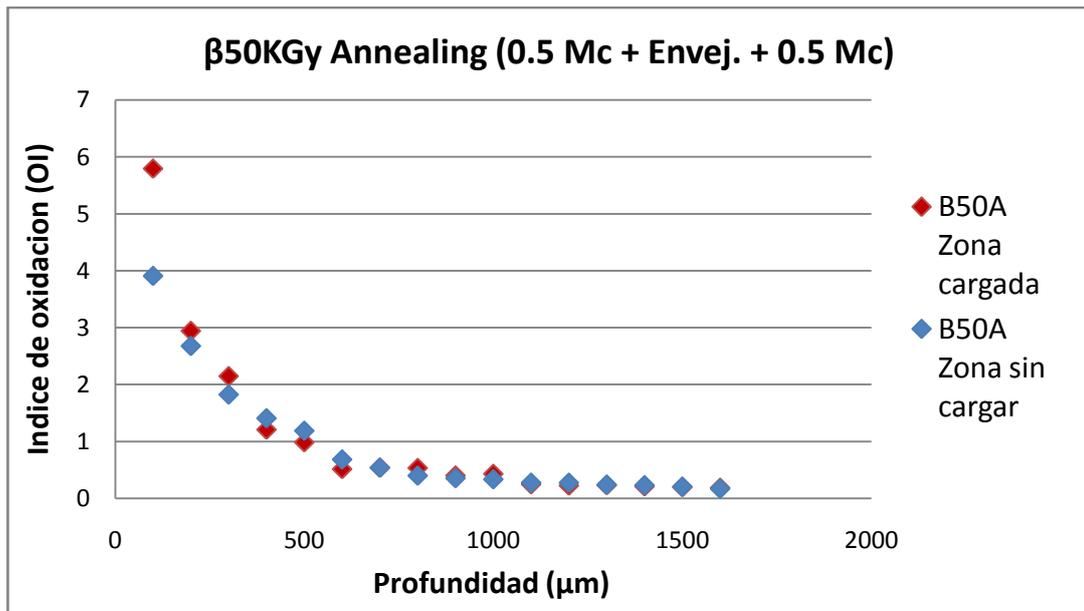
Como se puede observar en las anteriores graficas el índice de oxidación (OI) varía dependiendo de si la zona estuvo cargada o no, y parece que las zonas cercanas a la superficie cargada están más oxidadas. Esto podría indicar que la carga mecánica acentúa la oxidación del PEUAPM. A continuación se van a comparar en un mismo grafico el índice de oxidación para la zona cargada y la zona sin cargar, y así ver cómo afecta el simulador de rodilla en la oxidación.



Grafica 4.13. β50K Gy Remelting (0.5 Mc).



Grafica 4.14. β50K Gy Remelting (0.5 Mc + Envej. + 0.5 Mc).



Grafica 4.15. $\beta 50\text{KGy}$ Annealing (0.5 Mc + Envej. + 0.5 Mc).

Se puede observar como en la zona cargada el índice de oxidación (OI) es mayor tanto para la probeta remelting (envejecida) como para la annealing (envejecida). Esto nos indica que la carga cíclica del simulador sobre el PEUAPM podría acentuar la oxidación en estos PEUAPM.

ESPECTROSCOPIA DE RESONANCIA DE ESPIN ELECTRÓNICO (ESR)

El día 20/11/2012 se puso el primer ensayo en el simulador, se programó para que realizara 500000 ciclos. El ensayo se paró manualmente a 257000 ciclos, ya que la bola había girado -45° respecto al origen. Se volvieron a reanudar los ensayos, esta vez hasta completar otros 150000 ciclos. El simulador terminó de ensayar la probeta el día 28/11/2012 con un total de 407000 ciclos.

La probeta “PEUAPM $\beta 50\text{KGy}$ ” fue llevada a la fresa para preparar las muestras de ESR (2X2X10) mm. Además, también se sacaron muestras de una probeta de PEUAPM virgen ensayada a fatiga en modo tracción hasta aproximadamente 300000 ciclos, y de otra de PEUAPM virgen sin ensayar. A continuación se presentan los pesos de las muestras (Tabla 4.1).

Probetas PEUAPM	Lectura Peso (gr)
B50 KGy sin TT (Virgen)(Zona sin carga)	0,03502
B50 KGy sin TT (Virgen)(Zona con carga)	0,03405
Fatiga ensayada (Virgen) Centro probeta	0,03427
Fatiga ensayada (Virgen) Exterior probeta	0,03436
Fatiga sin ensayar (Virgen)	0,03386

Tabla 4.1. Peso muestras ESR de PEUAPM en gr.

Las probetas fueron llevadas al equipo ESR del Grupo de Espectroscopía de Resonancia Paramagnética Electrónica. Los resultados obtenidos fueron los presentados en las siguientes figuras:

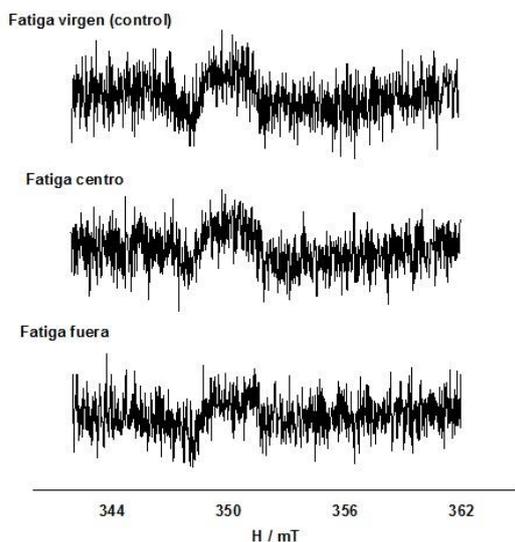


Figura 46. Espectro ESR muestras fatiga.

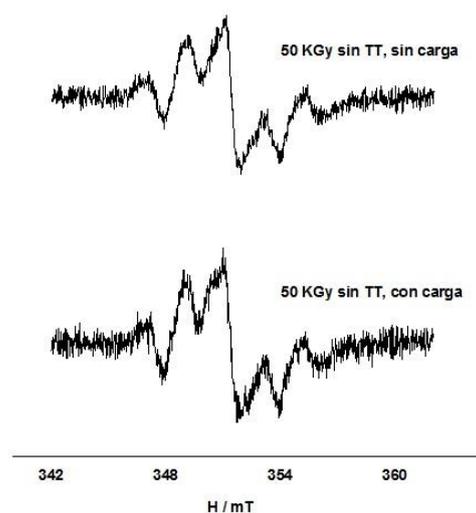


Figura 47. Espectro ESR muestras 50KGy.

En la figura 46 se muestra el espectro ESR de las muestras de PEUAPM virgen ensayadas a fatiga y no ensayadas. Se puede observar que estos espectros son totalmente idénticos y no se detectan señales de ningún radical libre en su estructura. En la figura 47 está representado el espectro ESR de la probeta PEUAPM β 50KGy Virgen ensayada en el simulador. Se pueden ver unos picos que indicarían la presencia de radicales libres, pero estos radicales libres son los producidos por la radiación beta del PEUAPM. También se observa que no hay cambios significativos entre la probeta que ha sufrido la carga y la que no ha sufrido carga.

5. Referencias

[1] - *A Primer on UHMWPE (chapter 1). UHMWPE Biomaterials Handbook*. Steven M. Kurtz.

[2] - *Thermal and dynamic mechanical properties of vitamin E and blended ultra high molecular weight polyethylenes*. J.A. Puértolas, M.J. Martínez Morlanes, M.D. Mariscal, F.J. Medel. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010.

[3] - *Tribological Assessment of UHMWPE in the Knee (chapter 26). UHMWPE Biomaterials Handbook*. Steven M. Kurtz.

[4] - *Thermomechanical behavior of virgin and highly crosslinked ultra-high molecular weight polyethylene used in total joint replacements*. S.M. Kurtz, M.L. Villarraga, M.P. Herr, J.S. Bergstrom, C.M. Rimnac, A.A. Edidin.

[5] - *Mechanisms of Crosslinking, Oxidative Degradation and Stabilization of UHMWPE (chapter 21). UHMWPE Biomaterials Handbook*. Steven M. Kurtz.

[6] - *ESR Insights into Macroradicals in UHMWPE (chapter 29). UHMWPE Biomaterials Handbook*. Steven M. Kurtz.

[7] - Wikipedia- Mecánica de contacto
<http://es.wikipedia.org/w/index.php?oldid=58244968>

[8] - *Contact mechanics*. KL Johnson. Cambridge: Cambridge University Press, 1985

[9] - *Contact modeling — forces*. G.G. Adams, M. Nosonovsky

[10] - *Contact mechanics in tribology*. I.G. Goryacheva, (1998)

6. Agradecimientos

Quisiera dar las gracias en primer lugar a Francisco J. Medel por la oportunidad de realizar este proyecto a su lado, además de por su ayuda, paciencia y apoyo. También a todos los miembros del Departamento de Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos por todo el material y ayuda prestada durante la elaboración del presente proyecto, en particular a José Antonio Puértolas y Javier Pascual del Grupo de Biomateriales. Finalmente agradecer a toda mi familia su apoyo y ánimos.

Muchas gracias.