

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA
APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA**

UNIDAD QUERÉTARO

POSGRADO EN TECNOLOGÍA AVANZADA

**Estudio del efecto del texturizado en la
biolubricación del par tribológico AISI
316L/UHMWPE**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN TECNOLOGÍA AVANZADA

PRESENTA

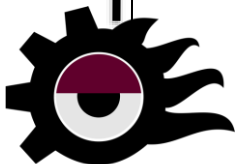
Joana Lizbeth Montes Seguedo

DIRECTORES

Dr. Iván Domínguez López

Dr. Adrián Luis García García

Santiago de Querétaro, Qro. a 6 de enero del 2022.



CICATA-IPN
QUERÉTARO



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTORES DE TESIS

México, D.F. a 4 de diciembre del 2017

El Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA-Qro. en su sesión ordinaria No. 171201 celebrada el día 1 del mes de diciembre conoció la solicitud presentada por el(la) alumno(a):

| | | |
|------------------|------------------|----------------------|
| <u>Montes</u> | <u>Seguedo</u> | <u>Joana Lizbeth</u> |
| Apellido paterno | Apellido materno | Nombre (s) |

Con registro:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| B | 1 | 7 | 1 | 2 | 4 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|---|

Aspirante de: Doctorado

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:

Estudio del efecto del texturizado en la biolubricación del par tribológico: AISI 316L/UHMWPE

De manera general el tema abarcará los siguientes aspectos:

Determinar el esfuerzo cortante máximo del par tribológico (AISI 316L/UHMWPE) para los diferentes patrones de texturizado y medir el coeficiente de fricción en un espacio fase (Vm, SRR y L), también definir los cambios reológicos y las propiedades fisicoquímicas del biolubricante después de ser sometido a condiciones del espacio fase.

2.- Se designan como Directores de Tesis a los Profesores:

Dr. Iván Domínguez López

Dr. Adrián Luis García García

3.- El trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:

Doctorado en Tecnología Avanzada

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente hasta la aceptación de la tesis por la Comisión Revisora correspondiente:

Directores de Tesis

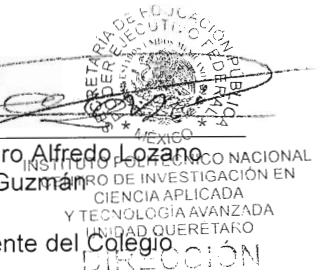
Dr. Iván Domínguez López

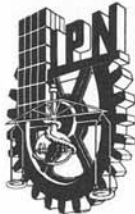
Dr. Adrián Luis García García

Joana Lizbeth Montes Seguedo

Aspirante

Dr. Alejandro Alfredo Lozano Guzmán
Presidente del Colegio





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de siendo las horas del día del mes de del se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de: para examinar la tesis titulada:

del (la) alumno (a):

| | | | | | |
|-------------------|--------|-------------------|---------|-------------|---------------|
| Apellido Paterno: | MONTES | Apellido Materno: | SEGUEDO | Nombre (s): | JOANA LIZBETH |
|-------------------|--------|-------------------|---------|-------------|---------------|

Número de registro:

Aspirante del Programa Académico de Posgrado:

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 10% de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo SI NO **SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.**

JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN: El 10% de similitud se encuentra distribuido en 83 fuentes bibliográficas, en todas ellas el índice de similitud es menor o igual al 0.22%, la mayoría son del 0.11%. Todas las fuentes consultadas se encuentran debidamente referenciadas.

Finalmente, y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR** **SUSPENDER** **NO APROBAR** la tesis por **UNANIMIDAD** o **MAYORÍA** en virtud de los motivos siguientes:

La tesis que aquí se ha analizado constituye un trabajo original en el que la alumna ha mostrado su capacidad para realizar investigación científica, generando conocimiento nuevo que ha sido publicado en una revista internacional de alto impacto.

COMISIÓN REVISORA DE TESIS

Dr. Adrián Luis García García

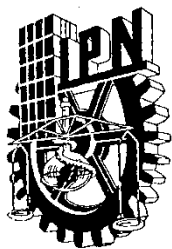
Dr. Iván Domínguez López

Dra. Eva González Jasso

Dra. Ma. del Carmen Salazar Hernández

Dra. María del Rosario Jovita Morales García

Dr. Juan Bautista Hurtado Ramos
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD QUERETARO
DIRECCIÓN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día 04 del mes de enero del año 2022, el (la) que suscribe Joana Lizbeth Montes Seguedo alumno(a) del Programa de Doctorado en Tecnología Avanzada, con número de registro B171244, adscrito(a) al CICATA-IPN Unidad Querétaro, manifiesto(a) que es el (la) autor(a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del (de la, de los) Dr. Iván Domínguez López y Dr. Adrián Luis García García cede los derechos del trabajo titulado Estudio del efecto del texturizado en la biolubricación del par tribológico AISI 316L/UHMWPE, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del (de la) autor(a) y/o director(es) del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones liz_20@live.com.mx, idominguezl@ipn.mx, agarciag@ipn.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Joana Lizbeth Montes Seguedo

AGRADECIMIENTOS

Primero me gustaría agradecer al Instituto Politécnico Nacional (IPN) y al CONACYT por la beca otorgada.

Mi tesis va dedicada con todo mi cariño a mis abuelos maternos que en paz descansen, por ser mi fuente de motivación e inspiración, porque siempre confiaron en mi capacidad para cumplir mis sueños.

A mi amada madre por su amor y apoyo, porque siempre ha sido un gran soporte para mí y por sus palabras de aliento en los momentos más difíciles.

A mis amigos por compartir conmigo tantos momentos de alegría y tristeza, pero en especial porque siempre tuvieron el tiempo de escucharme y de decirme esas hermosas palabras de aliento para que lograra mi meta y no desistiera en el intento.

A mis asesores el Dr. Iván Domínguez López y el Dr. Adrián Luis García Gacía por todas las enseñanzas, apoyo y guía durante estos años. A mis asesores les estoy profundamente agradecida por la formación que me dieron a lo largo de mi trayecto por el CICATA-IPN-QRO.

A toda mi familia por siempre estarme dando ánimos y motivarme a ser mejor muchas gracias.

Índice General

| | |
|-------------------------------------------------|------|
| Índice General | I |
| Índice de Figuras | IV |
| Índice de Tablas..... | VIII |
| Resumen..... | X |
| Abstract..... | X |
| Nomenclatura | XI |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Antecedentes | 1 |
| 1.2. Planteamiento del problema | 10 |
| 1.3. Hipótesis..... | 10 |
| 1.4. Justificación..... | 11 |
| 1.5. Objetivo General | 11 |
| 1.5.1. Objetivos específicos..... | 11 |
| 2. Marco teórico..... | 12 |
| 2.1. Biolubricantes | 12 |
| 2.1.1. Líquido sinovial (LS)..... | 12 |
| 2.1.2. Suero bovino | 13 |
| 2.1.3. Proteínas | 14 |
| Aminoácidos..... | 15 |
| Función de las proteínas | 17 |
| Estructura de las proteínas | 17 |
| Desnaturalización de las proteínas | 19 |
| Técnica para el análisis de las proteínas | 20 |

| | | |
|--------|----------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2. | Regímenes de lubricación | 21 |
| 2.2.1. | Régimen elastohidrodinámico (EHL)..... | 23 |
| 2.2.2. | Película lubricante..... | 25 |
| 2.3. | Espesor de la película para diferentes regímenes de lubricación..... | 26 |
| 2.4. | Ecuación de Reynolds | 27 |
| 2.5. | Esfuerzos de contacto | 28 |
| 2.5.1. | Teoría de contacto (Hertz) | 28 |
| 2.5.2. | Formas de contacto Hertziano..... | 29 |
| 2.5.3. | Contacto puntual | 30 |
| 2.5.4. | Geometría de superficies suaves no-conformes en contacto | 31 |
| 2.6. | Teoría de fallo estático..... | 31 |
| 2.7. | Lubricación <i>in-vitro</i> en prótesis de rodilla | 32 |
| 2.8. | Texturizado superficial..... | 35 |
| 3. | Técnicas y métodos..... | 36 |
| 3.1. | Diseño del arreglo del texturizado..... | 38 |
| 3.1.1. | Diseño de las geometrías del par tribológico en CAD..... | 40 |
| 3.1.2. | Diseño del texturizado en CAD | 43 |
| 3.2. | Preparación de discos de UHMWPE | 43 |
| 3.2.1. | Desbaste de los discos de UHMWPE | 43 |
| 3.2.2. | Rugosidad de la superficie del UHMWPE | 45 |
| 3.2.3. | Ancho de la huella de desgaste..... | 46 |
| 3.3. | Maquinado del microtexturizado | 48 |
| 3.3.1. | Inspección del texturizado superficial | 48 |
| 3.4. | Técnicas de análisis de las proteínas..... | 51 |
| 3.5. | Tribómetro de bola en disco | 52 |

| | | |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4. | Resultados y análisis | 54 |
| 4.1. | Simulación de una superficie texturizada | 54 |
| 4.1.1. | Simulaciones de presión de contacto para una superficie lisa | 55 |
| 4.1.2. | Evaluación del diseño del texturizado utilizando software CAD | 58 |
| 4.1.3. | Esfuerzo cortante máximo aplicado sobre un disco texturizado | 62 |
| 4.2. | Tribómetro de bola en disco (MTM2) | 66 |
| 4.2.1. | Comportamiento tribológico de superficie lisa de UHMWPE utilizando agua | 66 |
| 4.2.2. | Análisis del Comportamiento tribológico de superficie lisa de UHMWPE utilizando agua | 69 |
| 4.2.3. | Pre-experimentos del COF de una superficie texturizada de UHMWPE | 77 |
| 4.2.4. | Análisis de los pre-experimentos del COF de una superficie texturizada de UHMWPE | 78 |
| 4.2.5. | Superficie texturizada lubricada con Suero Bovino | 82 |
| 4.2.6. | Análisis de la superficie texturizada de UHMWPE lubricada con suero bovino | 86 |
| 4.3. | Espectrofotometría UV-visible | 93 |
| 5. | Discusión de los resultados experimentales del COF | 94 |
| 5.1. | Comparación de la superficie lisa de UHMWPE vs una superficie texturizada de UHMWPE | 94 |
| 6. | Conclusiones | 98 |
| 7. | Referencias | 100 |

Índice de Figuras

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 1.1. Representación esquemática de un sistema tribológico [2]. | 1 |
| Fig. 1.2. Efecto de la densidad de área texturizada para las diferentes formas geométricas de la superficie texturizada sobre el (a) espesor de película y (b) coeficiente de fricción [17]. | 3 |
| Fig. 1.3. Cantidad de BSA adsorbida sobre diferentes superficies de materiales obtenida mediante radiomarcado de albúmina ¹²⁵ I-labeled [45]. | 7 |
| Fig. 1.4. Comportamiento del COF, en función de la distancia, para diferentes contrapartes tribológicas del UHMWPE, lubricados con soluciones de HBSS y BSA en HBSS [45]. | 7 |
| Fig. 2.1. Esquema de las proteínas. | 14 |
| Fig. 2.2. Representación esquemática de la mioglobina, esta proteína se une a una molécula de oxígeno (color azul) de forma reversible al átomo de hierro en su grupo hemo (que se muestra en gris con el hierro en verde) [63]. | 15 |
| Fig. 2.3. Estructura general de un α -aminoácido [66]. | 16 |
| Fig. 2.4. Los cuatro niveles de la estructura de las proteínas, a) primaria, b) secundaria, c) terciaria y d) cuaternaria [63,66]. | 18 |
| Fig. 2.5. Representación esquemática de una proteína desnaturalizada [63]. | 19 |
| Fig. 2.6. Representación esquemática del funcionamiento del espectrofotómetro [100]. | 21 |
| Fig. 2.7. Esquema de la curva de Stribeck y regímenes de lubricación [70,71]. | 22 |
| Fig. 2.8. Distribuciones de presión y formas de película con viscosidad dependiente de la presión y cilindros elásticos [76]. | 24 |
| Fig. 2.9. a) Contacto entre una esfera y una superficie plana, b) geometría del contacto entre dos cilindros paralelos y c) geometría de dos cuerpos con una superficie convexa y otra cóncava en contacto para el análisis de lubricación y teoría de contacto [1]. | 30 |
| Fig. 2.10. Diferentes tipos de prótesis de rodilla: a) reemplazo total de rodilla, b) reemplazo de rodilla unicompartmental, y c) reemplazo patelofemoral [87]. | 33 |
| Fig. 2.11. a) Parámetros geométricos de una superficie texturizada [15], y b) diferentes formas geométricas de texturizado [98]. | 36 |
| Fig. 3.1. Diagrama de la metodología experimental. | 37 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 3.2. Esquema de la metodología experimental para el biolubricante..... | 37 |
| Fig. 3.3. Ensamble del par tribológico diseñado en solidworks..... | 40 |
| Fig. 3.4. Microcavidades sobre la superficie del disco de UHMWPE dentro del área de contacto, a) las cavidades tienen un diámetro de 100 μm , b) las cavidades tienen un diámetro de 50 μm , c) cavidades con 50 μm para una densidad el 25 % y d) cavidades con un diámetro de 100 μm para una densidad del 45 %..... | 41 |
| Fig. 3.5. Diseño de las microcavidades sobre la superficie del disco de UHMWPE..... | 42 |
| Fig. 3.6. a) Simplificación del par tribológico, y b) propiedades mecánicas de los materiales..... | 42 |
| Fig. 3.7. Diseño de las cavidades sobre la superficie simplifica del disco de UHMWPE, a) las microcavidades tienen un diámetro de 100 μ , y b) la cavidad tiene un diámetro de 300 μm | 43 |
| Fig. 3.8. a) Equipo de esmerilado-pulido que cuenta con un brazo mecánico, y b) discos de UHMWPE. | 45 |
| Fig. 3.9. a) Microscopio de fuerza atómica (AFM), EasyScan2, y b) topografía de la superficie en 3D de un disco de UHMWPE adquirida por AFM. | 46 |
| Fig. 3.10. Medición del ancho de la huella de desgaste utilizando un microscopio óptico, marca Zeiss..... | 47 |
| Fig. 3.11. a) Medida del espesor del disco echa con un micrómetro, y b) peso del disco de UHMWPE realizada con una balanza analítica..... | 47 |
| Fig. 3.12. a) Broca micro SD22, marca Seco, y b) broca micro SD22 con 300 μm de diámetro...48 | |
| Fig. 3.13. Disco de UHMWPE observado después del proceso de a) maquinado de las cavidades, b) desbaste, c) desbaste/pulido, y d) pulido. | 49 |
| Fig. 3.14. a) Microscopio óptico, zeiss, b) y c) son imágenes del texturizado de un disco de UHMWPE obtenidas por microscopia óptica..... | 50 |
| Fig. 3.15. Equipo espectrofotómetro de UV-Vis genesys 10S, Thermo Scientific. | 51 |
| Fig. 3.16. Representación esquemática del tribómetro de bola en disco, mini traction machine (MTM2), PCS Instruments..... | 53 |
| Fig. 4.1. a) arreglo en 3D de las cavidades separadas por la mitad de su diámetro, b) resultados del esfuerzo cortante máximo de von Mises obtenido mediante ANSYS reportado por López [101], y c) esfuerzo von Mises obtenido mediante ANSYS..... | 55 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 4.2. Análisis de la presión de contacto utilizando ANSYS, a) para la carga de 1 N, y b) para 11 N. | 56 |
| Fig. 4.3. Esfuerzo cortante máximo de von Mises para la superficie lisa de UHMWPE en contacto con una bola de acero inoxidable 316L a) para la carga de 1 N, y b) para 11 N. | 57 |
| Fig. 4.4. a) y b) Gráficas de superficie del comportamiento de la presión de contacto en relación con la profundidad, densidad de área texturizada y diámetro al aplicar una carga de 1 N, c) y d) comportamiento de la presión de contacto en función del diámetro, densidad de área texturizada y diámetro para la carga de 11 N. | 60 |
| Fig. 4.5. Simulación de la presión de contacto sobre una superficie texturizada utilizando ANSYS (estudiante) al aplicar la carga de 1 N para la densidad del, a) 20 %, y b) 40 %. | 61 |
| Fig. 4.6. Simulación de la presión de contacto sobre una superficie texturizada utilizando ANSYS (estudiante), para la carga de 11 N para las cavidades con, a) diámetro y profundidad de 200 μm , y b) diámetro de 200 μm y profundidad de 300 μm | 62 |
| Fig. 4.7. Comportamiento del esfuerzo cortante máximo de von Mises de la densidad de texturizado del 20 % para la carga (L) de 1 N, a) profundidad de 100 μm , b) las cavidades con profundidad de 200 μm y c) con profundidad de 300 μm | 63 |
| Fig. 4.8. Resultados del esfuerzo cortante máximo de von Mises para la carga de 11 N, utilizando ANSYS para las cavidades con diámetro de a) 100 μm , b) 200 μm y c) 300. | 64 |
| Fig. 4.9. a) Gráfica de superficie del esfuerzo cortante máximo con relación a la profundidad y densidad de área texturizada, y b) resultado del esfuerzo de von Mises en función del diámetro y densidad de área texturizada, para la carga de 1 N. | 65 |
| Fig. 4.10. Gráficas de superficie del comportamiento del esfuerzo cortante máximo en función de a) diámetro y densidad de área texturizada para la carga de 11 N, y b) profundidad y diámetro. | 65 |
| Fig. 4.11. Comportamiento del COF en superficies lisas lubricadas con agua al aplicar las cargas de a) 1 N, b) 2 N, c) 3 N hasta la carga de k) 11 N. | 68 |
| Fig. 4.12. Ajuste de modelos matemáticos para la carga de 1 N, a) datos crudos del COF obtenidos del tribómetro de bola en disco, b) modelo de Couette, c) modelo de potencias y d) modelo de poiseuille. | 72 |
| Fig. 4.13. Ajuste de modelos matemáticos para la carga de 9 N, a) datos crudos del COF obtenidos del tribómetro de bola en disco, b) modelo de Couette, c) modelo de potencias y d) modelo de poiseuille. | 73 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 4.14. Ajuste de modelos matemáticos para $SRR = 0.8$ | 74 |
| Fig. 4.15. Ajuste de modelos matemáticos para $SRR = 2$ | 75 |
| Fig. 4.16. Resumen de los coeficientes de la Ec. 4.4 para los datos del COF del par tribológico (disco liso de UHMWPE y bola de acero inoxidable 316L), lubricado con agua..... | 77 |
| Fig. 4.17. Comportamiento del COF en una superficie texturizada lubricada con agua. | 78 |
| Fig. 4.18. Ajuste del modelo de regresión para la densidad de texturizado del 10 %..... | 79 |
| Fig. 4.19. Ajuste del modelo de regresión para la densidad de área texturizada del 20 %. | 80 |
| Fig. 4.20. Magnitud de las potencias del modelo de regresión..... | 81 |
| Fig. 4.21. Espacio de puntos de las condiciones experimentales con trayectoria de una prótesis de rodilla. | 83 |
| Fig. 4.22. Resultados del COF para una superficie texturizada de UHMWPE utilizando una concentración de 20 g/L de suero bovino..... | 85 |
| Fig. 4.23. Superficie de respuesta y gráficas de contorno para la carga de a) 2 N, b) 6 N y 10 N. | 91 |
| Fig. 4.24. Magnitud de las potencias de los coeficientes del modelo de regresión para una superficie texturizada de UHMWPE, Ec. 4.6..... | 92 |
| Fig. 4.25. Espectro de absorción del suero bovino tratado. | 93 |
| Fig. 5.1. Superficies de respuesta del COF para la carga de 2 N al tener una a) superficie lisa de UHMWPE lubricada con suero bovino, b) superficie lisa de UHMWPE lubricada con agua destilada y c) superficie texturizada de UHMWPE lubricada con suero bovino..... | 96 |
| Fig. 5.2. Superficies de respuesta del COF para la carga de 6 N al tener una a) superficie lisa de UHMWPE lubricada con suero bovino, b) superficie lisa de UHMWPE lubricada con agua destilada y c) superficie texturizada de UHMWPE lubricada con suero bovino..... | 97 |

Índice de Tablas

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 2.1 Composición general de las proteínas presentes en 3 diferentes sueros [56,57]. | 13 |
| Tabla 2.2. Lista de algunas funciones de las proteínas dentro de las células [66]. | 17 |
| Tabla 2.3 Agentes desnaturalizantes de una proteína [67]. | 20 |
| Tabla 2.4. Predicción del régimen de lubricación con base en el coeficiente λ . | 23 |
| Tabla 2.5. Tipos de películas lubricantes [79]. | 25 |
| Tabla 2.6. Fórmula para el contacto de dos esferas (o esfera en un plano) [77]. | 29 |
| Tabla 3.1. Diseño experimental para dos tipos diferentes de cavidades diámetros utilizando dos densidades de texturizado. | 38 |
| Tabla 3.2. Diseño experimental para el diámetro de 200 μm utilizando la densidad de área texturizada del 20 %. | 39 |
| Tabla 3.3. Diseño experimental para la densidad de área texturizada del 40 y 45%. | 39 |
| Tabla 3.4. Parámetros de la técnica de desbaste-pulido para los discos de UHMWPE, utilizando el brazo de la pulidora. | 44 |
| Tabla 3.5. Parámetros para realizar la prueba de desgaste. | 46 |
| Tabla 3.6. Promedio del ancho de la huella de desgaste sobre los discos de UHMWPE. | 47 |
| Tabla 3.7 Condiciones experimentales para eliminar las rebabas de la superficie del disco texturizado de UHMWPE, empleando una esmeriladora con brazo mecánico. | 48 |
| Tabla 3.8. Configuración del texturizado superficial. | 51 |
| Tabla 4.1. Esfuerzo cortante máximo de von Mises lubricado con agua para una carga de 1 N. | 58 |
| Tabla 4.2. Esfuerzo cortante máximo de von Mises en contacto seco al aplicar una carga de 1 N. | 59 |
| Tabla 4.3. Esfuerzo cortante máximo de von Mises en contacto lubricado (cavidades llenas con un material incompresible) al aplicar una carga de 11 N. | 59 |
| Tabla 4.4. Esfuerzo cortante máximo de von Mises en contacto seco al aplicar una carga de 11 N. | 59 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 4.5. Condiciones experimentales para el par tribológico (disco liso de UHMWPE y bola de acero inoxidable 316L). | 66 |
| Tabla 4.6. Modelos matemáticos. | 69 |
| Tabla 4.7. Resumen de los coeficientes del modelo de regresión para cada valor de carga en la Ec. 4.3. | 71 |
| Tabla 4.8. Resumen de los coeficientes por SRR para el AGUA al ajustar la Ec. 4.4. | 76 |
| Tabla 4.9. Resultados de los coeficientes del modelo de regresión ajustado en la Ec.4. | 80 |
| Tabla 4.10. Condiciones experimentales del par tribológico disco texturizado de UHMWPE y bola de acero inoxidable 316 L evaluadas en el tribómetro de bola en disco. | 84 |
| Tabla 4.11. ANOVA para la carga de 2 N. | 87 |
| Tabla 4.12. ANOVA para la carga de 6 N. | 88 |
| Tabla 4.13. ANOVA para la carga de 10 N. | 89 |

Resumen

En este trabajo se investigó el efecto de las proteínas sobre el coeficiente de fricción de superficies lisas y texturizadas de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) en contacto contra una bola de acero inoxidable 316L bajo diferentes parámetros de operación: rodamiento puro, rodamiento/deslizamiento, deslizamiento puro, superdeslizamiento, cargas, velocidad media, lubricando las superficies con suero bovino y agua destilada. La superficie de los discos de UHMWPE se maquinaron para agregar cavidades de geometría circular, las cuales funcionan como trampas de partículas de desgaste y reservas del lubricante, generando una presión adicional, con la finalidad de mejorar la lubricación del par tribológico al reducir el coeficiente de fricción. El estudio tribológico se realizó utilizando un tribómetro de bola en disco (mini traction machine) bajo condiciones extendidas de una prótesis de rodilla izquierda. El análisis de los datos experimentales del coeficiente de fricción se desarrolló mediante modelos de regresión que permitieron cuantificar el efecto de los diferentes factores implicados. Los resultados demostraron que el utilizar superficies texturizadas de UHMWPE lubricadas con suero bovino ayudan a reducir el coeficiente de fricción, debido a que el texturizado ayuda a propiciar una película lubricada con mayor viscosidad gracias a la acumulación de proteínas que se presenta en la entrada del contacto bajo diferentes condiciones de movimientos como rodamiento y rodamiento/deslizamiento.

Abstract

In this work, the effect of proteins on the coefficient of friction of smooth and textured surfaces of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) in contact against a 316L stainless steel ball was investigated under different operating parameters: pure bearing, rolling / slip, pure slip, super slip, loads, medium speed, lubricating surfaces with bovine serum and distilled water. The surface of the UHMWPE discs was machined to add cavities of circular geometry, which function as traps for wear particles and lubricant reserves, generating additional pressure, to improve the lubrication of the tribological torque by reducing the coefficient of friction. The tribological study was carried out using a disc ball tribometer (mini traction machine) under extended conditions of a left knee prosthesis. The analysis of the experimental data of the friction coefficient was developed by means of regression models that allowed to quantify the effect of the different factors involved. The results showed that the use of textured UHMWPE surfaces lubricated with bovine serum helps to reduce the coefficient of friction, since the texturing helps to promote a lubricated

film with higher viscosity thanks to the accumulation of proteins that occurs at the contact entry. under different movement conditions such as rolling and rolling / sliding.

Nomenclatura

BS (suero bovino)

COF Coeficiente de fricción

L Carga (N)

LS Líquido sinovial

SRR (relación de rodamiento/deslizamiento)

V_m Velocidad media (mm/s)

SAPL fosfolípidos tensoactivos

a es el radio del área de contacto [m];

W es la carga normal [N];

P es la presión de contacto (esfuerzo Hertziano) [Pa];

δ es la deflexión total en el centro del contacto [m];

τ es el esfuerzo cortante máximo [Pa];

z es la profundidad de la superficie donde actúa el máximo esfuerzo cortante [m];

E' es el módulo de Young reducido [Pa];

R' es el radio de curvatura reducido [m].

COF coeficiente de fricción

EHL elastohidrodinámico

1. Introducción

1.1. Antecedentes

La tribología tiene como objetivo estudiar la fricción y el desgaste de dos cuerpos que se encuentran en movimiento relativo como los rodamientos de fricción en seco, rodamientos de elementos rodantes, rodamientos de superficie y cojinetes de deslizamiento. En la Fig. 1.1 se muestran los componentes del sistema tribológico, el cual está conformado por los siguientes elementos: las variables de operación (variables de entrada), la estructura del sistema tribológico, el cual cuenta con cuatro elementos: el cuerpo base (1), el contra cuerpo (2), el medio ambiente (3) y el lubricante (4), este último tiene como función lubricar los cuerpos para disminuir la fricción y minimizar el desgaste, por último se encuentran las variables de salida [1].

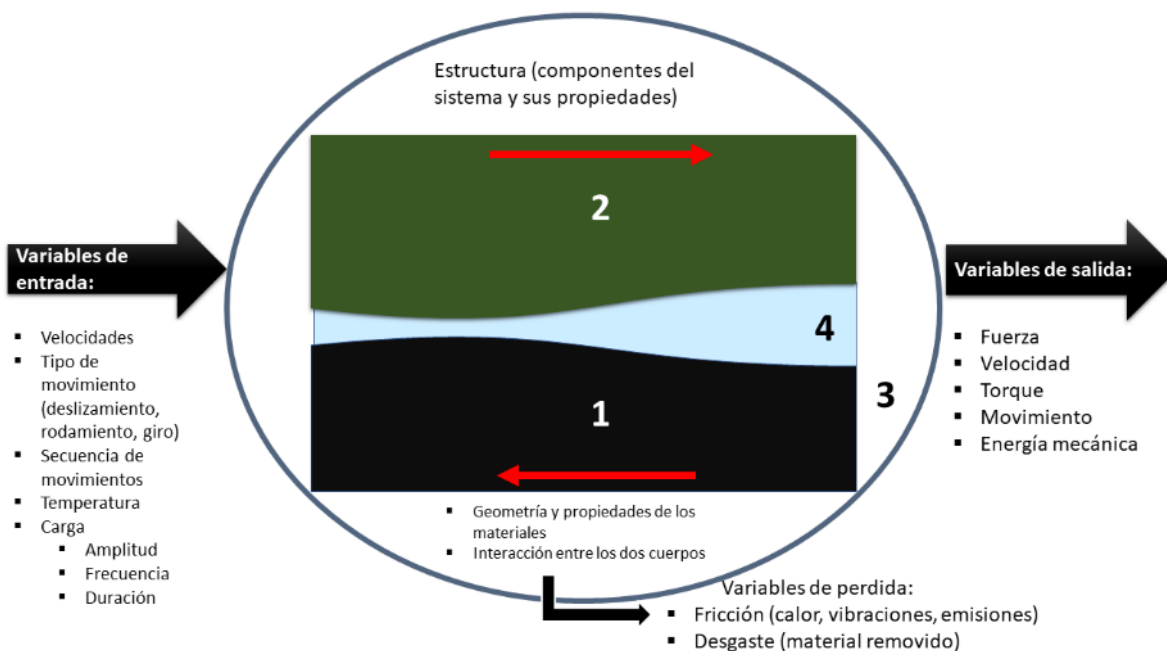


Fig. 1.1. Representación esquemática de un sistema tribológico [2].

Entre los sistemas tribológicos se encuentran los rodamientos de fricción en seco; los cuales están hechos de materiales como nylon, politetrafluoroetileno, en estos rodamientos las dos superficies de los materiales se frotan entre si produciendo movimientos rodantes y/o deslizantes que se traducen en fricción. Existen innumerables tipos de rodamientos de elementos rodantes diseñados para cumplir con las variadas condiciones de operación que se encuentran en

la industria, estos pueden ser rodamientos de bolas, rodillos o agujas (rodillos con grandes proporciones de ancho en relación al diámetro), cuyos componentes se lubrican con grasas, lubricantes minerales o sintéticos [3]. En las compañías de petróleo y gas se utilizan rodamientos deslizantes de alta confiabilidad en válvulas, actuadores; estos rodamientos compuestos de materiales poliméricos eléctricamente conductores.

Los componentes de polímeros están reemplazando cada vez más a los metales en estructuras, chumaceras (housings), elementos flexibles (flexures) y rodamientos, especialmente en aplicaciones de reducción de peso automotriz. La gama de polímeros disponibles para diversas condiciones de operación de resistencia, rango de temperatura de operación, resistencia a la degradación ambiental, fricción por deslizamiento y desgaste es inmensa [4], siendo el polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) un polímero con excelentes propiedades físicas y mecánicas como: resistencia al impacto, resistencia a la abrasión, inercia química y lubricidad. Este polímero se utiliza en aplicaciones biomédicas e industriales.

En aplicaciones biomédicas se ha empleado en ortopedia como un cojinete de soporte en articulaciones artificiales (prótesis), debido a que se ajusta a los requisitos biológicos y mecánicos para dicha aplicación con excelentes propiedades de biocompatibilidad, resistencia al desgaste, estabilidad química, ligereza, lubricidad y bajos niveles de citotoxicidad [5]. Lamentablemente, la falla mecánica de los insertos tibiales y la osteólisis esta relaciona al desgaste del UHMWPE [6,7], por lo tanto, es necesario que este material tenga una mayor resistencia al desgaste [8].

Por otro lado, el UHMWPE se ha utilizado ampliamente en rodamientos, placas deslizantes y sellos debido a su estabilidad química, capacidad auto-lubricante y anti-desgaste. Sin embargo, tiene una alta viscosidad de fusión y es difícil de procesar por extrusión, por ello, sus aplicaciones de ingeniería son limitadas [9]. No obstante, en la práctica industrial, se encuentra que con frecuencia se co-polimeriza el UHMWPE con otros monómeros (por ejemplo, polipropileno) para lograr mejores características de procesamiento o para alterar las propiedades físicas y mecánicas del polímero [10].

Además, la creciente demanda de proteger los componentes metálicos del desgaste ha dado origen al desarrollo de soluciones efectivas y eficientes, para reducir la fricción y desgaste como lo son los recubrimientos nanocompuestos de UHMWPE reforzados con nanopartículas de alúmina para proteger la superficie del acero en ausencia de lubricación líquida [11]. Otra técnica que ha surgido con la finalidad de extender el tiempo de vida de los sistemas mecánicos es el texturizado superficial, la cual tiene como objetivo reducir el coeficiente de fricción (COF) de las

piezas mecánicas mediante el diseño de diferentes formas geométricas de cavidades sobre superficies en contacto [12–14].

El texturizado superficial juega un papel fundamental en el desempeño tribológico de los materiales. Primero, las cavidades actúan como reserva de lubricante generando una presión hidrodinámica, la cual ayuda a incrementar el espesor de película y la capacidad de carga, reduciendo el contacto entre los componentes [15,16]. Segundo, las cavidades funcionan como reserva de las partículas de desgaste, esto ayuda a reducir el desgaste abrasivo entre las superficies en contacto [14,17,18].

Algunos investigadores [19,20], combinan modelos teóricos y experimentales con el objetivo de optimizar la técnica del texturizado superficial para mejorar el desempeño tribológico de los biomateriales mediante el uso de superficies texturizadas. Por ejemplo, el efecto de superficies microtexturizadas de UHMWPE en la lubricación del par tribológico (CoCr/UHMWPE) fue investigado por Zhang et al. [17], a través de la solución numérica de la ecuación de Reynolds por el método de diferencias finitas. Los resultados demuestran que al incrementar la densidad de área texturizada del 12 al 32%, para diferentes formas de hoyuelos consideradas (círculo, rectángulo, triángulo, cuadrado), el espesor de película tiende a aumentar, mientras que el COF se reduce Fig. 1.2.

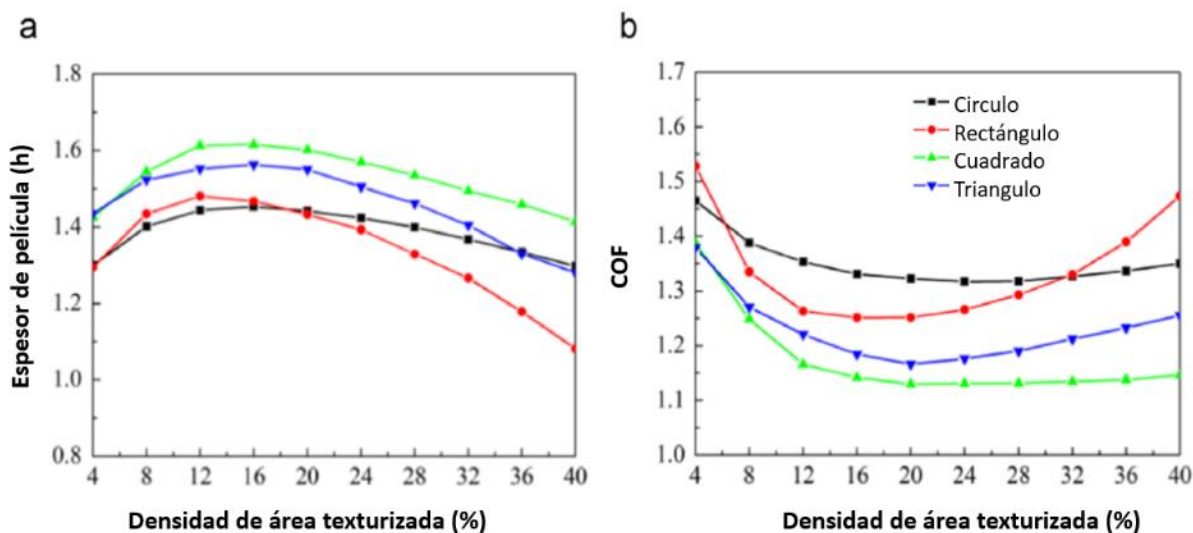


Fig. 1.2. Efecto de la densidad de área texturizada para las diferentes formas geométricas de la superficie texturizada sobre el (a) espesor de película y (b) coeficiente de fricción [17].

Por su parte, Cho and Choi [21] mediante el desarrollo de modelos de superficie de respuesta optimizaron el método de diseño de las cavidades circulares sobre la superficie del AISI 1045 en contacto deslizante con el UHMWPE, demostrando que, efectivamente, el utilizar superficies texturizadas ayuda a reducir la fricción, independientemente de la profundidad y la densidad de área.

En un estudio tribológico sobre contacto rodante-deslizante lubricado con un fluido Newtoniano (agua), López et al. [22] se centraron en conocer el desempeño tribológico de superficies texturizadas de UHMWPE mediante el análisis del coeficiente de tracción para condiciones cinemáticas y presiones de contacto de un ciclo de desplazamiento de una prótesis de rodilla. Los autores concluyeron que el texturizado superficial puede reducir significativamente el coeficiente de tracción entre los componentes (metal/plástico) para todo el rango cinemático de velocidad media y relación de rodamiento deslizamiento correspondientes a los valores máximos del plano sagital de un reemplazo de rodilla, debido a la reducción de los efectos del contacto directo entre las piezas de metal y plástico.

Montoya [23] investigó el efecto de superficies texturizadas de UHMWPE en el COF, bajo condiciones del ciclo de marcha para una prótesis de rodilla izquierda, utilizando diferentes valores de viscosidad de suero bovino y concentraciones de ácido hialurónico. Los resultados mostraron que, al utilizar una superficie texturizada, independientemente del lubricante, en comparación con una superficie lisa, el COF disminuye.

Otro proceso para reducir la fricción entre los componentes es la lubricación, es una técnica empleada para reducir el desgaste en una o ambas de las superficies que se encuentran en movimiento relativo al interponer una sustancia llamada lubricante, esta sustancia ayuda a transportar la carga (presión generada) entre la superficie opuesta [24]. Los lubricantes base aceite son los fluidos más utilizados en la industria automotriz, debido a sus excelentes propiedades de lubricación, desafortunadamente, su impacto en el medio ambiente es catastrófico, debido al incremento de la contaminación, por lo cual se debe reducir la dependencia de los combustibles fósiles en el sector automotriz [25].

Con la finalidad de emplear lubricantes que no causen un impacto ambiental han surgido los biolubricantes, estos se consideran una alternativa a los aceites minerales, por sus propiedades naturales y su biodegradabilidad [24]. Los biolubricantes se obtienen mediante la modificación química de las propiedades de los aceites vegetales crudos, lo cual mejora su estabilidad térmica y oxidativa permitiendo que resistan una amplia gama de condiciones de funcionamiento. Los biolubricantes actúan como agentes antifricción, debido a que protegen a las superficies de la

corrosión, reducen la oxidación, reducen el desgaste debido al contacto, previenen la pérdida de calor de las superficies en contacto, actúan como agentes de sellado (contra polvo, suciedad, y agua), y mejoran la eficiencia de las máquinas.

Los biolubricantes más comunes en el mercado son los ésteres sintéticos que provienen de las grasas de animales y de aceites vegetales [26]. Algunos aditivos biolubricantes utilizados en la industria de la perforación son: el aceite de palma crudo, el aceite de almendra de palma, el aceite de ricino, el aceite de arroz, el aceite de maíz y la goma guar, este último es un polisacárido que en combinación con agua presenta buenas propiedades reológicas a muy bajas concentraciones [27]; en bioquímica, los polisacáridos son moléculas formadas por la unión de muchas moléculas de monosacáridos entre sí.

En el cuerpo humano también podemos encontrar los polisacáridos, por ejemplo, el ácido hialurónico (HA) se encuentra presente en todos los fluidos y tejidos del cuerpo en mayor proporción en la piel, también, en las válvulas cardiacas y en el líquido sinovial (LS) [28]; en una persona adulta sana el HA proporciona la lubricación necesaria para la articulación [29]; sin embargo, la cantidad de lubricante que se requiere para pruebas de desgaste es de 40 a 600 ml [30,31] y en las articulaciones la cantidad del

LS presente en las articulaciones es de 0.2 a 10 ml [32,33]. La norma ISO 14243-3 [34] establece que para realizar pruebas de desgaste entre biomateriales se debe utilizar suero de bovino (SB) diluido con agua, debido a que este fluido reproduce los mecanismos de desgaste clínicos presentados en prótesis articulares [35]. Desde la perspectiva de la tribología, la longevidad de los biomateriales en las articulaciones naturales y artificiales está relacionada con la fricción, el desgaste y los mecanismos de lubricación.

De modo que es necesario el uso de un lubricante y biomateriales apropiados para mejorar el desempeño de los componentes protésicos, por ello diversos investigadores están interesados en encontrar nuevos biomateriales [36–38] o lubricantes [56],[111,112]. Por ejemplo, Kobayashi, Koide y Hyon [41] desarrollaron un lubricante artificial con polietilenglicol (PEG), con el fin de prevenir el desgaste de la superficie del UHMWPE, favoreciendo otro régimen de lubricación en lugar del régimen de capa límite, por lo que evaluaron el comportamiento tribológico de los materiales CoCr-UHMWPE, lubricados con una mezcla de LS con PEG en un tribómetro de perno en disco. Los resultados de la mezcla de estos líquidos, en condiciones de carga severa, ayudan a mejorar la densidad y viscosidad del LS, propiciando una estabilidad de la película lubricante entre las superficies de contacto, debido a lo cual se obtuvo una reducción del desgaste del polímero [31].

Wang et al. [42] describieron el efecto del lubricante (suero bovino SB, agua) en el tamaño y morfología de los residuos de desgaste del UHMWPE producidos en un simulador de cadera. Las pruebas realizadas de desgaste indican que este depende en gran medida del tipo de lubricante y cantidad de proteínas utilizadas. Se comprobó que al lubricar las superficies del par tribológico UHMWPE-CoCr con SB, se reproducen los resultados del mecanismo de desgaste clínico presentado en el reemplazo total de cadera. Estos autores consideran que las normas ISO, además de especificar la concentración y lubricante requeridos en las pruebas de desgaste, deberían mencionar la proporción de albúmina/globulina que deben contener los lubricantes de prueba, con el fin de tener mejor control sobre los resultados.

El propósito del estudio de Gale et al. [43] fue probar la capacidad del lubricante natural del cuerpo y los fosfolípidos tensoactivos (SAPL), solución salina con y sin dipalmitoil-fosfatidilcolina (DPPC) al actuar como un lubricante de capa límite, para disminuir la fricción presente en las articulaciones protésicas de los materiales UHMWPE-acero inoxidable y UHMWPE carbón pirolítico (PyC); la lubricación de capa límite se produce cuando las superficies sólidas están tan juntas que las interacciones superficiales entre la película es a nivel multimolecular y las asperezas dominan el contacto. Sus resultados confirmaron que al usar DPPC como lubricante para ambas combinaciones de materiales, se presentaba una reducción en la fricción del 50 y 75%, debido a que el DPPC actuaba como un lubricante de capa límite muy eficaz; el cual actúa como un respaldo donde la película del fluido no soporta la carga a velocidades fisiológicas. Además, la molécula DPPC tiene quimisorción y cohesión monocapa que son vitales para un lubricante de capa límite efectivo y el SAPL tiene la capacidad de reducir el desgaste y fricción a niveles fisiológicos de carga muy bajos [44].

Serro et al. [45] compararon la adsorción de albúmina en las superficies de tres pares tribológicos UHMWPE/CoCrMo, UHMWPE/alúmina y UHMWPE/acero inoxidable lubricados con una solución salina equilibrada de Hanks (HBSS) y albúmina de suero bovino (BSA) en HBSS a 37 °C, con la finalidad de interpretar el comportamiento del COF. La cantidad de albúmina adsorbida sobre la superficie de los materiales se determinó mediante las técnicas de radiomarcado XPS e I-BSA, esta última técnica demostró que las proteínas se adsorben preferentemente en las superficies de los materiales (Acero, CoCrMo) que son más hidrófobos que la albúmina, Fig. 1.3. Los resultados del COF evidenciaron que cuando la combinación de materiales es (UHMWPE/metal) lubricados con HBSS y BSA, este tiende a disminuir, debido a la presencia de la albúmina en el lubricante, puesto que se evita la transferencia de UHMWPE a la superficie metálica, pero cuando se tiene alúmina la transferencia es inevitable y el COF es mayor, Fig. 1.4.

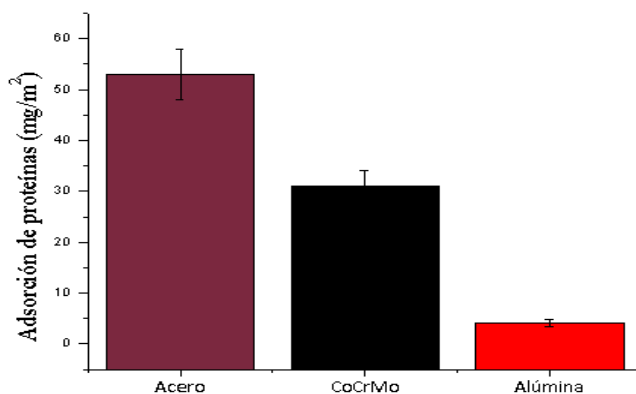


Fig. 1.3. Cantidad de BSA adsorbida sobre diferentes superficies de materiales obtenida mediante radiomarcado de albúmina ^{125}I -labeled [45].

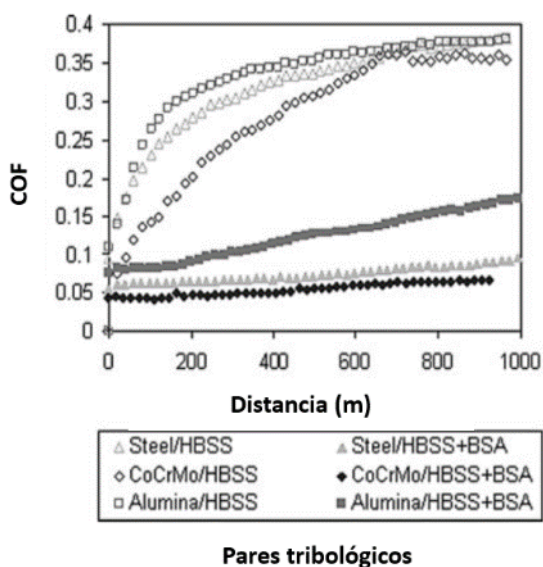


Fig. 1.4. Comportamiento del COF, en función de la distancia, para diferentes contrapartes tribológicas del UHMWPE, lubricados con soluciones de HBSS y BSA en HBSS [45].

Mishina y Kojima [46] investigaron los cambios de la albúmina de suero humano (HSA) causada por la fricción en materiales protésicos como: Alúmina, UHMWPE y CoCrMo utilizando como lubricante soluciones de albúmina en PBS, esta investigación demostró que la reducción de la fricción y desgaste están relacionados con la adsorción de la albúmina en los materiales

hidrofóbicos UHMWPE y CoCrMo, debido a la desnaturalización térmica y al cizallamiento de las moléculas de albúmina. Las superficies de estos materiales presentaron un ángulo de contacto alto de $\theta_{\text{agua}} = 86^\circ$ y $\theta_{\text{agua}} = 61^\circ$, respectivamente, por lo tanto, cuanto mayor sea el ángulo de contacto de la superficie con agua, mayor será el volumen de albúmina que será adsorbida. Los cambios del peso molecular de la albúmina causados por la fricción se investigaron mediante la técnica SDS-PAGE, Fig. 1., para el caso del par tribológico alúmina/alúmina se observa claramente que generó una banda entre 55 y 75 kDa después de los experimentos de fricción, ya que son superficies hidrofílicas. Además, para todas las combinaciones de pares tribológicos se forma esa banda de 55 a 75 kDa, en cambio, para la combinación alúmina/UHMWPE se pueden observar fuertes bandas de 10, 12, 25-30, 35, 55 y 75 kDa, en el caso de la combinación de CoCrMo/UHMWPE se generaron nuevas bandas de 10,12, 30-35, 55 y 75 kDa, es importante mencionar que para la albúmina se detecta a 66 kDa.

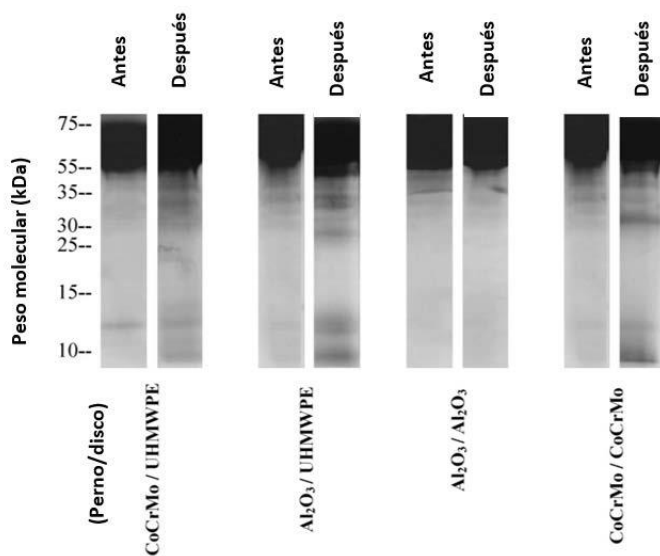


Fig. 1.5. Cambios en el peso molecular de la solución de HSA antes y después de los experimentos de fricción mediante la técnica SDS-PAGE [46].

Es posible reducir la fricción en los reemplazos articulares, mediante la modificación química de la superficie de los materiales protésicos, para adsorber selectivamente ciertas glicoproteínas [47]. Acorde con los resultados de interferometría colorimétrica y microscopía fluorescente de Neças et al. [48], se puede proporcionar información de cuál es el papel que desempeñan las proteínas en la película lubricante, independientemente de los componentes presentes en el lubricante; asimismo, ellos deducen que el aumento en el espesor de la película

lubricante a velocidades altas es causado por la γ -globulina, en cambio, cuando se tiene rodamiento puro o deslizamiento puro el espesor de la película se incrementa debido a la presencia de la albúmina en el lubricante.

En otro estudio, McClellan y Franses [49] utilizaron las técnicas de espectroscopía ATR-IR, humectabilidad y elipsometría para determinar cuantitativamente la adsorción de la BSA, a partir de soluciones acuosas, sobre superficies hidrófobas de óxido de silicio-silicio. Todas las capas de la película con proteínas son bastante similares e hidrófobas, debido a que tienen el mismo ángulo de contacto con el agua, $53^\circ \pm 1^\circ$. El ángulo de contacto de una monocapa de lípidos DPPC es más pequeño ($47^\circ \pm 1^\circ$), lo que indica que la capa es menos hidrófoba que las capas de BSA ($53^\circ \pm 1^\circ$), teniendo este último, el mismo ángulo de contacto que para BSA con DPPC, lo que indica que existe más despliegue de proteína en la superficie hidrofóbica que en la hidrofílica.

Es importante tener en cuenta que algunos de los estudios antes mencionados investigaron la adsorción de las moléculas presentes en el LS sobre los biomateriales, debido a que la adsorción de la proteína en su forma nativa a las superficies de los cojinetes puede evitar el contacto directo entre las dos superficies, reduciendo la fricción y el desgaste entre ellas.

Myant, Fan y Cann [50] midieron el espesor de película lubricante por interferometría óptica entre el componente femoral CoCrMo y vidrio, lubricando las superficies de los materiales con fluidos BS y soluciones salinas que contienen proteínas (albúmina, globulina), para cuantificar el efecto del contenido de proteínas y la carga en la formación de la película, así como el desgaste del componente femoral. Los lubricantes que contenían globulina redujeron significativamente el desgaste de CoCrMo, debido a que formaron una película lubricante más gruesa (30 nm), en comparación con los fluidos que contenían albúmina (1 nm). El aumento gradual de las películas para la albúmina y los fluidos que contenían BCS podrían atribuirse a la disminución de la presión de contacto en lugar de la deposición de películas superficiales, por lo tanto, la formación de película en los reemplazos de cadera es muy susceptible a altas presiones de contacto.

En relación con las propiedades del LS de la articulación artificial de cadera, Mavraki y Cann [51], profundizaron en el estudio del comportamiento de las proteínas albúmina y γ -globulina en la formación de la película lubricante. Los experimentos de fricción se llevaron a cabo en un tribómetro de bola en disco bajo condiciones constantes de carga (5 N) y velocidad media (5-50 mm/s), a 37°C . Los resultados indican que la fricción y el espesor de película son dependientes

de la velocidad de rodamiento o del tiempo, por lo que se concluye que la formación de la película está relacionada directamente con la presión de contacto y fricción.

1.2. Planteamiento del problema

Con la finalidad de incrementar la resistencia al desgaste de UHMWPE es necesario mejorar la lubricación del sistema tribológico, esta investigación propone estudiar el efecto de una superficie texturizada de UHMWPE en contacto con una bola de acero inoxidable 316L sobre el coeficiente de fricción (COF) mediante modelos experimentales para cuantificar el efecto de las variables independientes: densidad de área texturizada, velocidad media, relación de rodamiento/deslizamiento y presión de contacto. Para lo cual se propone, encontrar el diseño de texturizado (tamaño de las cavidades, separación entre las cavidades y profundidad) sobre los discos de UHMWPE en contacto estático con una bola AISI 316L mediante análisis de elemento finito. Posteriormente, evaluar la densidad de área texturizada de la superficie de UHMWPE sobre el COF utilizando un tribómetro de bola en disco, y lubricando las superficies del par tribológico con suero fetal bovino a 20 g/L, con los datos obtenidos experimentalmente se obtendrán modelos de regresión del COF que nos ayudarán a cuantificar el efecto de las variables sobre el COF al utilizar un fluido de base proteínas.

1.3. Hipótesis

Se espera que se reduzca el COF al utilizar microcavidades sobre la superficie de UHMWPE al estar en un contacto rodante-deslizante con una bola de acero inoxidable 316L, lubricado con suero bovino fetal, debido al efecto hidrodinámico creado por la presión de empuje relacionado a las microcavidades superficiales en el UHMWPE. Esto permitirá determinar si el proceso tribológico y mecánico tienen algún efecto significativo en las proteínas durante la lubricación con suero bovino fetal.

Se espera mejorar el régimen de lubricación al utilizar un área microtexturizada sobre la superficie del UHMWPE en contacto rodante-deslizante con una bola de acero inoxidable 316L lubricado con suero de bovino fetal, debido a que las cavidades permitirán guardar el lubricante y crearán un efecto hidrodinámico extra que mantendrá las dos superficies separadas.

1.4. Justificación

El mejorar el régimen de lubricación presente entre superficies no conformes que se encuentran en movimiento relativo favorece la resistencia al desgaste, por lo tanto, el presente trabajo propone establecer la factibilidad de utilizar superficies microtexturizadas de UHMWPE en contacto rodante-deslizante con una bola de acero inoxidable 316L lubricado con suero de bovino fetal. Todo esto, con el fin de explorar el efecto del proceso tribomecánico sobre el comportamiento reológico del lubricante.

1.5. Objetivo General

Determinar el efecto tribológico del microtexturizado en discos de UHMWPE en contacto rodante-deslizante con una esfera de acero inoxidable AISI 316L con un biolubricante.

1.5.1. Objetivos específicos

- I. Evaluar numéricamente el esfuerzo cortante de von Mises y la presión de contacto sobre la superficie con microtexturizado de UHMWPE para diferentes densidades (20 y 40 %) en contacto con una bola AISI 316L para las cargas de 1 y 11 N.
- II. Evaluar experimentalmente el efecto del microtexturizado que se encuentra sobre la superficie de los discos de los discos de UHMWPE en contrato contra una bola de acero inoxidable 316L sobre el COF en un tribómetro de bola en disco con un biolubricante, como es el caso del suero fetal bovino, en condiciones del espacio fase (V_m de 10-100 mm/s, SRR de 0.2-3.6, y L de 1-11 N).
- III. Determinar el efecto de la superficie texturizada de UHMWPE y las condiciones del espacio fase sobre el biolubricante.

2. Marco teórico

En este trabajo de investigación se propone evaluar el efecto del texturizado superficial utilizado en el UHMWPE en el COF bajo diferentes condiciones cinemáticas y de cargas cuando se lubrican las superficies de los materiales con suero bovino. Para lograr lo antes mencionado es necesario conocer los conceptos de proteínas, aminoácidos, estructura de las proteínas, regímenes de lubricación, espesor de película para diferentes regímenes de lubricación, esfuerzos de contacto, formas de contacto Hertziano, teoría de fallas, lubricación *in vitro* en prótesis de rodilla y texturizado superficial.

2.1. Biolubricantes

2.1.1. Líquido sinovial (LS)

El líquido sinovial (LS) es un fluido altamente viscoso con un comportamiento no-Newtoniano, el cual tiene una viscosidad y comportamientos viscoelásticos que dependen de la velocidad de corte. Además, está compuesto de proteínas con bajo peso molecular como la albúmina, globulina, transferrina, serumocina y con alto peso molecular como el fibrinógeno, β_2 macroglobulina y lipoproteína; además, contiene ácido hialurónico (HA). [52] La función del LS es lubricar y absorber el impacto entre las superficies de una articulación. El LS circula continuamente para proporcionar nutrientes y una ruta de eliminación de desechos para los condrocitos de los cartílagos articulares. [53] El LS contiene un total de proteína de 18-20 g/L, de los cuales el 63 % es de albúmina y 37 % de globulina, [54] como se puede apreciar la composición del LS es muy diferente a la del SB, Tabla 2.1. El principal componente del suero de bovino fetal (FSB) es la proteína globular albúmina; esta proteína también se encuentra en el LS humano [55].

Tabla 2.1 Composición general de las proteínas presentes en 3 diferentes sueros [56,57].

| Composición | Concentración (g/l) | | |
|--------------------------------------|---------------------|-------|-------|
| | FBS | NBCS | ACS |
| Proteínas totales (g/L) | 38.2 | 52 | 42 |
| Albúmina | 17 | 20.8 | 30.11 |
| α-globulina | 11.6 | 17.68 | 5.12 |
| β-globulina | 9.1 | 7.3 | 6.63 |
| γ-globulina | 0.5 | 6.13 | 0.126 |

*FBS, suero de bovino fetal; NBCS, suero de ternero recién nacido; ACS, suero de ternero alfa.

2.1.2. Suero bovino

El SB es un lubricante ampliamente reconocido para realizar pruebas tribológicas *in-vitro*, pero al no ser un fluido sinovial y no contener ácido hialurónico, [58] su comportamiento reológico es diferente al del LS. Smith et al. [59] propone desalorar un lubricante con propiedades mecánicas más significativas biológicamente que las del SB.

Cuando el fluido lubricante es agua esterilizada y desionizada, el coeficiente de fricción (COF) entre los materiales acero inoxidable y UHMWPE es menor, en comparación con las disoluciones de suero bovino fetal (SFB) bajo las condiciones artrocinemáticas y de carga establecida en la norma ISO 14243-3:2014. Aún cuando las variables del sistema cambian continuamente, contrastando el comportamiento tribológico del sistema lubricado con agua contra el mismo en presencia de proteínas, se intuye que la reología del SFB es completamente distinta en condiciones de carga y velocidad diferentes a las del reómetro. El estudio sistemático de este comportamiento dilucidaría la función de las proteínas en el fenómeno de lubricación y arrojaría una visión más realista de su reología. [60]

El LS de bovino tiene las mismas proteínas que el LS periprotésico humano, pero en cantidades diferentes; sin embargo, el LS periprotésico humano y bovino exhiben características típicas de adelgazamiento por cizallamiento a una viscosidad constante de 0.003 (Pa s) y velocidades de corte altas (10000-40000 s⁻¹), esto se debe a la presencia de HA, el cual es el componente con mayor peso molecular. [61] El comportamiento reológico del suero de ternero

de bovino (BCS), a velocidades de corte fisiológicas ($>10^4 \text{ s}^{-1}$) para la cadera, es adelgazamiento por cizalladura. [62]

2.1.3. Proteínas

En esta sección se abordará el tema de las proteínas, se revisará que es una proteína, su estructura, los tipos de proteínas y su uso como lubricantes en sistemas biomecánicos, este contenido queda resumido en la Fig. 2.1.

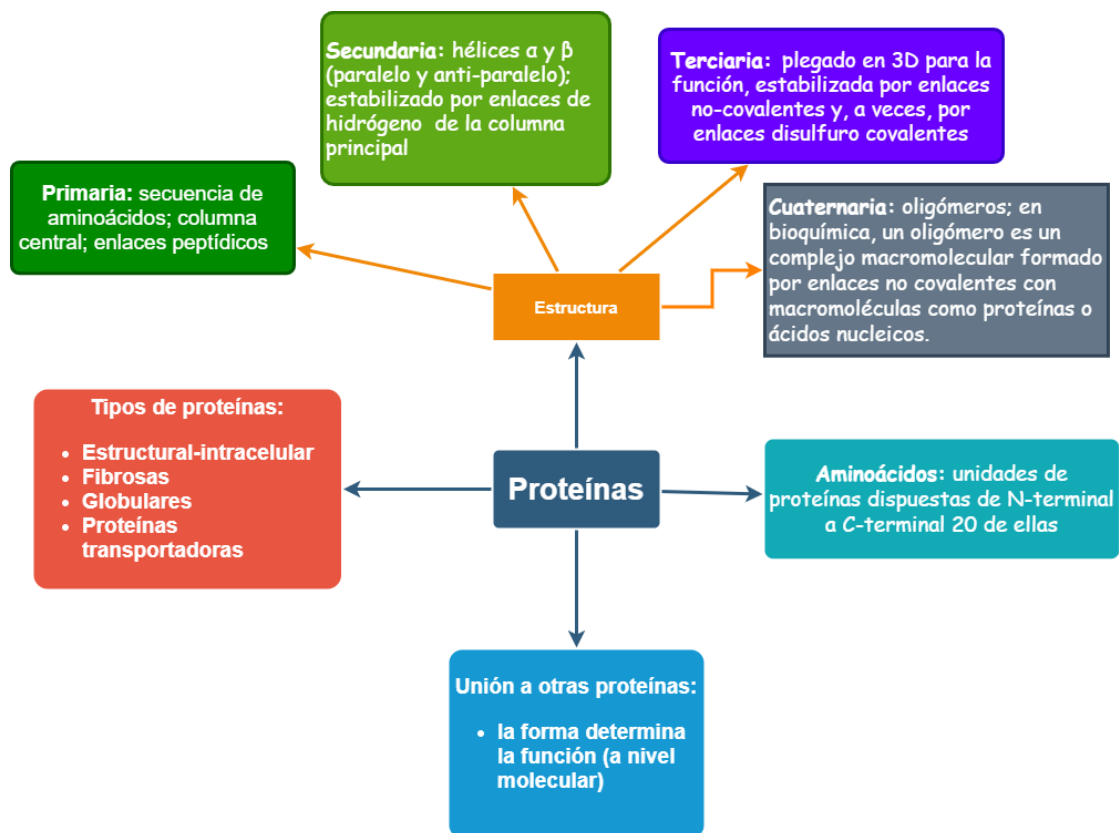


Fig. 2.1. Esquema de las proteínas.

Las proteínas son las moléculas más abundantes en las células, estas tienen una estructura y conformación (forma) única que les permite llevar a cabo una función específica en una célula viva. Cada reacción química en la célula viva se cataliza por enzimas [63] y todas las enzimas son proteínas. Las proteínas contienen carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno principalmente, algunas proteínas contienen azufre y otros elementos adicionales, por ejemplo, la leche contiene proteínas como fósforo, hemoglobina y mioglobina (contiene hierro) [64].

Las proteínas son polímeros que están formadas por un grupo de aminoácidos. Existen más de 20 aminoácidos diferentes en la naturaleza, los cuales tienen propiedades dependiendo de su estructura y composición [64]. Las proteínas están unidas por enlaces peptídicos [63]; químicamente, el enlace peptídico es un enlace covalente que se forma entre un ácido carboxílico y un grupo amino por la pérdida de una molécula de agua, por lo que los enlaces peptídicos son enlaces fuertes y no se rompen fácilmente; la disociación de este enlace requiere de 356 KJ/mole [63]. Un polipéptido contiene varias cadenas de aminoácidos unidos por enlaces peptídicos.

Las proteínas son moléculas grandes que están formadas por varios cientos de aminoácidos, estas pueden hidrolizarse produciendo polipéptidos más pequeños, por enzimas [64]. Los aminoácidos son los componentes básicos de las proteínas. Un ejemplo de una proteína globular típica es la mioglobina la cual se observa en la Fig. 2.2 esta proteína es la encargada de almacenar y transportar el oxígeno en los músculos. La mioglobina tiene un grupo hemo que contiene un átomo de hierro central incrustado en la cadena de polipéptidos plegada [65].

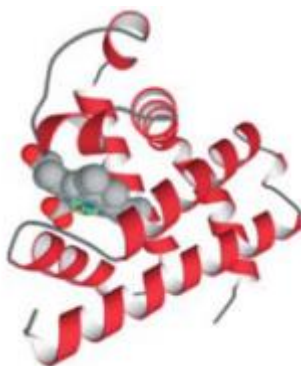


Fig. 2.2. Representación esquemática de la mioglobina, esta proteína se une a una molécula de oxígeno (color azul) de forma reversible al átomo de hierro en su grupo hemo (que se muestra en gris con el hierro en verde) [63].

Aminoácidos

Todas las proteínas están formadas por residuos de aminoácidos unidos en un orden que se deriva de la información que reside en nuestros genes; algunas proteínas están claramente relacionadas entre sí porque tienen secuencias similares, mientras que la mayoría de las proteínas exhiben una composición y orden de residuos muy diferente a lo largo de la cadena polipeptídica. En la Fig. 2.3 se observa la estructura química de un aminoácido (azul), carboxilo (rojo) y el grupo R (o cadena lateral) unido al carbono central (α), el átomo restante conectado al carbono central es un átomo de hidrógeno. El grupo R es el responsable de las diferentes propiedades de los aminoácidos, y este grupo contribuye considerablemente a las propiedades físicas de las proteínas [66]. La secuencia de los aminoácidos es importante, porque la ubicación de los aminoácidos a lo

largo de la cadena determina que tipos de enlaces se formarán y dónde, además, de cuánta hélice, hoja o bobina aleatoria estará presente en una proteína [64].

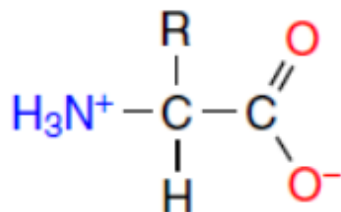


Fig. 2.3. Estructura general de un α -aminoácido [66].

Los aminoácidos son anfóteros, es decir, pueden comportarse como un ácido o como una base en el agua, dependiendo del pH [64]. Debido a sus cadenas laterales, tienden a participar en diferentes interacciones entre sí y con el agua, estas tendencias contribuyen a la estabilidad y función de las proteínas. Los aminoácidos se dividen en las siguientes categorías [63]:

- Hidrofóbica: los residuos de aminoácidos hidrófobos participan sólo en las interacciones de van der Waals, además, tienen tendencia a evitar el contacto con el agua; esta es una característica de los grupos no polares, por ejemplo, en los polímeros, las cadenas laterales hidrófobas tienden a asociarse entre sí para minimizar su contacto con el agua o las cadenas laterales polares.
- Hidrofílica: los residuos de aminoácidos hidrofílicos son capaces de formar enlaces de hidrógeno entre sí, a la columna vertebral peptídica, a moléculas orgánicas polares y al agua.
- Anfipática: los residuos anfipáticos tienen características polares y no-polares, lo que los hace ideales para formar interfaces entre moléculas hidrofóbicas e hidrofílicas. La cadena lateral, que contiene lisina, se considera anfipática debido a su larga región hidrófoba que, a menudo, está involucrada en las interacciones de van der Waals con las cadenas laterales hidrófobas.

Al igual que los aminoácidos las proteínas también son anfóteros [64].

Función de las proteínas

Las proteínas tienen diferentes funciones bioquímicas como: unión, catálisis e interruptores moleculares. Las proteínas son moléculas que pueden unirse a otras macromoléculas para desempeñar diferentes funciones, por ejemplo, las ADN polimerasas actúan como reguladoras de genes; las hemoglobinas actúan como proteínas de transporte [63]. En la Tabla 2.2, se observa que las proteínas pueden tener múltiples papeles o funciones [66], esta diversidad funcional y estructural de las proteínas se deriva de la diversidad química de las cadenas laterales de sus aminoácidos constituyentes, la flexibilidad de la cadena polipeptídica y la gran cantidad de formas en que se pueden plegar las cadenas polipeptídicas con diferentes secuencias de aminoácidos. Por lo tanto, las proteínas son moléculas flexibles y su conformación puede cambiar en respuesta a los cambios en el pH o la unión del ligando (ligand binding) [63].

Tabla 2.2. Lista de algunas funciones de las proteínas dentro de las células [66].

| Funciones de las proteínas. | Ejemplos de proteínas. |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Proteínas catalíticas o enzimas. | Tripsina, ADN polimerasas y ligasas. |
| Proteínas contráctiles | Actina, miosina, tubulina, dineína. |
| Proteínas de transporte | Hemoglobina, mioglobina, albúmina sérica, ceruloplasmina, transtiretina. |
| Proteínas de defensa | Ricina, inmunoglobulinas y trombina. |
| Proteínas de almacenamiento | Ferritina y gliadina. |
| Proteínas represoras | JUN, FOS, lambda Cro, |

Estructura de las proteínas

Cada proteína está definida por una secuencia única de residuos y niveles de aminoácidos, en la Fig. 2.4 se presentan las estructuras de las proteínas, las cuales son:

- Estructura primaria: es la secuencia específica de aminoácidos unidos por enlaces peptídicos a lo largo de la cadena de la proteína [64].
- Estructura secundaria: es la organización tridimensional de los segmentos de la cadena polipeptídica [64]; la cadena de polipéptidos puede tomar la forma de hélices alfa o de cadenas beta, formadas a través de interacciones regulares de enlaces de hidrógeno entre grupos de N-H y C=O en las partes invariables de los aminoácidos en el esqueleto del polipéptido o cadena principal.
- Estructura terciaria: esta estructura representa la cadena polipeptídica plegada, la cual está definida por el arreglo de los elementos de la hélice alfa, la hoja beta o ambos, así

como los bucles y enlaces que no tienen una estructura secundaria. Existen dos tipos de proteínas con estructuras terciarias, las proteínas fibrosas y globulares.

- Estructura cuaternaria: muchas proteínas se forman por asociación de las cadenas plegadas de más de un polipéptido [2].

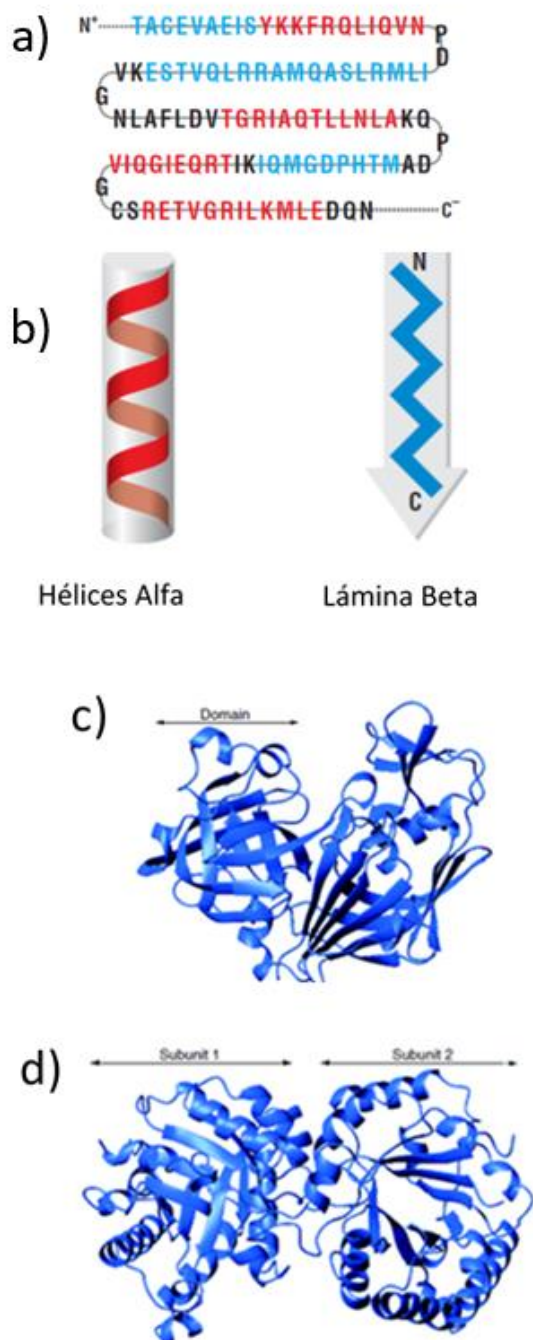


Fig. 2.4. Los cuatro niveles de la estructura de las proteínas, a) primaria, b) secundaria, c) terciaria y d) cuaternaria [63,66].

Desnaturalización de las proteínas

La desnaturalización es cualquier modificación no proteolítica de la estructura única de una proteína nativa, que da lugar a cambios definidos en las propiedades químicas, físicas o biológicas, en términos generales la desnaturalización es un cambio intramolecular de la proteína. La desnaturalización no implica la ruptura de enlaces peptídicos, la proteína se desdobra, pero no hay cambios en la secuencia de los aminoácidos. La desnaturalización puede ocurrir como resultado de [67]:

- I. La disminución de la solubilidad de la proteína.
- II. La pérdida de funciones biológicas específicas.
- III. La reducción de la capacidad de cristalización.
- IV. Los cambios en la forma molecular de la proteína.
- V. Agentes desnaturalizantes.
- VI. Cambio del pH.

En la Fig. 2.5 se observa el despliegue de la proteína, donde las cadenas laterales que estaban enterradas en el centro de la molécula quedan expuestas como resultado de la desnaturalización, esta reacción es irreversible y no es posible recuperar la conformación original de la proteína; por lo que, una proteína desnaturalizada pierde sus propiedades funcionales [64]. Los agentes desnaturalizantes se dividen en tres categorías que son, físicos, químicos y biológicos [63], la Fig. 2.5 muestra algunos ejemplos de estos.

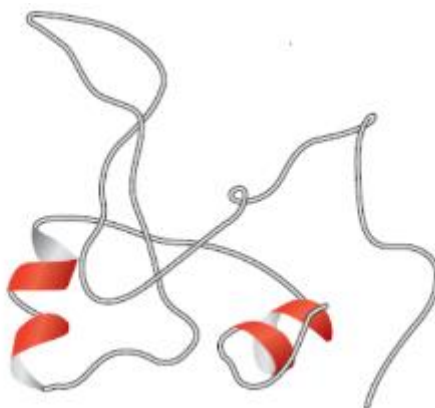


Fig. 2.5. Representación esquemática de una proteína desnaturalizada [63].

Tabla 2.3 Agentes desnaturalizantes de una proteína [67].

| Agentes desnaturalizantes: | | |
|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------|
| Físicos | Químicos | Biológicos |
| Calor, presión, congelación, irradiación, ondas sonoras y fuerzas de superficie. | Hidrógeno e iones hidroxilo, disolventes y solutos orgánicos. | enzimas |

La estructura de una proteína puede ser interrumpida por una variedad de agentes como [67], las altas temperaturas. Estas rompen las interacciones débiles que estabilizan la forma plegada o nativa de una proteína y, en ocasiones, convierten la estructura en una gran parte desplegada, en las cuales estas interacciones son remplazadas por enlaces de hidrógeno con agua. Otro factor de desnaturalización es la mutación sensible a la temperatura; que ocurre cuando una proteína normalmente estable se despliega a temperaturas relativamente bajas. Además, las proteínas se desnaturalizan por agentes químicos como la urea o el clorhidrato de guanidina, o detergentes como SDS [63].

El fenómeno de la desnaturalización de las proteínas se puede estudiar mediante la cuantificación de péptidos y aminoácidos usando absorbancia UV-visible o fluorescencia UV. Las proteínas y péptidos, con aminoácidos aromáticos, son intrínsecamente fluorescentes cuando se excitan con luz ultravioleta. Los tres residuos de aminoácidos que son los principales responsables de la fluorescencia inherente de las proteínas son el triptófano, la tirosina y la fenilalanina. Estos residuos tienen distintas longitudes de onda de absorción y emisión y difieren en los rendimientos cuánticos. El triptófano (longitud de onda 348 nm) es mucho más fluorescente que la tirosina (303 nm) o la fenilalanina (282 nm). La tirosina puede excitarse en longitudes de onda similares a las del triptófano, pero emite en una longitud de onda claramente diferente [68].

Técnica para el análisis de las proteínas

La espectrofotometría UV-visible es una técnica analítica que permite determinar la concentración de un compuesto en solución. La técnica espectrofotométrica mide la intensidad de luz (energía radiante o radiación electromagnética) para determinar la concentración del analito presente en la muestra; un analito es un componente de interés analítico presente en una muestra. Existen dos métodos espectrofotométricos para cuantificar al analito: espectrofotometría de absorción (la luz absorbida por el analito y se relaciona con la

concentración), y espectrofotometría de emisión (la luz emitida por un analito previamente excitado). Las longitudes de onda que se encuentran en el rango entre 400 a 700 nm pertenecen a lo que se denomina región visible del espectro. Para realizar mediciones por esta técnica se emplea un espectrofotómetro, en el que se puede seleccionar la longitud de onda de luz que pasa por una solución y medir la cantidad de luz absorbida; la absorbancia nos indica la cantidad de luz absorbida por la muestra. La absorbancia de una solución es directamente proporcional a su concentración a mayor número de moléculas mayor interacción de la luz con ellas. También, depende de la distancia que recorre la luz por la solución (cuanto mayor distancia recorre la luz por la muestra más moléculas se encontrará) [99].

En la Fig. 2.6 se muestra el principio de funcionamiento del equipo llamado espectrofotómetro, el diseño puede variar pero todos tienen en común el análisis de datos, una fuente de energía radiante (lámpara de deuterio y tungsteno), un recipiente transparente (tubos de vidrio, cuarzo o plástico transparente para medir en UV se deben usar las de cuarzo o sílice fundido porque el vidrio no transmite la radiación UV), un detector de luz, un amplificador (convertidor de las señales luminosas en señales eléctricas) y un sistema de lectura de datos [99].

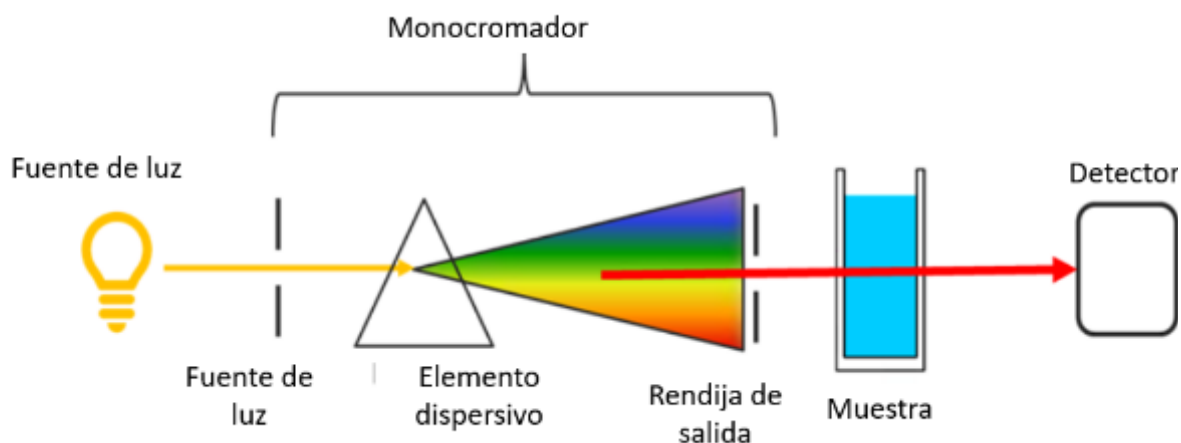


Fig. 2.6. Representación esquemática del funcionamiento del espectrofotómetro [100].

2.2. Regímenes de lubricación

A principios del siglo XX se realizó una investigación sobre los límites de la lubricación hidrodinámica por Stribeck [69], en la cual por primera vez se difundió la curva de Stribeck donde

se explica la fricción en los cojinetes lisos a través de experimentos sistemáticos [3]. La curva de Stribeck es una representación del COF en función del número de Hersey $\eta w/p$, donde η es la viscosidad absoluta (Pas), w es la velocidad angular (rps) y p es la presión (Pa), en la Fig. 2.7 se muestran los regímenes de lubricación, de capa límite, mixto, EHL (elastohidrodinámico) e hidrodinámico [3].

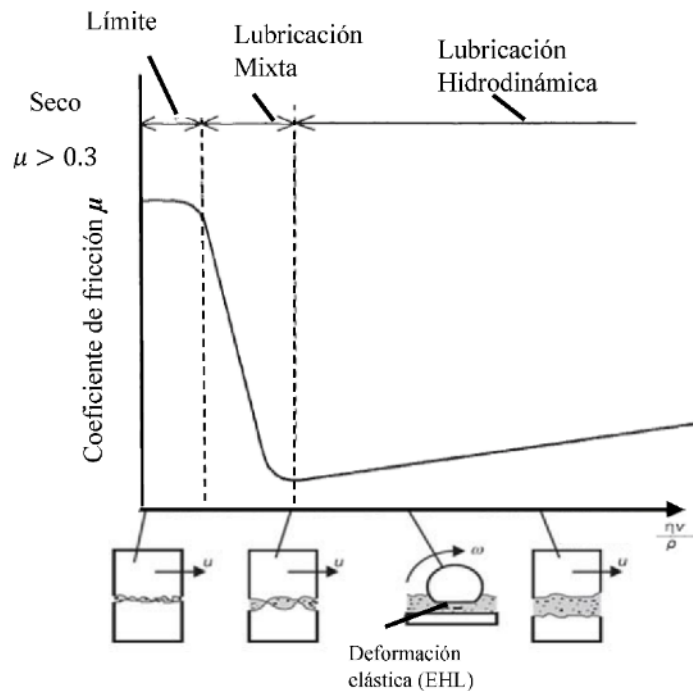


Fig. 2.7. Esquema de la curva de Stribeck y regímenes de lubricación [70,71].

La contribución de estos mecanismos de lubricación al espesor total de la película dependerá de las propiedades del lubricante y los parámetros de operación [72]. Los diferentes regímenes de lubricación son identificados por la relación de λ , que está definida por la Ec.1; esta representa la relación entre la separación y la rugosidad de la superficie compuesta de los rodamientos sólidos:

$$\lambda = \frac{h_{min}}{(R_{a1}^2 + R_{a2}^2)^{1/2}} \quad \text{Ec. 2.1}$$

donde h_{min} es el espesor mínimo de la película y R_a es la rugosidad de las superficies de los dos cuerpos en contacto, después de calcular el coeficiente λ , se pueden identificar los regímenes de lubricación con base en los siguientes rangos [3,73,74], ver Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Predicción del régimen de lubricación con base en el coeficiente λ .

| Régimen de lubricación | Coeficiente λ |
|----------------------------|-------------------------|
| Lubricación de capa límite | $0.1 < \lambda < 1$ |
| Lubricación mixta | $1 \leq \lambda \leq 3$ |
| Lubricación EHL | $3 < \lambda < 10$ |
| Lubricación hidrodinámica | $5 < \lambda < 100$ |

2.2.1. Régimen elastohidrodinámico (EHL)

La lubricación elastohidrodinámica (EHL) es una forma de la lubricación hidrodinámica donde la deformación elástica de los cuerpos en contacto y los cambios de viscosidad con la presión juegan un papel fundamental [1]. Este régimen ocurre entre superficies de baja conformidad geométrica como los rodamientos de bolas, articulaciones humanas y animales, también puede ocurrir en superficies conformes. En general, los rodamientos que están lubricados en el modo EHL son de baja conformidad geométrica, en la ausencia de una película de lubricante y de deformación elástica, las superficies opuestas estarían en contacto en un punto (rodamiento de bolas) o en una línea (engranajes) [75].

El resultado de la solución numérica del problema de EHL se puede observar en la Fig. 2.8, en la cual se observa claramente la tendencia de la presión y las diferentes formas de la película lubricada, en el eje de las ordenadas se observan dos escalas de valores, la primera escala es para la presión de contacto Hertziana (p) cuyas unidades son ton/in², el segundo eje de valores corresponde al espesor de película (h) con unidades (in). A medida que la carga (presión de contacto) se hace más estrecha la zona de la película lubricada. Además, en la Fig. 2.8 se observan las letras a, b, c y d las cuales corresponden a un valor de presión de contacto de Hertz (5, 10, 20 y 30 ton/in²) [76]. Por lo tanto, la gran variación en la carga representa una variación en el espesor de la película.

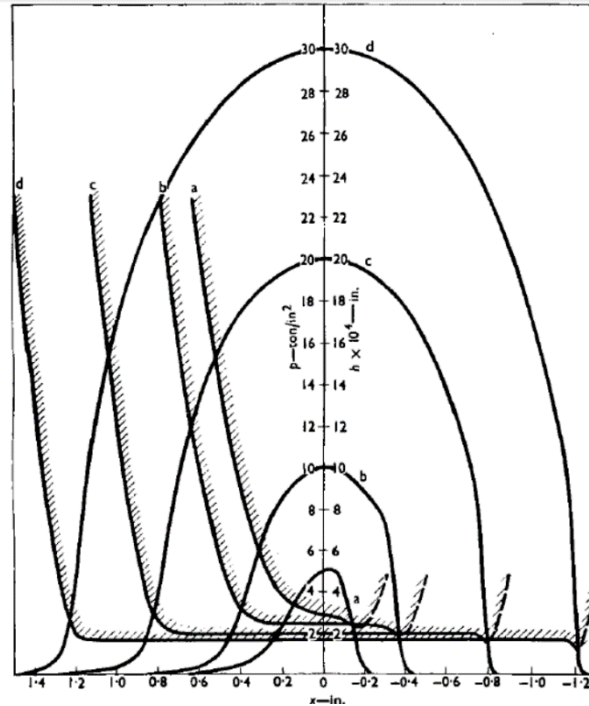


Fig. 2.8. Distribuciones de presión y formas de película con viscosidad dependiente de la presión y cilindros elásticos [76].

Para solucionar el problema de EHL se deben resolver simultáneamente las ecuaciones de Reynolds, la deformación elástica, viscosidad y presión. También, se debe tomar en cuenta la tasa de corte y los efectos térmicos [77].


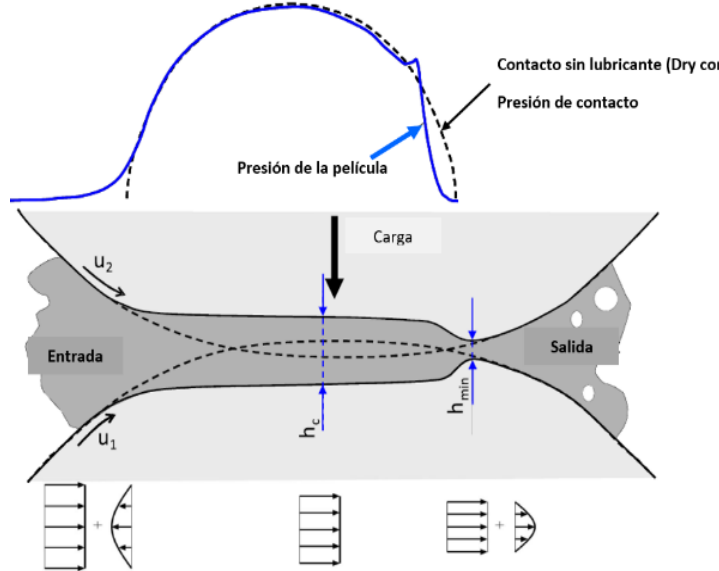
Existen dos clasificaciones de la lubricación EHL: para materiales suaves y duros; los cuales se definen a continuación.

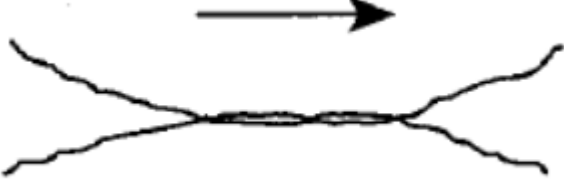
- EHL dura (hard): es para superficies con módulos elásticos altos como metales, en la cual las deformaciones elásticas como la dependencia de la presión con la viscosidad son parámetros importantes que se deben considerar. La máxima presión de la película lubricada es de entre 0.5 y 4 GPa. El espesor mínimo de la película lubricada no excede a $0.1 \mu\text{m}$.
- EHL suave (soft): se refiere a los materiales con bajos módulos elásticos como caucho. En este régimen se producen deformaciones elásticas considerables incluso con cargas bajas. La máxima presión ocurre a 1 MPa, esta baja presión de la película lubricada no se considera en la viscosidad durante el flujo a través de la separación mínima de lubricante [2].

2.2.2. Película lubricante

La película lubricante separa los dos cuerpos que se deslizan uno sobre otro, para entender cómo actúa el lubricante es importante entender tres condiciones que existen [78]; las cuales son: película fluida, la cual puede ser hidrodinámica o hidrostática; elastohidrodinámica o capa límite. Cada condición se relaciona con un espesor de película presente en el área de contacto; la Tabla 2.5 indica algunas de las propiedades de cada una.

Tabla 2.5. Tipos de películas lubricantes [79].

| Tipo de Película | | Esquema | Generalidades |
|---------------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fluida | Hidrodinámica |  | <p>Las superficies están completamente separadas por una película de un líquido o lubricante gaseoso. Normalmente se genera una presión de soporte de carga por uno de los siguientes tipos de acción [80].</p> |
| | Hidrostática | | |
| Elastohidrodinámica | |  | <p>Esta ocurre entre superficies no-conformes, no hay contacto entre las asperezas de las superficies sólidas, pero si hay deformación elástica [81].</p> |

| | | |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Capa Límite |  | Las asperezas de las rugosidades de ambos cuerpos entran en contacto en varios puntos ocurriendo deformación elástica y plástica. |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

2.3. Espesor de la película para diferentes regímenes de lubricación

Existen cuatro principales regímenes de lubricación de película hidrodinámica en contactos no conformes, influenciados por dos efectos físicos: la deformación elástica de los sólidos bajo una carga aplicada y el aumento de la viscosidad del fluido con la presión. A continuación, se explican estos cuatro regímenes [3]:

- Rígido isoviscoso: la presión de contacto máxima es demasiado baja para incrementar la viscosidad del fluido, además, la deformación elástica de las superficies es insignificante en relación con el espesor de la película lubricada.
- Rígido viscoso: es cuando la presión de contacto es suficientemente alta para incrementar la viscosidad del fluido, pero al mismo tiempo no es suficientemente alta como para cambiar la forma de las piezas sólidas. Se puede encontrar en anillos de pistón.
- Elástico isoviscoso: aquí la presión de contacto no tiene un efecto en la viscosidad del lubricante, sin embargo, se presenta deformación elástica de los sólidos. Este régimen se presenta con materiales de bajo módulo elástico (suave EHL) se puede encontrar en articulaciones humanas, llantas y elastómeros.
- Elástico viscoso: la presión de contacto es suficientemente grande para incrementar la viscosidad del lubricante y causar deformación elástica en los cuerpos sólidos.

Fórmula del espesor de película para el régimen elástico iso-viscoso

El espesor mínimo de la película lubricada ($H_{e, \min}$) se obtiene aplicando la teoría EHL de contacto elíptico a los contactos con bajos módulos elásticos (soft EHL) en función de los parámetros: elipticidad (k) y los términos adimensionales de velocidad y carga. El parámetro de elipticidad varía de 1 (para la configuración de bola en un plano) a 12 (para la configuración del contacto lineal o rectangular). El $H_{e, \min}$ está dado por la Ec.2.2 [3]; donde, la carga (W) y la velocidad (U) son términos adimensionales.

$$H_{e, \min} = 7.43U^{0.65}W^{-0.21}(1 - 0.85e^{-0.31k}) \quad \text{Ec. 2.2}$$

2.4. Ecuación de Reynolds

Reynolds proporcionó la primera prueba analítica de que un líquido viscoso puede separar físicamente dos superficies deslizantes por presión hidrodinámica, lo que resulta en una baja fricción y, teóricamente, sin desgaste. La teoría de Reynolds explica cómo la viscosidad del aceite ayuda a que se genere una película de lubricante entre las dos superficies que se encuentran en movimiento relativo, debido a que el fluido ayuda a distribuir la carga sobre la superficie opuesta [1].

La ecuación diferencial gobernada por la distribución de la presión en la lubricación de película fluida fue derivada por O. Reynolds en 1886, para un fluido incompresible. La ecuación de Reynolds constituye la base de la teoría de la lubricación de películas fluidas, esta ecuación establece una relación entre la geometría de las superficies, la velocidad relativa de deslizamiento, la viscosidad y la magnitud de la carga normal que puede soportar el rodamiento (bearing). La ecuación de Reynolds se puede obtener de las ecuaciones de Navier-Stokes y la ecuación de continuidad, o de las leyes de un flujo viscoso y el principio de conservación de la masa [3,77].

La ecuación generalizada de Reynolds se obtiene como sigue:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\rho h(u_a + u_b)}{2} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\rho h(u_a + u_b)}{2} \right] + \rho \left[(w_a - w_b) - u_a \frac{\partial h}{\partial x} - v_a \frac{\partial h}{\partial y} \right] + h \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Los dos términos del lado izquierdo de la Ec.2.3 son los términos de Poiseuille y describen los caudales netos debidos a los gradientes de presión dentro del área lubricada. El primero y segundo

término del lado derecho de la ecuación son los términos de Couette y describen las tasas de flujo de arrastre neto debido a las velocidades de la superficie. El tercer término describe la tasa de flujo neto debido al movimiento de compresión, y el último término explica la tasa de flujo neto debido a la expansión local. La Ec. 2.3 proporciona una relación entre el espesor de película y la presión del fluido. La densidad y la viscosidad del fluido son una función de la presión y la temperatura, y es necesario utilizar sus valores en las condiciones locales. Para resolver esta ecuación por métodos numéricos se requiere tener las condiciones de frontera y otras simplificaciones [77].

2.5. Esfuerzos de contacto

Los esfuerzos de contacto ocurren en elementos de máquinas como: en el contacto de una rueda y un riel, en el árbol de levas y los balancines, en los dientes de engranes acoplados y en la acción de los rodamientos de bolas, debido a que las dos superficies curvas están bajo una carga que los deforma elásticamente, provocando áreas finitas de contacto. Los rodamientos a veces fallan como resultado de la formación de hoyos (picaduras) en la superficie de contacto, la falla comienza como una fractura localizada en forma de una grieta transversal diminuta en un punto a causa de los esfuerzos sobre o debajo de la superficie de contacto [82].

En el año de 1985, Hertz encontró una solución al problema de dos cuerpos elásticos ideales con superficies curvas que se presionan juntos por cargas externas, donde se obtiene el máximo esfuerzo de contacto de compresión y de corte generados en el área de contacto; esta solución consiste en explicar porque las tensiones pueden limitar la capacidad de carga de los cuerpos en contacto, debido a que los esfuerzos producidos debajo de la superficie del contacto son una de las principales causas de falla de uno o ambos materiales, por ejemplo la falla en un mecanismo se origina por una diminuta fisura transversal en un punto del material, algunas veces debajo de la superficie de contacto [82].

2.5.1. Teoría de contacto (Hertz)

El primer análisis de la deformación y presión de contacto de dos cuerpos elásticos con geometrías definidas por superficies cuadráticas lo realizó Hertz (1882), este contacto se conoce como contacto Hertziano. Su análisis está basado en las siguientes suposiciones [77]:

- Las superficies son continuas, suaves y no-conformes.
- Las deformaciones son pequeñas.
- Cada cuerpo sólido puede ser considerado como un espacio medio elástico en la proximidad de la región de contacto.
- Las superficies no tienen fricción.

2.5.2. Formas de contacto Hertziano

La forma del área de contacto depende de la forma (curvatura) de los cuerpos en contacto, la curvatura de los cuerpos puede ser convexa, plana o cóncava, esta distinción es fundamental para definir el parámetro del radio de curvatura reducido que caracteriza la geometría de contacto [1].

Las formas de contacto más comunes son contacto puntual o a lo largo de una línea. Cuando una esfera y una superficie plana (o un equivalente dos esferas) entran en contacto, inicialmente se forma un contacto puntual con forma circular, Fig. 2.9a), por lo que el tamaño del contacto crece en función de la carga. Cuando un cilindro entra en contacto con una superficie plana se forma un contacto de línea, este contacto crece en forma rectangular a medida que se incrementa la carga Fig. 2.9b) [77]. Cuando dos cuerpos entran en contacto uno con superficie circular y la otra cóncava se genera una forma elíptica Fig. 2.9c).

En la Tabla 2.6 se indican los parámetros que se necesitan para calcular el área de contacto entre dos esferas o una esfera en un plano [77].

Tabla 2.6. Fórmula para el contacto de dos esferas (o esfera en un plano) [77].

| Área de contacto | Máxima presión de contacto | Promedio de la presión de contacto | Máxima deflexión | Máximo esfuerzo cortante |
|------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| $a = \left(\frac{3WR'}{E'}\right)^{1/3}$ | $P_{max} = \frac{3W}{2\pi a^2}$ | $P_{promedio} = \frac{W}{\pi a^2}$ | $\delta = 1.0397\left(\frac{W^2}{E'^2 R'^2}\right)^{1/3}$ | $\tau = \frac{1}{3}P_{max}$ a una profundidad de z = (0.638) (a) |

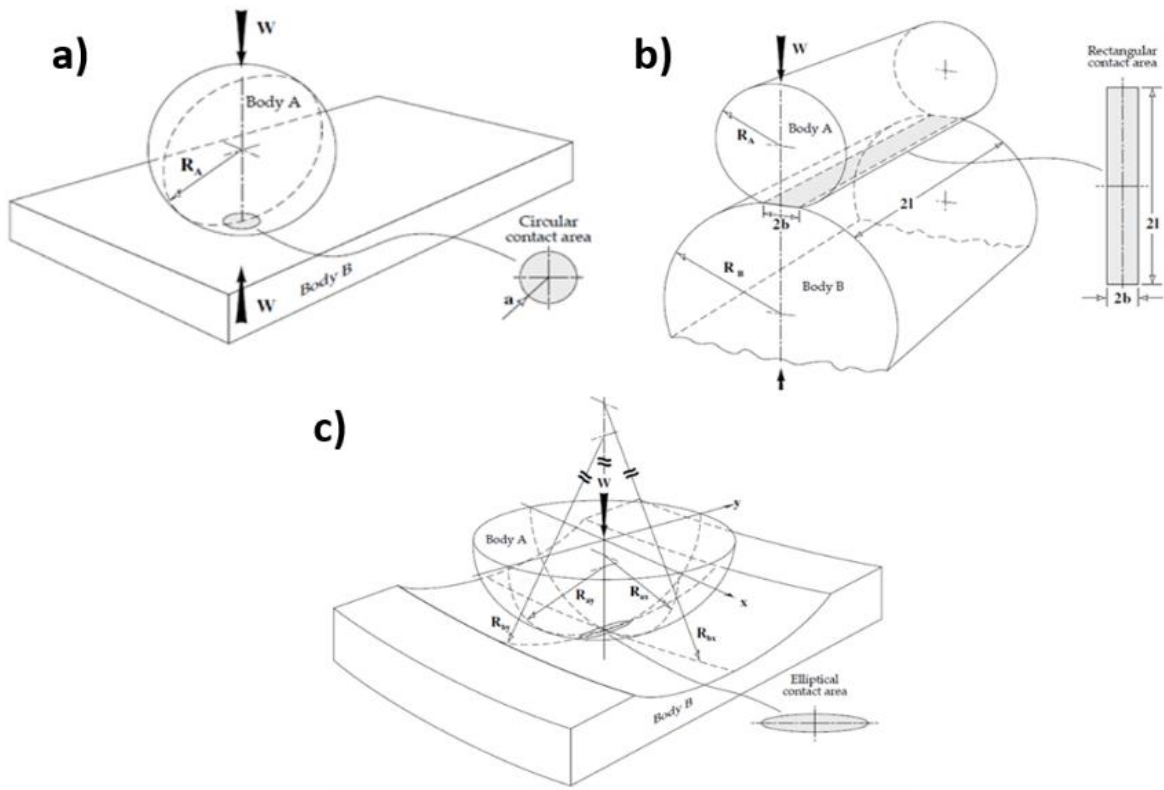


Fig. 2.9. a) Contacto entre una esfera y una superficie plana, b) geometría del contacto entre dos cilindros paralelos y c) geometría de dos cuerpos con una superficie convexa y otra cóncava en contacto para el análisis de lubricación y teoría de contacto [1].

2.5.3. Contacto puntual

En la zona de contacto se generan grandes presiones, lo cual resulta en un incremento significativo en la viscosidad del lubricante y una deformación elástica de las superficies sólidas. Al igual que en el contacto lineal las superficies deformadas en los contactos lubricados son similares al contacto Hertziano, con una película lubricante interpuesta. Para predecir el espesor de película se debe resolver la ecuación de Reynolds en dos dimensiones, en conjunto con la ecuación de elasticidad, y las características de viscosidad y presión [77].

2.5.4. Geometría de superficies suaves no-conformes en contacto

Cuando dos superficies sólidas no-conformes entran en contacto inicialmente se tocan en un punto o a lo largo de una línea. Bajo la acción de una carga pequeña se deforman cerca de su primer punto de contacto tocándose en un área finita, aunque más pequeña en comparación con las dimensiones de los dos cuerpos, por ello, es fundamental una teoría de contacto para predecir la forma de esta área de contacto y como crece en tamaño a medida que se incrementa la carga; la magnitud y distribución de las tracciones superficiales, normales y posiblemente tangenciales, transmitidas a través de la interfaz. Además, debe permitir que se calculen en ambos cuerpos la deformación y estrés en las proximidades de la zona de contacto [83].

2.6. Teoría de fallo estático

Actualmente, no existe una teoría universal de falla para un caso general de las propiedades del material y el estado de esfuerzo. Normalmente, cuando una máquina deja de cumplir con su función es porque alguno de sus componentes presenta una falla, las fallas más comunes que se pueden presentar son el agrietamiento, la ruptura de la pieza, y la deformación permanentemente (arruinado su geometría) [84].

Las teorías de fallo se eligen para saber si un material es capaz de resistir las cargas. Algunas teorías de fallo se adaptan mejor a materiales dúctiles, otras a frágiles, otras a materiales anisótropos, esta situación provoca que existan diferentes teorías de fallo para los materiales. El fallo puede ser por fluencia si el material es dúctil, o la de rotura si es frágil. A continuación, se clasifican las teorías de fallo de acuerdo con el comportamiento del material dúctil o frágil [84].

Materiales dúctiles (criterios de fluencia).

- Esfuerzo cortante máximo.
- Energía de distorsión.
- Mohr-Coulomb para materiales dúctiles.

Materiales frágiles (criterios de fractura).

- Esfuerzo normal máximo
- Mohr Coulomb para materiales frágiles
- Mohr modificada

A continuación, se explican las teorías más empleadas para fallos dúctiles que son la teoría del esfuerzo cortante máximo (Tresca), la teoría de distorsión máxima (von Mises) y la teoría de Coulomb-Mohr.

La teoría del esfuerzo cortante máximo de Tresca establece que la cedencia (fluencia) comienza cuando el esfuerzo cortante máximo en un punto es igual al esfuerzo cortante máximo en fluencia en la prueba de tensión o compresión uniaxial; mientras que el criterio de densidad de energía de distorsión (von Mises) establece que la fluencia inicia cuando la densidad de la energía de distorsión en un punto es igual a la densidad de energía de distorsión a la fluencia en tensión o compresión uniaxial [85], esta teoría se emplea más porque se ha comprobado que experimentalmente se ajusta mejor a la realidad. Además, se utiliza porque se comprobó que los materiales dúctiles sometidos a esfuerzos hidrostáticos presentan resistencias a la fluencia, está se relaciona con la distorsión angular del elemento esforzado [84].

2.7. Lubricación *in-vitro* en prótesis de rodilla

Desde la perspectiva de la biomecánica, la rodilla es la articulación más compleja del cuerpo humano, debido a que es la articulación que soporta más peso y variaciones de velocidad, además de que las curvaturas de las superficies articulares no son concéntricas y los cóndilos tibiales son poco profundos [86], Fig. 2.10 [87]. El problema de durabilidad de los materiales es complejo de abordar, por lo cual se busca, por una parte, entender y mejorar las propiedades mecánicas del inserto de polietileno, mediante diferentes aproximaciones teóricas y experimentales [88] y, por la otra, entender la fricción y desgaste de los biomateriales [89,90].



Fig. 2.10. Diferentes tipos de prótesis de rodilla: a) reemplazo total de rodilla, b) reemplazo de rodilla unicompartmental, y c) reemplazo patelofemoral [87].

Para entender cuáles son las condiciones de contacto que existen en los implantes de las articulaciones de cadera y rodilla, es necesario analizar las presiones de contacto entre los componentes del implante y el espesor de la película lubricante sinovial desde la teoría EHL [91]. La información que debe contener el análisis es: las velocidades relativas de la superficie de contacto, la geometría de las superficies, las propiedades de los sólidos en contacto y las propiedades del LS. Además, es necesario conocer e incluir las deformaciones de los materiales en el análisis de la presión y las distribuciones del espesor de la película del fluido sinovial que separa las superficies sólidas. Kennedy et al. [91] concluyeron que el contacto sólido-sólido ocurre regularmente, debido a que se presenta el régimen de lubricación de capa límite y mixto, por lo que el desgaste del inserto de UHMWPE es inevitable.

Křen y Hynčík [86] presentaron un modelo matemático en donde se considera el flujo del LS para prótesis de rodilla totales, en este modelo se obtienen las ecuaciones básicas del fluido Newtoniano como: Navier-Stokes y Continuidad. Este modelo se simplifica como un modelo plano donde se calcula la distribución de presión debido a la interacción entre el fémur y la tibia en el LS, la solución del método numérico anteriormente mencionado fue para un flujo estacionario, isotérmico y laminar No-newtoniano incompresible, usando una ley de potencia

para la viscosidad. El interés de la investigación fue el proponer un modelo matemático de la articulación de la rodilla en el cual se consideran las relaciones cinemáticas y geométricas del enlace entre el fémur-tibia (movimiento relativo), LS, la carga estática y dinámica (especialmente la fuerza de contacto), con la finalidad de conocer la interacción del LS con la articulación de rodilla. En el estudio de Mongkolwongrojn [92] se investigó el comportamiento momentáneo de la película lubricada de fluidos Newtonianos y no-Newtonianos en un remplazo de rodilla bajo condiciones de contacto puntual del ciclo de la marcha entre el par tribológico UHMWPE-CoCr mediante simulación numérica, esta solución numérica consiste en resolver simultáneamente las ecuaciones de Reynolds (dependiente del tiempo, con fluido no-Newtoniano basado en el modelo de Carreau) y de elasticidad mediante los métodos de perturbación, Newton-Raphson y multigrad con una técnica de aproximación. Los resultados de esta investigación muestran que cuando las velocidades se aproximan a cero en diversos puntos durante el ciclo de la caminata, el espesor de película nunca desciende a cero, debido a que existe una película de compresión que soporta la carga, este comportamiento se observa en fluidos Newtonianos y no-Newtonianos. La película de compresión es más efectiva para soportar el punto de carga a velocidad cero, cuando la carga es más ligera. El espesor de película lubricada es menor para un fluido no-Newtoniano que, para un fluido Newtoniano bajo condiciones similares de cargas y velocidades, este comportamiento se debe al efecto de adelgazamiento por cizalladura.

El grupo de Flannery [89] utilizó un fluido acuoso de carboximetilcelulosa como lubricante para investigar la capacidad de las articulaciones para operar dentro de un régimen de lubricación de película fluida. Los regímenes de fricción y lubricación se evaluaron experimentalmente mediante el análisis de Stribeck y, utilizando la teoría de Hamrock y Dowson, para demostrar que las articulaciones operan con baja fricción al emplear como lubricante soluciones acuosas.

El diseño de baja conformidad de la superficie del inserto tibial de polietileno puede causar desalineación de los componentes, lo cual resulta en desgaste por delaminación. Este fenómeno se asocia con la presencia de defectos de fusión en el polietileno, pero también podría ocurrir en ausencia de tales defectos [93].

El lubricante artificial que se debe utilizar en pruebas de desgaste de reemplazos totales de rodilla en un simulador debe ser suero de ternera, PBS y HA, con el fin de igualar las principales propiedades bioquímicas del LS humano con OA, para así poder comprender el mecanismo de desgaste de los biomateriales; [94] no obstante, existen diversos factores en el entorno fisiológico

de las articulaciones sinoviales como las proteínas y las moléculas de fosfolípidos que afectan el desgaste del UHMWPE.

2.8. Texturizado superficial

Se puede mejorar el desempeño del régimen de lubricación entre dos superficies que se encuentran en movimiento relativo utilizando micro-irregularidades (microcavidades) sobre las superficies de acuerdo con Hamilton [95]. El texturizado superficial mejora el desempeño tribológico de los componentes mecánicos de mecanismos del rodamiento, por ello diversos estudios [15,17,96] están enfocados en abordar el problema de lubricación EHL mediante soluciones numéricas y experimentales para entender el efecto del texturizado superficial en los diferentes regímenes de lubricación para poder optimizar el desempeño tribológico de superficies paralelas, teniendo en cuenta las diversas ventajas como: reserva de lubricante, incrementar el espesor de película entre los componentes acoplados, funcionan como trampas de residuos de desgaste y minimizar el desgaste abrasivo adicional en las superficies de los rodamientos (cojinetes); sin embargo, aún existe una gran área de oportunidad para mejorar el régimen de lubricación porque se debe optimizar las condiciones del texturizado superficial como el tipo de geometría de texturizado (cuadrado, circular, elíptico), patrón, profundidades y separación entre cavidades, igualmente se debe considerar los tipos de materiales a utilizar y como se va a realizar la fabricación del texturizado superficial (maquinado, micro-maquinado, presando de pallets, grabado químico, laser de superficie, descarga eléctrica, estampado de diamante y electroquímica [97]). También, se deben tomar en cuenta las condiciones de operación como el tipo de lubricante, velocidades, relación entre la velocidad y la carga.

Los componentes de los rodamientos están diseñados para tener una larga vida útil mediante el rendimiento funcional específico, sin embargo, el desempeño de los componentes se puede ver limitado por la generación de calor afectando las propiedades del lubricante, causando un cambio en las condiciones de operación del rodamiento [15]. Mejorar el desempeño tribológico de dos superficies en contacto es posible, por lo cual se han utilizado diferentes técnicas de modelado y métodos numéricos para predecir el desempeño de una superficie texturizada o rugosa, con la finalidad de determinar los parámetros de texturizado óptimos como forma, tamaño y distribución que ayude a mejorar el desempeño del espesor de película, fricción y desgaste. Sin embargo, el realizar simulaciones numéricas es complejo, puesto que existe una variedad de técnicas de modelado que carecen de un método estándar [98].

Por otra parte, algunos de los beneficios de usar superficies texturizadas son: un incremento en el arrastre del lubricante al área de contacto, las cavidades permiten almacenar el lubricante, minimiza el efecto de desgaste entre los materiales, la presión hidrodinámica aumentará, se reducirá el área de contacto y la adhesión. En la Fig. 2.11 se representan los parámetros geométricos más importantes a considerar en el diseño de una superficie texturizada: la densidad de texturizado, geometría, profundidad, arreglo de las cavidades, superficie de texturizado plana, y el perfil de fondo de la cavidad [15].

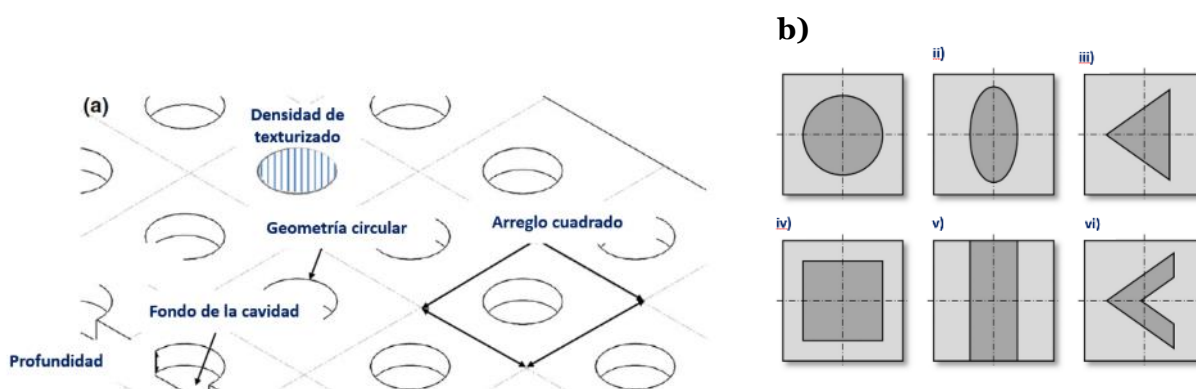


Fig. 2.11. a) Parámetros geométricos de una superficie texturizada [15], y b) diferentes formas geométricas de texturizado [98].

3. Técnicas y métodos

Este capítulo es la recopilación de la metodología necesaria para llevar a cabo los experimentos con éxito. En las Fig. 3.1 y Fig. 3.2 se muestra la metodología desarrollada; la cual se dividió en dos partes: la primera parte corresponde al diseño CAD, validación del texturizado superficial, caracterización de las piezas de UHMWPE y pruebas experimentales en el tribómetro de bola en disco Fig. 3.1, y la segunda parte se refiere al biolubricante y las mediciones realizadas por la técnica de espectroscopía Uv-visible estudio del biolubricante Fig. 3.2. El efecto del texturizado se evaluó utilizando un fluido de base proteínas como lo es el suero bovino y también se evaluó el desempeño tribológico del texturizado superficial de UHMWPE lubricando con agua destilada, por lo cual se realizaron pre-experimentos en el tribómetro de bola en disco utilizando un disco texturizado de UHMWPE lubricando la superficie con agua destilada, a fin de poder comparar cual es el efecto de dos fluidos (un fluido No-newtoniano y un fluido Newtoniano) sobre una superficie texturizada de UHMWPE bajo diferentes condiciones de cargas, velocidades medias y relación de rodamiento/deslizamiento.

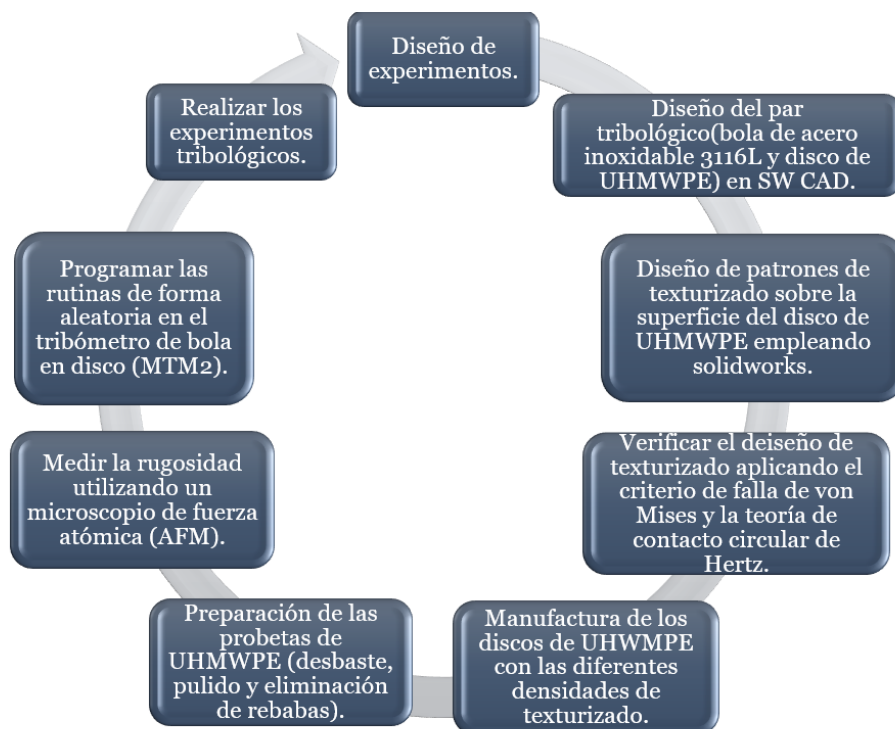


Fig. 3.1. Diagrama de la metodología experimental.



Fig. 3.2. Esquema de la metodología experimental para el biolubricante.

3.1. Diseño del arreglo del texturizado

Para realizar el diseño de las cavidades sobre la superficie del UHMWPE es necesario saber cuál es el área de contacto entre el par tribológico y determinar la densidad de área texturizada; la cual se calculó con la Ec.3.1 [13], donde R es el radio de la cavidad, l se refiere a la distancia entre centro-centro de las cavidades. La Tabla 3.1 muestra los diferentes diseños de texturizado propuestos; en total 13 diseños diferentes con las cavidades de geometría circular con densidades de texturizado del 20 y 40 %. Vale la pena resaltar, que este texturizado se calculó suponiendo un arreglo cuadro para la separación radial, pero se tienen dos separaciones una radial y una angular.

$$\rho(\%) = \frac{A_\varphi}{A_n} = \frac{\pi R^2}{l^2} \quad \text{Ec. 3.1}$$

$$A_n = \frac{A_\varphi}{\rho(\%)}$$

Las condiciones de la Tabla 3.1, para la densidad del 20 y 25 % se repiten para las cavidades con tamaños de diámetro de 200 y 300 μm , donde se varía la separación con base en la Ec. 1.

Tabla 3.1. Diseño experimental para dos tipos diferentes de cavidades diámetros utilizando dos densidades de texturizado.

| Diámetro (μm) | Profundidad (μm) | Separación (μm) | Densidad de área texturizada (%) |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 50 | 50 y 100 | 177.3 | 25 |
| 100 | 100 | 198.16 | |
| 100 | 200 | 198.16 | 20 |
| 100 | 300 | 198.16 | |

Tabla 3.2. Diseño experimental para el diámetro de 200 μm utilizando la densidad de área texturizada del 20 %.

| Diámetro (μm) | Profundidad (μm) | Separación (μm) |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 200 | 100 | |
| 200 | 200 | 396.33 |
| 200 | 300 | |

Para los tamaños de diámetro de 50 y 100 μm que se muestran en la Tabla 3.3, para las dos densidades de 40 y 45 %, se utilizan las condiciones de la Tabla 3.2, variando la separación entre las cavidades con base a la Ec.3.1.

Tabla 3.3. Diseño experimental para la densidad de área texturizada del 40 y 45%.

| Diámetro (μm) | Profundidad (μm) | Separación (μm) | Densidad de área texturizada (%) |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 50 | 60 y 80 | 132 | 45 |
| | 100 | 140.12 | |
| 100 | 200 | 140.12 | 40 |
| | 300 | 140.12 | |

Para colocar las cavidades solamente donde se tiene el contacto entre la bola y el disco se realizó el cálculo del área de contacto mediante la teoría de Hertz para contacto circular (Ec.3.2) que requiere el cálculo previo del radio efectivo de la bola (r) que se determina con la Ec.3.3 y para ello se debe obtener el módulo elástico efectivo (E' , Ec. 3.4). El módulo E' se determina conociendo los módulos elásticos de la bola y del disco (E_1 y E_2), el coeficiente de Poisson para ambos materiales (ν_1 y ν_2).

El área de contacto está definida por:

$$A = \pi r^2 = \pi \left(3F \frac{R'}{E'} \right)^{2/3} \quad \text{Ec. 3.2}$$

donde r está definido por:

$$r = \left(3F \frac{R'}{E'}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ec. 3.3}$$

donde E' es el módulo efectivo de elasticidad el cual se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$\frac{1}{E'} = \frac{1-\nu_1^2}{2E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{2E_2} \quad \text{Ec. 3.4}$$

3.1.1. Diseño de las geometrías del par tribológico en CAD

Lo primero que se construyó fue el diseño de la bola y el disco con las dimensiones reales que se encuentran en el tribómetro de bola en disco, ambos diseños se hicieron por separado, para posteriormente tener el ensamble del par tribológico, Fig. 3.3, todo ello con la finalidad de poder evaluar el desempeño tribológico de los materiales cuando una de las superficies cuenta con modificaciones como el texturizado, mediante análisis de elemento finito utilizando el software ANSYS versión para estudiante. El diseño de las geometrías se realizó en Solidworks porque se cuenta con la licencia de este software, Fig. 3.3.

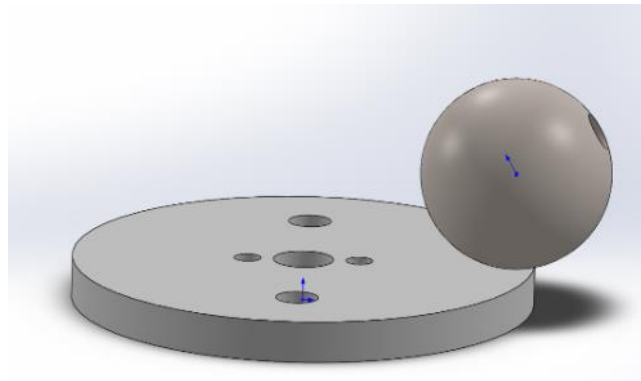


Fig. 3.3. Ensamble del par tribológico diseñado en solidworks.

Sobre el disco se diseñaron las geometrías circulares como se puede apreciar en la Fig. 3.4, esto se hizo para los tamaños de diferentes diámetros (100, 200 y 300 μm), y las dos densidades de texturizado (20, 25, 40 y 45 %), como se puede observar en la Fig. 3.4a) cuanto más grande es la separación entre las cavidades y el diámetro hay menos cavidades en la zona de contacto, el círculo punteado es la zona de contacto entre la bola y el disco, esta zona de contacto se calculó para contacto circular utilizando la teoría de Hertz, este contiene las microcavidades (que se encuentran en color amarillo). El diseño de las microcavidades sobre la superficie del disco de UHMWPE se realizó aplicando las Ec. 3.1 y 3.2, Fig. 3.5. En total se hicieron 13 configuraciones, para cada configuración se utilizó un disco de UHMWPE. Finalmente, se obtiene el ensamble del

par tribológico como se observa en la Fig. 3.5. En la Fig. 3.4 podemos observar que se encuentran diferentes densidades de área texturizada como las imágenes que se encuentran en las Figs. 3.4c) y d), donde las cavidades tienen un diámetro de 100 μm y dos densidades (25 y 45 %).

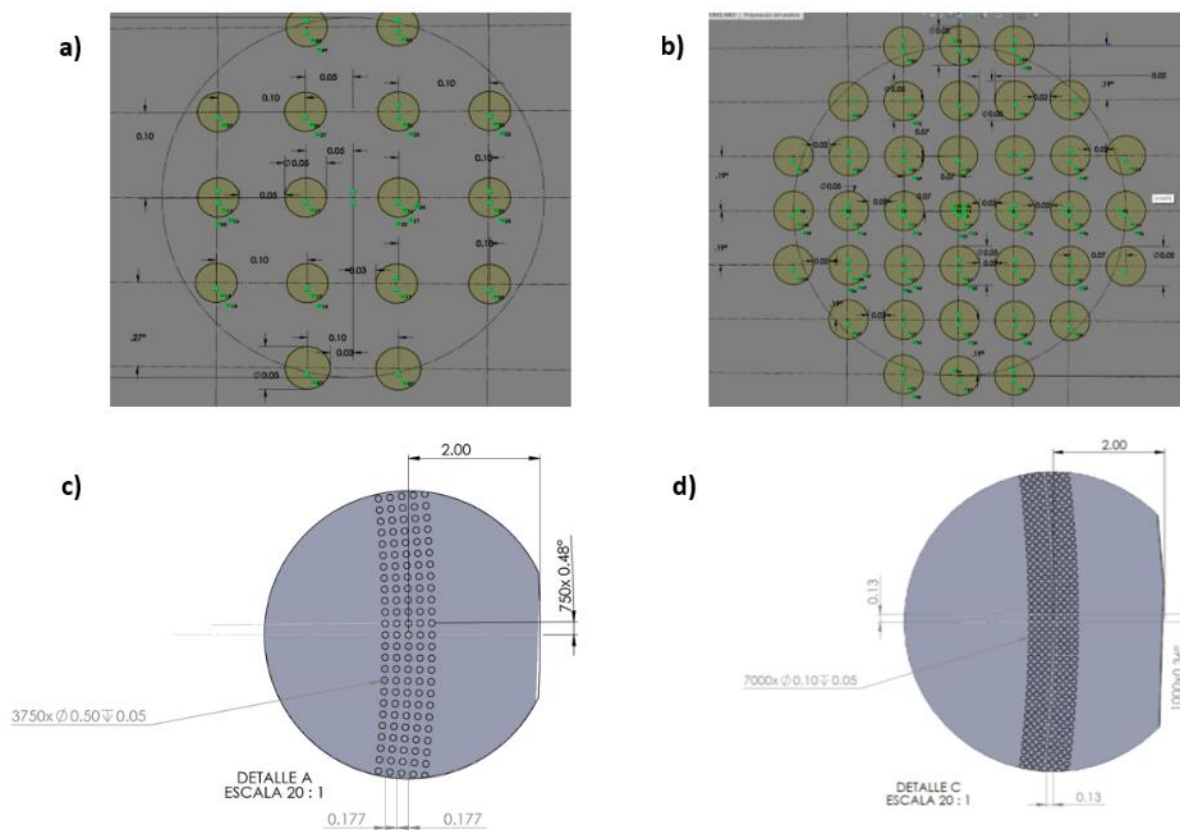


Fig. 3.4. Microcavidades sobre la superficie del disco de UHMWPE dentro del área de contacto, a) las cavidades tienen un diámetro de 100 μm , b) las cavidades tienen un diámetro de 50 μm , c) cavidades con 50 μm para una densidad el 25 % y d) cavidades con un diámetro de 100 μm para una densidad del 45 %.

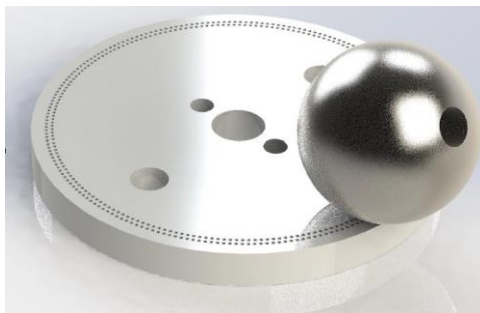


Fig. 3.5. Diseño de las microcavidades sobre la superficie del disco de UHMWPE.

La simulación se realizó utilizando una malla de hasta 32 mil nodos, por lo cual se tuvo que simplificar la geometría a $\frac{1}{4}$ del contacto Fig. 3.6a). La simplificación del contacto se realizó de acuerdo con la teoría de Hertz para contacto circular, con la finalidad de calcular la presión de contacto, ya que es una bola de AISI 316L contra un disco de UHMWPE; esta teoría considera los módulos elásticos, el módulo de Young, el coeficiente de Poisson's, el radio de la bola y la carga, y considera un plano infinito (sin espesor).

Al aplicar una carga de 1 N la presión de contacto del par tribológico obtenida mediante la teoría de Hertz para contacto circular es de 13.28 MPa; vale la pena destacar que las propiedades mecánicas utilizadas fueron con base en lo reportado en la literatura, para tener una mayor presión de los cálculos se deben realizar a los materiales pruebas de tensión para obtener la curva de esfuerzo-deformación de los materiales y poder conocer el módulo elástico y coeficiente de poisson, utilizando un software para calcular la presión de contacto del par tribológico se obtuvo 0.01 GPa, la diferencia es porque esta redondea los decimales. En la Fig. 3.6a) se puede observar que el par tribológico (disco de UHMWPE y bola AISI 316L) se simplificó su área de contacto a $\frac{1}{4}$, y en la Fig. 3.6b) se muestran las propiedades mecánicas del par tribológico.

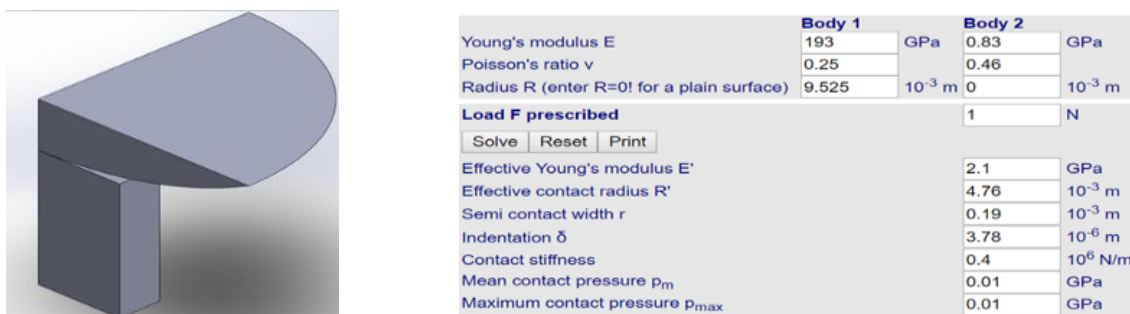


Fig. 3.6. a) Simplificación del par tribológico, y b) propiedades mecánicas de los materiales.

3.1.2. Diseño del texturizado en CAD

Una vez que se realizó la simplificación de área de contacto del par tribológico a 1/4, y se comprobó que los resultados de la presión de contacto obtenida mediante la teoría de contacto e ANSYS tengan una relación, lo cual se describe a detalle en la sección de resultados, se diseñaron las microcavidades sobre la superficie simplificada del disco de UHMWPE, Fig. 3.7b).

En la Fig. 3.7a), se muestra la densidad de área texturizada del 20 %, para cavidades con 100 μm de diámetro y profundidad de 100 μm , además, se puede apreciar que se tienen 7 cavidades sobre la superficie del disco. En la Fig. 3.7b) solo se observa una microcavidad sobre la superficie del disco, porque el tamaño de la cavidad es mayor que las cavidades de la Fig. 3.7a), la densidad de área texturizada es la misma (20 %).

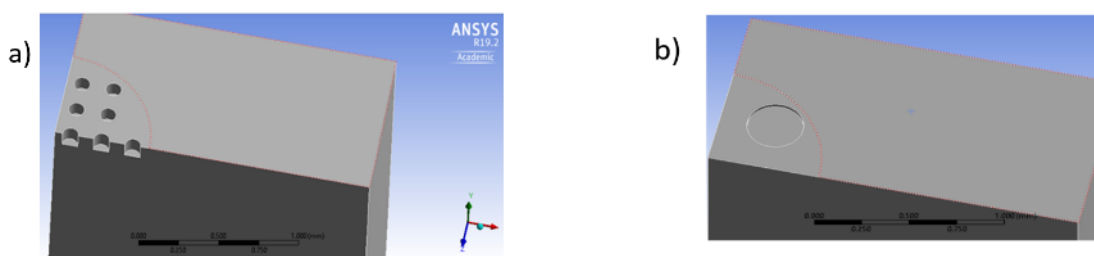


Fig. 3.7. Diseño de las cavidades sobre la superficie simplificada del disco de UHMWPE, a) las microcavidades tienen un diámetro de 100 μm , y b) la cavidad tiene un diámetro de 300 μm .

3.2. Preparación de discos de UHMWPE

3.2.1. Desbaste de los discos de UHMWPE

Los discos de UHMWPE se obtuvieron de una barra blanca de 2 pulgadas de diámetro y 120 pulgadas de largo, después de que se cortaron las piezas se realizó el maquinado en base a las especificaciones de los planos.

Una vez que se tienen los discos cortados y maquinados es necesario que estos pasen por un proceso de desbaste y pulido utilizando el equipo de esmerilado-pulido, para eliminar rebabas y llegar al acabado final del polímero tipo espejo; para lograr este acabado superficial los discos se pasan por 4 lijas del grano más grueso (400 a 600 grit) al más fino (800 a 1200 grit), en la Tabla. 3.4 se resume el proceso a seguir para obtener el acabado espejo de los discos de polietileno.

Las lijas utilizadas en el proceso de desbaste-pulido están hechas de papeles de amolado de carburo de silicio; esta técnica depende del proceso de maquinado de los discos, porque puede requerirse mayor o menor tiempo para la eliminación de los rayones, por eso se necesita observar entre lija y lija como van las líneas superficiales utilizando un microscopio óptico, con el fin de agilizar el proceso de pulido, además se debe tener control en el agua, cargas, y velocidades del equipo.

Tabla 3.4. Parámetros de la técnica de desbaste-pulido para los discos de UHMWPE, utilizando el brazo de la pulidora.

| Lija (grit) | Tiempo (min) | Velocidad (rpm) | L (N) |
|--------------------|---------------------|------------------------|--------------|
| 400 | 15 a 30 | 400 | 30 |
| | 30 a 60 | 350 | 20 |
| 600 | 15 a 30 | 400 | 25 |
| | 30 a 45 | 300 | 20 |
| 800 | 20 a 40 | 250 | 20 |
| | 30 a 120 | 200 | 15 |
| 1200 | 20 min | 100 | 20 |
| | 10 | 50 | 15 |

En la Fig. 3.8a) se observa el equipo utilizado para realizar el desbaste y pulido de la superficie de los discos de UHMWPE, este equipo cuenta con un brazo mecánico que permite colocar 3 muestras ayuda agilizar este proceso, solamente se debe tener cuidado con las condiciones de operación es decir la velocidad, presión y con las lijas. El proceso de desbaste/pulido, es un proceso del cual lleva algún tiempo realizarlo, por ello se debe supervisar cada 15 minutos el avance de los discos y revisar las lijas, para evitar saturación de material, si las lijas se saturan de material se pueden limpiar con un cepillo de cerdas suaves, para poder reutilizar la lija. La Fig. 3.8b) se muestran 3 discos, los cuales tienen diferentes acabados, el disco (1) cuenta solamente con el desbaste la superficie es opaca, (2) el disco dos tiene un proceso de desbaste/pulido pero la superficie aún es un poco opaca y aún cuenta con líneas que se observan a simple vista, y finalmente, el disco (3) tiene un acabado espejo, no hay ninguna raya que se

pueda observar a simple vista, y en el microscopio óptico las líneas se observan en una sola dirección.

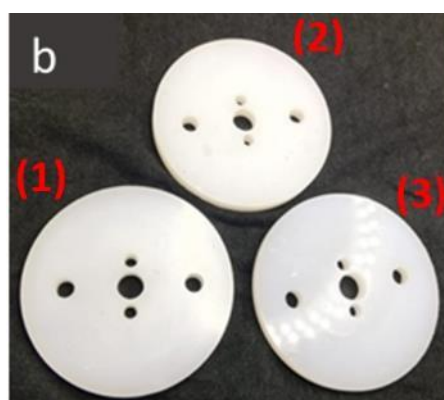


Fig. 3.8. a) Equipo de esmerilado-pulido que cuenta con un brazo mecánico, y b) discos de UHMWPE.

Además, se midió cuanto es el material que se pierde durante el proceso de desbaste-pulido porque los discos tienen un espesor de 4.20 mm y el objetivo es no eliminar tanto material durante el proceso de desbaste-pulido, para lo cual se usó un micrómetro, comprobando que el desbaste final es de 0.035 mm, y la masa que pierden es de 0.03 g, ver las Fig. 3.11a) y 3.11b).

3.2.2. Rugosidad de la superficie del UHMWPE

Una vez que los discos de UHMWPE tienen el acabado espejo, se midió la rugosidad de la superficie de estos utilizando el microscopio de fuerza atómica (AFM), modelo EasyScan2 de Nanosurf, mostrado en la Fig. 3.9a). Para realizar las mediciones de rugosidad se utilizaron los parámetros descritos en la Tabla 3.5. Se midieron 5 zonas por disco a lo largo del perímetro del disco. La rugosidad obtenida fue de $R_a 0.025 \pm 0.016 \mu\text{m}$ mediante el análisis de la topografía de la superficie del disco de UHMWPE, Fig. 3.9b).

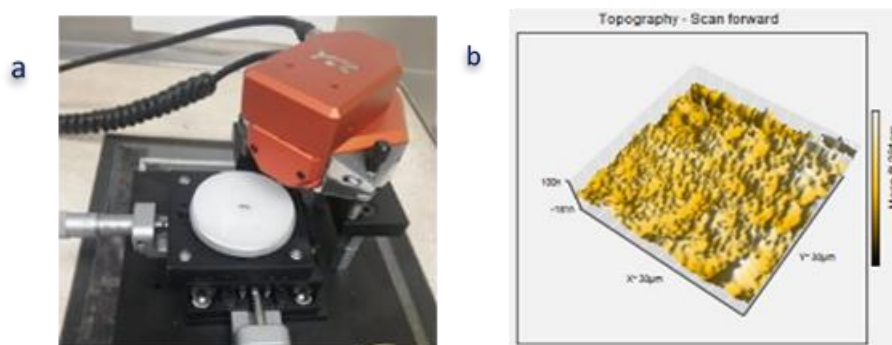


Fig. 3.9. a) Microscopio de fuerza atómica (AFM), EasyScan2, y b) topografía de la superficie en 3D de un disco de UHMWPE adquirida por AFM.

Tabla 3.5. Parámetros para realizar la prueba de desgaste.

| Equipo | Modelo | Condiciones de operación | Numero de zonas de medición | Área |
|-------------------------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Microscopio de fuerza atómica (AFM) | EasyScan 2, Nanosurf | Tapping mode | 5 | 907.1 pm ² |

3.2.3. Ancho de la huella de desgaste

Una vez que se realizaron los experimentos del COF del par tribológico (superficie lisa de UHMWPE/bola de acero inoxidable 316L) en el tribómetro de bola en disco (MTM2), se midió el ancho de la huella de desgaste que queda sobre la superficie de los discos de UHMWPE, con la finalidad de saber cómo cambio la topografía de los discos de UHMWPE después de haber realizado los experimentos tribológicos, se hicieron 5 mediciones del ancho de la huella de desgaste sobre los discos de UHMWPE utilizando un microscopio óptico de la marca Zeiss, esta medición se realizó a lo largo del perímetro del disco para superficies lisas, Fig. 3.10. El ancho de la huella de desgaste para la carga de 1 N fue de 533.454 μm , mientras que para la carga de 5 N es de 766.37 μm , y para la carga más alta (11 N) fue de 942.13 μm , ver Tabla 3.6.

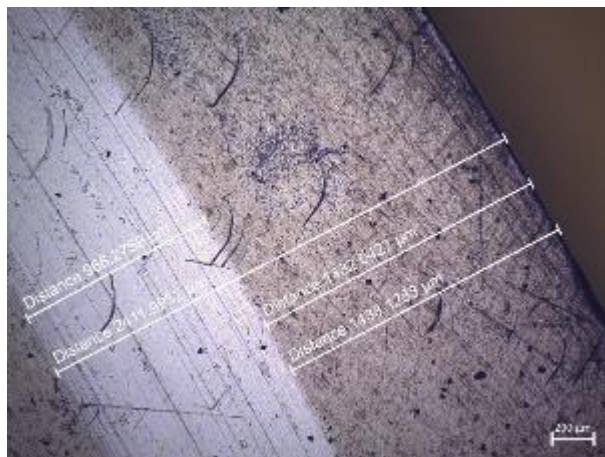


Fig. 3.10. Medición del ancho de la huella de desgaste utilizando un microscopio óptico, marca Zeiss.

Tabla 3.6. Promedio del ancho de la huella de desgaste sobre los discos de UHMWPE.

| No. Replicas | Promedio del ancho de la huella de desgaste (mm) | Error del ancho de la huella de desgaste (mm) | L (N) |
|--------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------|
| 5 | 0.53 | 0.239 | 1 |
| | 0.77 | 0.343 | 5 |
| | 0.94 | 0.421 | 11 |



Fig. 3.11. a) Medida del espesor del disco hecha con un micrómetro, y b) peso del disco de UHMWPE realizada con una balanza analítica.

3.3. Maquinado del microtexturizado

El microtexturizado se realizó mediante maquinado en un torno de 3 ejes, utilizando micro brocas SD22 de la marca Seco, Fig. 3.12. La SD22 es una broca miniguía para taladrar profundidades de hasta el doble del diámetro en incrementos de 0.01 mm y una tolerancia de diámetro de 0 ± 0.005 mm. Las brocas no tienen recubrimiento y cuentan con un ángulo de punta de 130 grados.



Fig. 3.12. a) Broca micro SD22, marca Seco, y b) broca micro SD22 con 300 μ m de diámetro.

3.3.1. Inspección del texturizado superficial

Después del maquinado de las cavidades sobre la superficie del disco de UHMWPE, los discos pasaron por un proceso de eliminación de rebababas y limpieza en la tina ultrasónica. La eliminación de las rebababas de la superficie texturizada de los discos de UHMWPE se realizó utilizando las condiciones que vienen descritas en la Tabla. 3.7, obteniendo un acabado como el que se muestra en la Fig. 3.13d).

Tabla 3.7 Condiciones experimentales para eliminar las rebababas de la superficie del disco texturizado de UHMWPE, empleando una esmeriladora con brazo mecánico.

| Lija (grano) | Velocidad (rpm) | Tiempo (min) |
|--------------|-----------------|--------------|
| 800 | 100 | 45 |
| 1200 | 50 | 20 a 40 |

En la Fig. 3.13a) se observan como se obtienen los discos de UHMWPE después de haber realizado el maquinado de microtexturizado, este se encuentra repleto de rebaba por lo cual es necesario pasarlo por el proceso de desbaste y pulido para eliminar las rebababas de la superficie del disco. Además, es necesario tener las cavidades limpias. En la Fig. 3.13d) se muestra cómo queda el disco de UHMPWE después de la eliminación de rebababas y limpieza en tina ultrasónica.

Las imágenes que se observan en la Fig. 3.13 se obtuvieron utilizando un microscopio óptico de la marca Zeiss, como el que se observa en la Fig. 3.14a), este equipo también se utilizó para realizar la inspección del maquinado, es decir, verificar la profundidad, separación y diámetro de las cavidades.

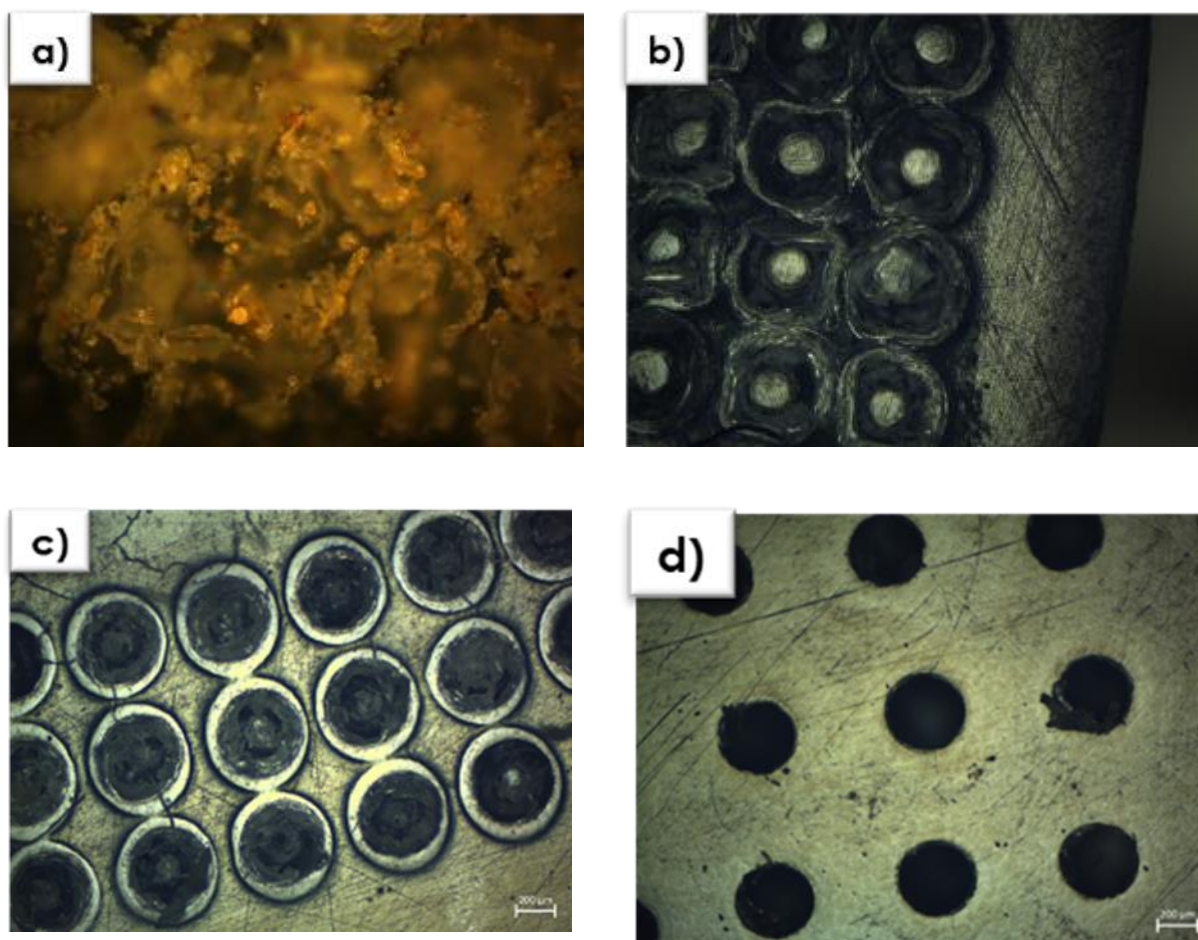


Fig. 3.13. Disco de UHMWPE observado después del proceso de a) maquinado de las cavidades, b) desbaste, c) desbaste/pulido, y d) pulido.

En la Tabla 3.7 se encuentra descrito a detalle la configuración del texturizado superficial que se maquinó sobre los discos de UHMWPE, en esta tabla se puede apreciar que se midieron diámetros, separación angular y separación entre cavidades. Las imágenes de microscopía se obtuvieron empleando un microscopio óptico como el que se observa en la Fig. 3.14a). Las imágenes de la superficie texturizada del UHMWPE se muestran en las Fig. 3.14b) y c). En la Fig. 3.14b) se observa que se evaluaron los diámetros de las cavidades y en la Fig. 3.14c) se encuentran la distancia entre cavidades para confirmar si el maquinado se realizó de acuerdo con el diseño,

es decir, se realizó una inspección a detalle del texturizado superficial realizado sobre los discos de UHMWPE.

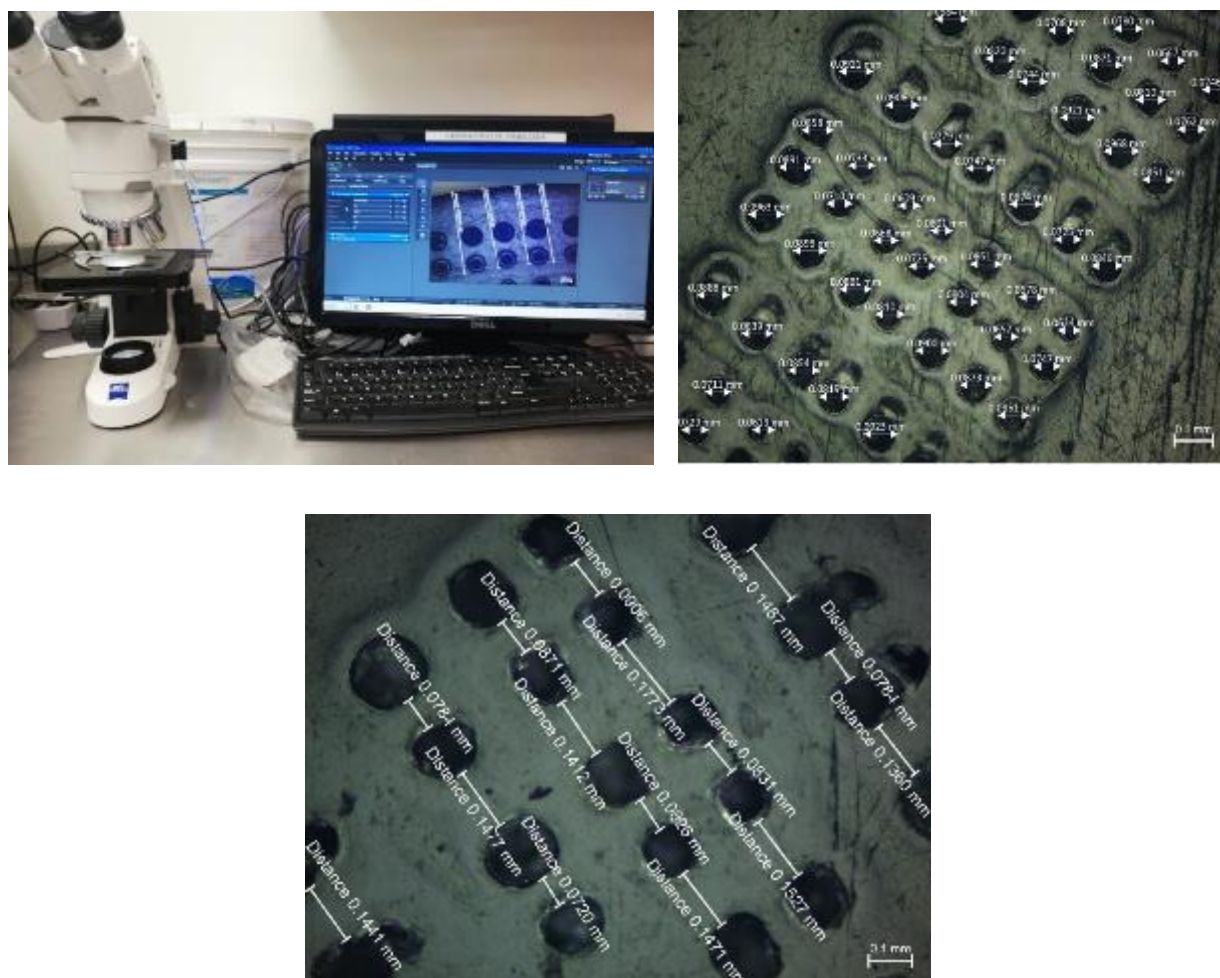


Fig. 3.14. a) Microscopio óptico, zeiss, b) y c) son imágenes del texturizado de un disco de UHMWPE obtenidas por microscopía óptica.

Tabla 3.8. Configuración del texturizado superficial.

| No. Disco | L (N) | Diámetro (µm) | Error. Diámetro | Profundidad | Densidad de texturizado (%) | Separación entre orilla de círculo a círculo (µm) | Separación radial (µm) | Espesor (mm) |
|-----------|--------------|---------------|-----------------|-------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|------------------------|--------------|
| DB68 | 10 N | 63.93 | 2.2 | 85.6 | 45 | 58.87 | 122.8 | 4.07 |
| C26 | (carga alta) | 64.87 | 1.88 | 50.4 | 45 | 59.91 | 124.78 | |
| DB95 | | 60.79 | 1.41 | 60 | 45 | 58.01 | 118.8 | 4.0416 |
| DB108 | 6 N | 66.51 | 3.96 | 45.6 | 25 | 109.23 | 175.74 | 4.1508 |
| C32 | carga media | 69.33 | 1.81 | 56.4 | | | | 4.035 |
| DB111 | | 68.48 | 1.16 | 29.8 | | | | |
| C24 | 2 N | 79.91 | 1.2215 | 50.2 | 25 | 121.8 | 201.71 | 4.22 |
| DB117 | carga baja | 63.93 | 2.2 | 108 | 25 | 134.3 | 198.23 | 4.14 |
| DB99 | | 65.76 | 3.54 | 91.81 | 45 | 65.27 | 131.03 | |

3.4. Técnicas de análisis de las proteínas

En la Fig. 3.15. se observa el equipo donde se llevaron a cabo los experimentos para el análisis de las proteínas empleando la técnica de espectrofotometría UV-visible. Después de que se realizaron los experimentos tribológicos, se recolectó el fluido del suero bovino, el cual se congeló a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ para poder realizar las mediciones por la técnica de espectrofotometría. El volumen requerido fue de 1 ml.



Fig. 3.15. Equipo espectrofotómetro de UV-Vis genesys 10S, Thermo Scientific.

3.5. Tribómetro de bola en disco

El tribómetro de bola en disco es el equipo donde se realizaron los experimentos del coeficiente de fricción se muestra en la Fig. 3.16. Este equipo también se conoce como mini máquina de tracción MTM2, marca PCS Instruments. El tribómetro de bola en disco es un instrumento que sirve para evaluar el comportamiento de la fricción en contactos lubricados, bajo un rango de condiciones de rodamiento, deslizamiento y relación de rodamiento-deslizamiento. El equipo cuenta con una bola de acero inoxidable 316L de 19.05 mm diámetro, y un disco de UHMWPE de 46 mm de diámetro, se pueden utilizar otros materiales siempre y cuando tengan las dimensiones requeridas. El principio de funcionamiento del tribómetro de bola en disco nos permite accionarlos de forma independiente la bola y el disco, con la finalidad de crear condiciones de rodamiento puro (SRR = 0), rodamiento sin deslizamiento, deslizamiento puro (SRR = 2), superdeslizamiento o ultra-deslizamiento (SRR > 2). En la Fig. 3.16 se muestra el esquema del tribómetro de bola en disco, los parámetros que podemos controlar son: la temperatura, la velocidad media (V_m), la relación de rodamiento deslizamiento (SRR), y la carga (L). Los resultados que obtenemos de las pruebas realizadas en este equipo son curvas tipo Stribeck, en donde se representan los valores del coeficiente de fricción para cada combinación de L, SRR y V_m programados. A continuación, se expresa la ecuación como se calcula el SRR:

$$SRR = \left| \frac{V_r}{V_m} \right| \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$$V_m = \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right)$$

$$V_r = V_1 - V_2$$

- V_1 es la velocidad del disco
- V_2 es la velocidad de la bola

Nota:

- ❖ SRR = 0 (rodamiento puro)
- ❖ SRR < 2 (rodamiento/deslizamiento)
- ❖ SRR = 2 (deslizamiento puro)
- ❖ SRR > 2 (superdeslizamiento)

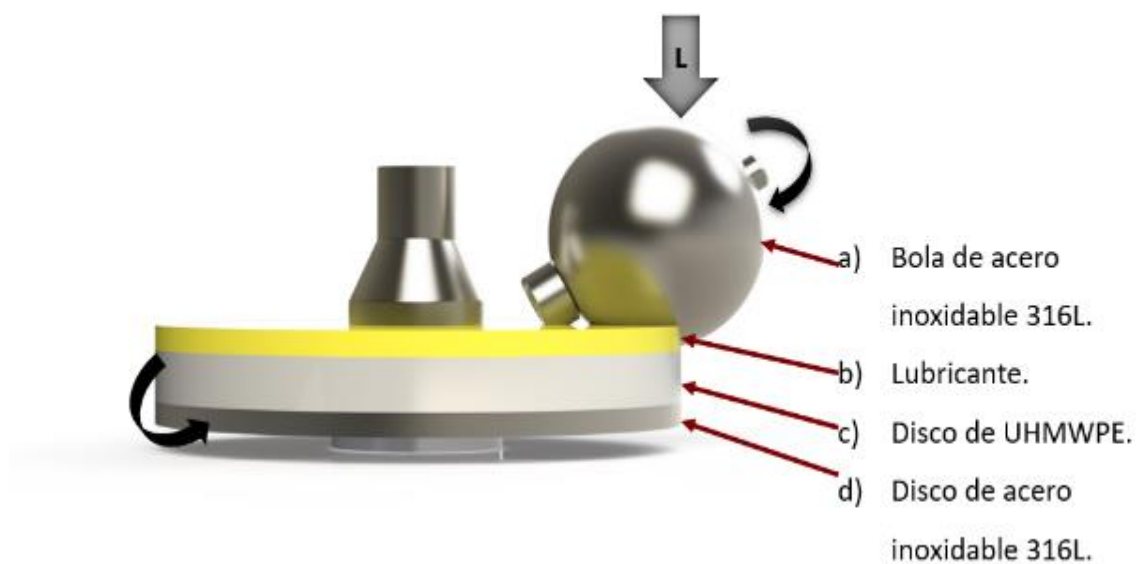


Fig. 3.16. Representación esquemática del tribómetro de bola en disco, mini traction machine (MTM2), PCS Instruments.

4. Resultados y análisis

En este capítulo se describen los resultados del análisis de falla de los materiales: disco de UHMWPE y bola de acero inoxidable 316L, estos resultados se obtuvieron mediante el software de análisis de elemento finito versión estudiantil. Se evaluaron la presión de contacto y el esfuerzo cortante máximo de von Mises para las diferentes condiciones de microtexturizado que se describieron en el capítulo III. La presión de contacto es la presión que ejerce la bola de acero inoxidable sobre el disco de UHMWPE.

Se utiliza la teoría de falla del máximo esfuerzo de von Mises, porque el UHMWPE en las pruebas experimentales del COF está sometido a una carga constante, además al ser un material suave después de cierto tiempo puede llegar a fallar por fatiga. Además, las simulaciones se realizaron con el fin comprobar que el cálculo de la presión de contacto circular por la teoría de Hertz es correcto.

4.1. Simulación de una superficie texturizada

Pre-simulaciones

Antes de realizar la simulación de las diferentes configuraciones experimentales del texturizado propuestas para este proyecto, se realizó el diseño de una configuración propuesta en un proyecto de doctorado [101], con la finalidad de entender como realizaron las simulaciones y tener un punto de comparación previo del texturizado. En dicho trabajo se propusieron las condiciones de mallado, refinamiento de malla, condiciones de frontera (contacto), y utilizo propiedades mecánicas de los materiales (coeficiente de Poisson, módulo de Young), propuso las sujeciones; el arreglo de las cavidades del texturizado fue el siguiente:

- Cavidades con forma circular.
- Diámetro 1/64 in (0.3968 mm).
- Arreglo cuadrado (4 cavidades).
- Separación igual a la mitad del diámetro.
- Profundidad igual al tamaño del diámetro.

En la Fig. 4.1a) se observa una parte del disco de UHMWPE, en la cual se encuentran 4 cavidades con arreglo cuadrado, la carga que ejerce la bola de acero inoxidable sobre el disco queda en medio de las cavidades, estas condiciones se utilizaron para poder realizar la simulación del esfuerzo cortante máximo de von Mises. El resultado obtenido en ANSYS fue de 14.79 MPa,

Fig. 4.1c) y en la referencia [101] se obtuvo 14.56 MPa, Fig. 4.1b), es posible que la diferencia se deba a que se utilizaron dos versiones de software diferentes de ANSYS, en el presente trabajo se utilizó la versión estudiantil, y en [101] se utilizó la versión profesional, esto es una limitante al momento de refinar el mallado para la simulación.

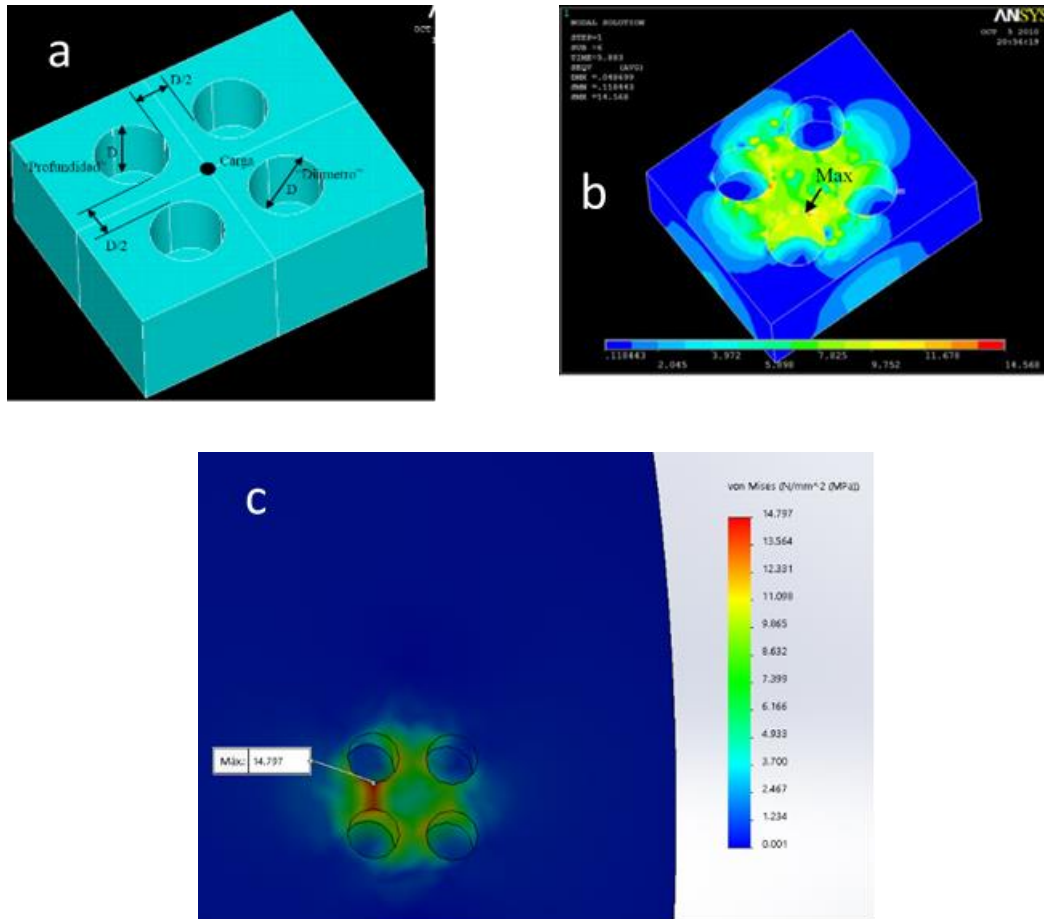


Fig. 4.1. a) arreglo en 3D de las cavidades separadas por la mitad de su diámetro, b) resultados del esfuerzo cortante máximo de von Mises obtenido mediante ANSYS reportado por López [101], y c) esfuerzo von Mises obtenido mediante ANSYS.

4.1.1. Simulaciones de presión de contacto para una superficie lisa

Antes de realizar el maquinado de las cavidades sobre los discos de UHMWPE, se realizó una exploración de diferentes parámetros del texturizado, estos parámetros son: profundidad, separación angular y diámetros, con la finalidad de escoger las áreas texturizadas que no ocasionen a la larga una falla por fatiga. Este análisis de los materiales se realizó utilizando la teoría del máximo esfuerzo cortante de von Mises mediante ANSYS versión de estudiante. La

versión del software para estudiante tiene un número limitado de nodos para realizar el mallado, por lo cual, se simplificaron las geometrías del par tribológico; esta metodología de cómo se simplificaron las geometrías de los materiales se presenta en la sección 3.

Las simulaciones se realizaron para conocer cuál es la presión de contacto y esfuerzo cortante máximo al utilizar un disco liso de UHMWPE y una bola de acero inoxidable 316L, estas simulaciones se hicieron empleando la teoría de Hertz para contacto circular, Fig. 4.2.

La presión de contacto que corresponde a la carga de 1 N calculada mediante la teoría de Hertz es de 13.28 MPa, y para 11 N es de 29.53 MPa, debemos recordar que en esta teoría el disco se considera como un plano, es decir, no se considera el espesor del disco de UHMWPE. Estos cálculos se realizaron con la finalidad de comparar la solución teórica de la presión de contacto contra lo obtenido en ANSYS.

Los resultados de la presión de contacto empleando el software ANSYS para una superficie lisa al aplicar la carga de 1 N es de 15.17 MPa y para la carga de 11 N es de 37.20 MPa, esta diferencia de resultados con respecto a los cálculos teóricos se debe a la simplificación de las geometrías y a que la teoría no considera el espesor de los materiales. En la Fig. 4.2a), se observa el resultado de la presión de contacto para la carga de 1 N, y la Fig. 4.2b) el resultado es para la carga de 11 N.

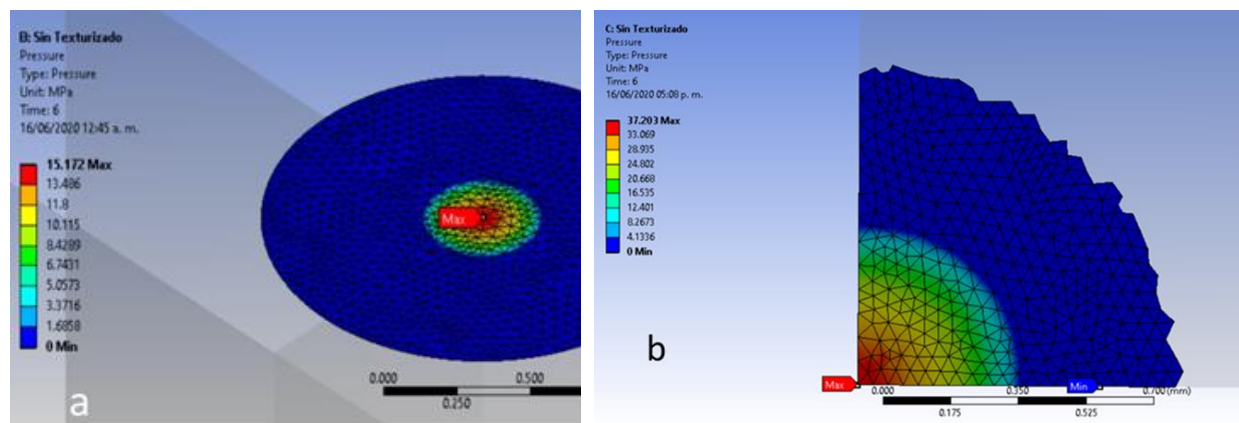


Fig. 4.2. Análisis de la presión de contacto utilizando ANSYS, a) para la carga de 1 N, y b) para 11 N.

En la Fig. 4.3a) se muestra el resultado del esfuerzo cortante máximo de von Mises de 7.06 MPa para la carga de 1 N, y la Fig. 4.3b) es de 23.26 MPa para una carga de 11 N.

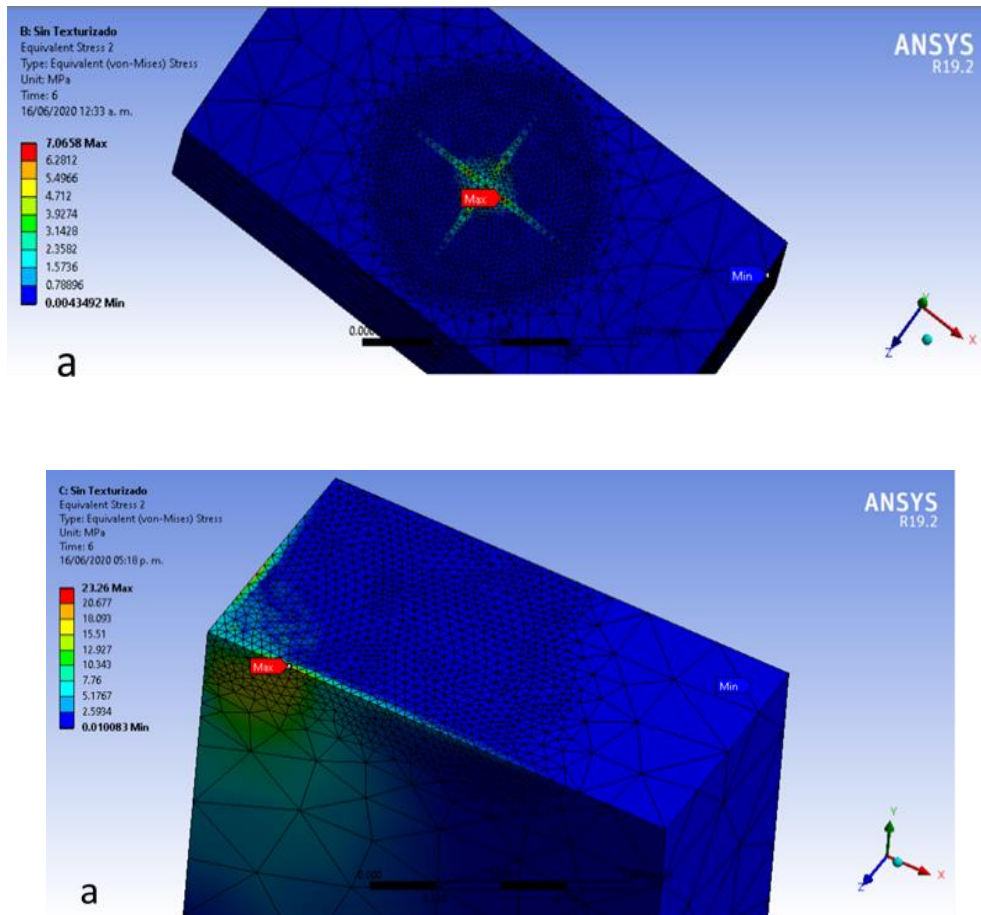


Fig. 4.3. Esfuerzo cortante máximo de von Mises para la superficie lisa de UHMWPE en contacto con una bola de acero inoxidable 316L a) para la carga de 1 N, y b) para 11 N.

A continuación, se presentan los pasos para poder realizar el análisis de elemento finito.

- Teoría de Hertz para contacto circular.
- Definir el material o crear el material.
- Definir las condiciones de contacto entre los componentes, aquí se puede especificar un coeficiente de rozamiento. Además, se definen las condiciones de contacto entre las caras de componentes diferentes en un ensamble, las cuales pueden ser permitir penetración y sin penetración.
- Sujeciones estas sirven para definir las restricciones en las caras de los cuerpos sólidos que se están evaluando, puesto que es necesario fijar por lo menos una cara de las piezas para evitar errores en los análisis debidos al movimiento rígido del sólido.
- Fuerzas actuantes (carga, presión, torsión, gravedad).

- Malla (control del mallado), aquí se debe seleccionar el tipo de malla con la finalidad de obtener un resultado óptimo, esto es, que se puede utilizar una malla incompatible porque a veces se necesita un refinamiento de malla entre el contacto de los sólidos, por lo tanto, no hay una correspondencia de nodo a nodo entre la malla de cada entidad en contacto. Cuando se utiliza una malla compatible es que no es necesario tener un refinamiento de la malla, por cuestiones de la capacidad de nodos que permite el software lo mejor es optimizar el área del mallado.
- Resultados (von Mises, deformaciones unitarias).

4.1.2. Evaluación del diseño del texturizado utilizando software CAD

En las Tablas 4.1 a 4.4 se resumen los resultados del esfuerzo cortante de von Mises para el par tribológico (disco texturizado de UHMWPE y bola de acero inoxidable) con y sin lubricante para las cargas de 1 y 11 N, las cavidades tienen un diámetro de 50 μm .

Tabla 4.1. Esfuerzo cortante máximo de von Mises lubricado con agua para una carga de 1 N.

| Profundidad (μm) | Esfuerzo cortante (MPa) para la densidad del 20% | Esfuerzo cortante (MPa) para la densidad del 30% | Esfuerzo cortante (MPa) para la densidad del 40% |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 15 | 0.89 | 1.36 | 0.78 |
| 50 | 1.14 | 1.33 | 0.83 |
| 800 | 0.79 | 0.93 | 0.94 |

Tabla 4.2. Esfuerzo cortante máximo de von Mises en contacto seco al aplicar una carga de 1 N.

| Profundidad (μm) | Esfuerzo cortante (MPa) para la densidad del 20% | Esfuerzo cortante (MPa) para la densidad del 30% | Esfuerzo cortante (MPa) para la densidad del 40% |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 15 | 0.89 | 1.36 | 0.77 |
| 50 | 1.14 | 1.33 | 0.81 |
| 800 | 0.79 | 0.93 | 0.94 |

Tabla 4.3. Esfuerzo cortante máximo de von Mises en contacto lubricado (cavidades llenas con un material incompresible) al aplicar una carga de 11 N.

| Profundidad (μm) | Esfuerzo cortante (MPa) para la densidad del 30% | Esfuerzo cortante (MPa) para la Densidad del 40% |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 15 | 9 | 26.94 |
| 50 | 9.7 | 23.91 |

Tabla 4.4. Esfuerzo cortante máximo de von Mises en contacto seco al aplicar una carga de 11 N.

| Profundidad (μm) | Esfuerzo cortante (MPa) para la densidad del 30% | Esfuerzo cortante (MPa) para la densidad del 40% |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 15 | 9.03 | 26.94 |
| 50 | 9.68 | 24.18 |

Con la finalidad de conocer si los diferentes arreglos de cavidades en la superficie del disco de UHMWPE al estar sometidos a una carga constata no presentan deformación plástica, se realizaron las simulaciones de la presión de contacto entre la bola de acero inoxidable y el disco texturizado de UHMWPE mediante ANSYS, estos resultados se muestran en las gráficas de superficie de la Fig. 4.4.

En la Fig. 4.4a) se percibe que la presión de contacto incrementa conforme se incrementa el diámetro y la densidad de área texturizada. El estudio del contacto mediante el análisis de elemento finito permite conocer como las cavidades pueden originar otros fenómenos como altos valores de fricción, deformación plástica, fatiga y fractura del polietileno dependiendo de los mecanismos de desgaste.

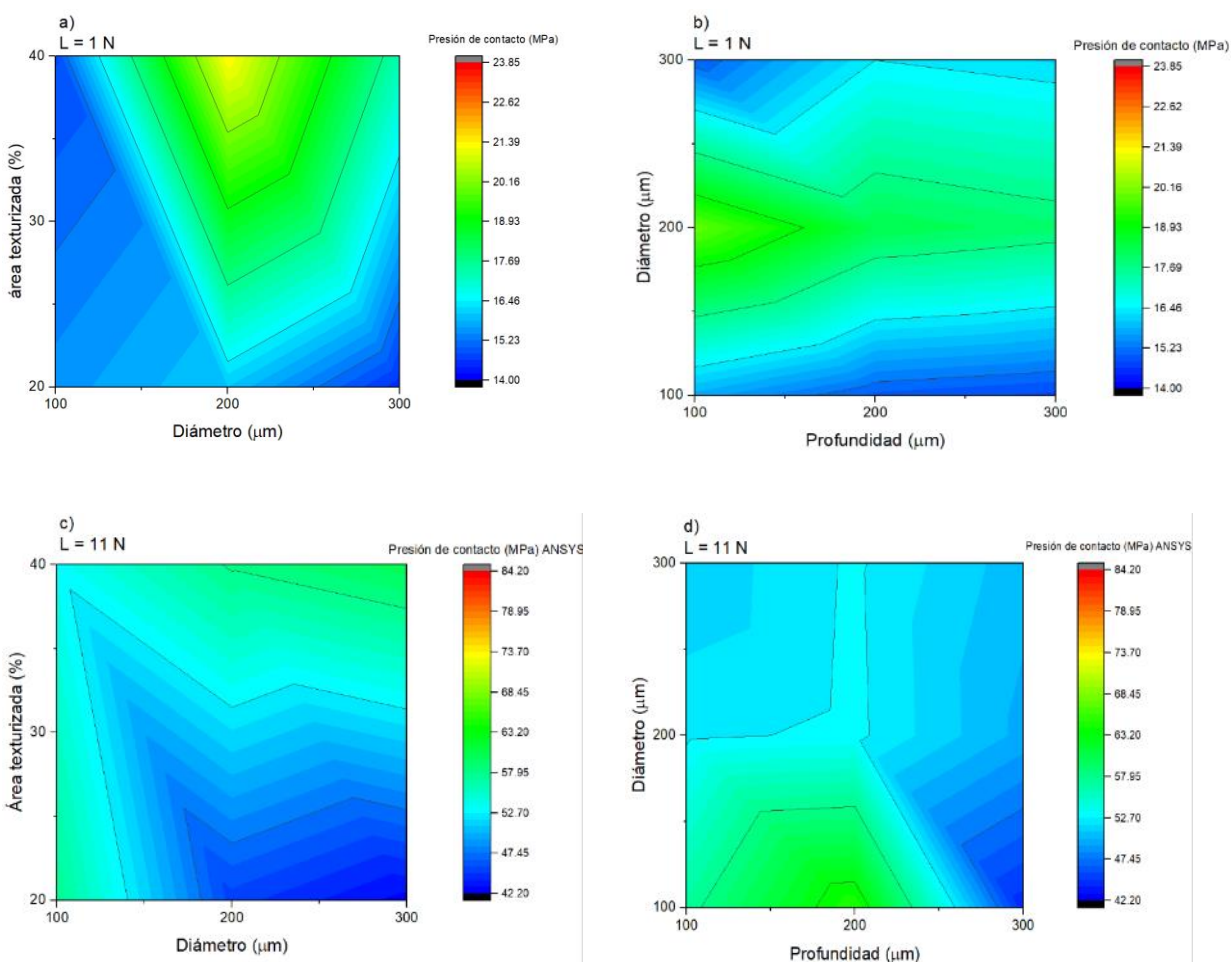


Fig. 4.4. a) y b) Gráficas de superficie del comportamiento de la presión de contacto en relación con la profundidad, densidad de área texturizada y diámetro al aplicar una carga de 1 N, c) y d) comportamiento de la presión de contacto en función del diámetro, densidad de área texturizada y diámetro para la carga de 11 N.

En la Fig. 4.5. se observan los resultados de la presión de contacto sobre una superficie texturizada de UHMWPE al aplicar la carga de 1 N, la Fig. 4.5a) la superficie de UHMWPE tiene una densidad de texturizado del 20 % con diámetros y profundidades de 100 μm , y la Fig. 4.5b) es para una densidad de texturizado del 40% con diámetros de 300 μm , claramente la menor área

de contacto se presenta cuando se tiene solamente una cavidad dentro del área de contacto Fig. 4.5b).

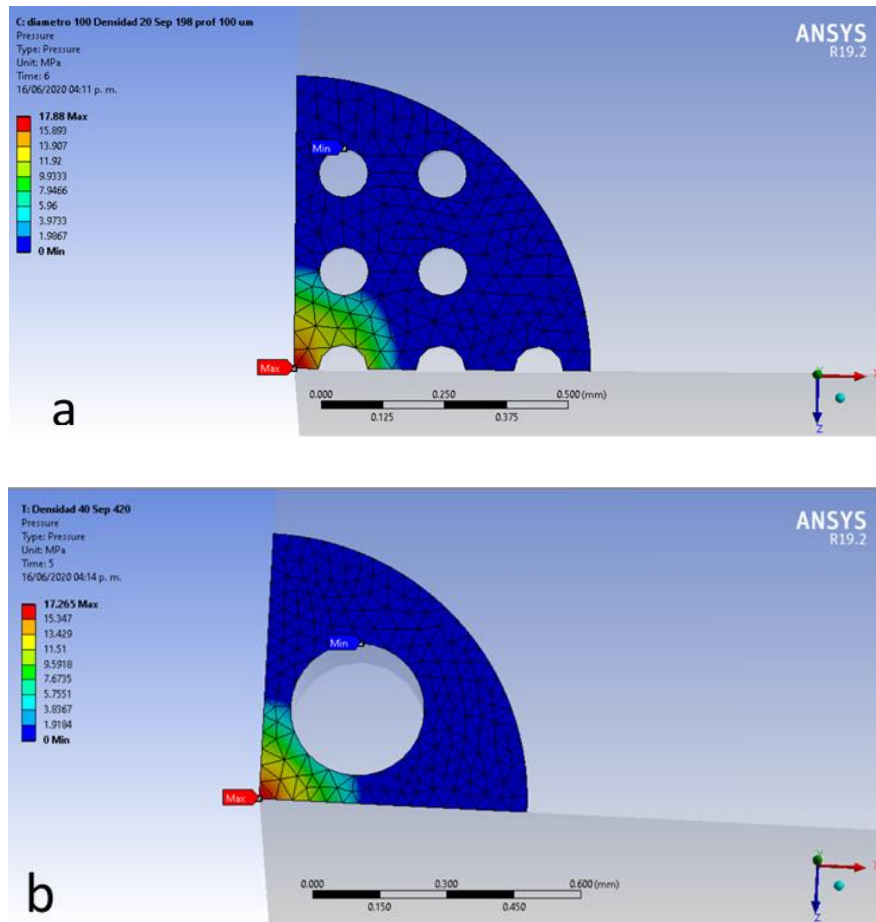


Fig. 4.5. Simulación de la presión de contacto sobre una superficie texturizada utilizando ANSYS (estudiante) al aplicar la carga de 1 N para la densidad del, a) 20 %, y b) 40 %.

En la Fig. 4.6. se observan los resultados de la simulación de la presión de contacto sobre una superficie texturizada utilizando ANSYS (versión de estudiante) al aplicar una carga de 11 N para la densidad del 40 % de texturizado de la superficie de UHMWPE, Fig. 4.6a) se observan que las cavidades tienen una geometría circular con diámetros y profundidad de 200 µm y en la Fig.4.6b) el texturizado tiene diámetros de 200 µm profundidad de 300 µm. En la Fig. 4.6b) podemos observar que al utilizar una profundidad mayor en comparación con el tamaño de la cavidad la presión disminuye.

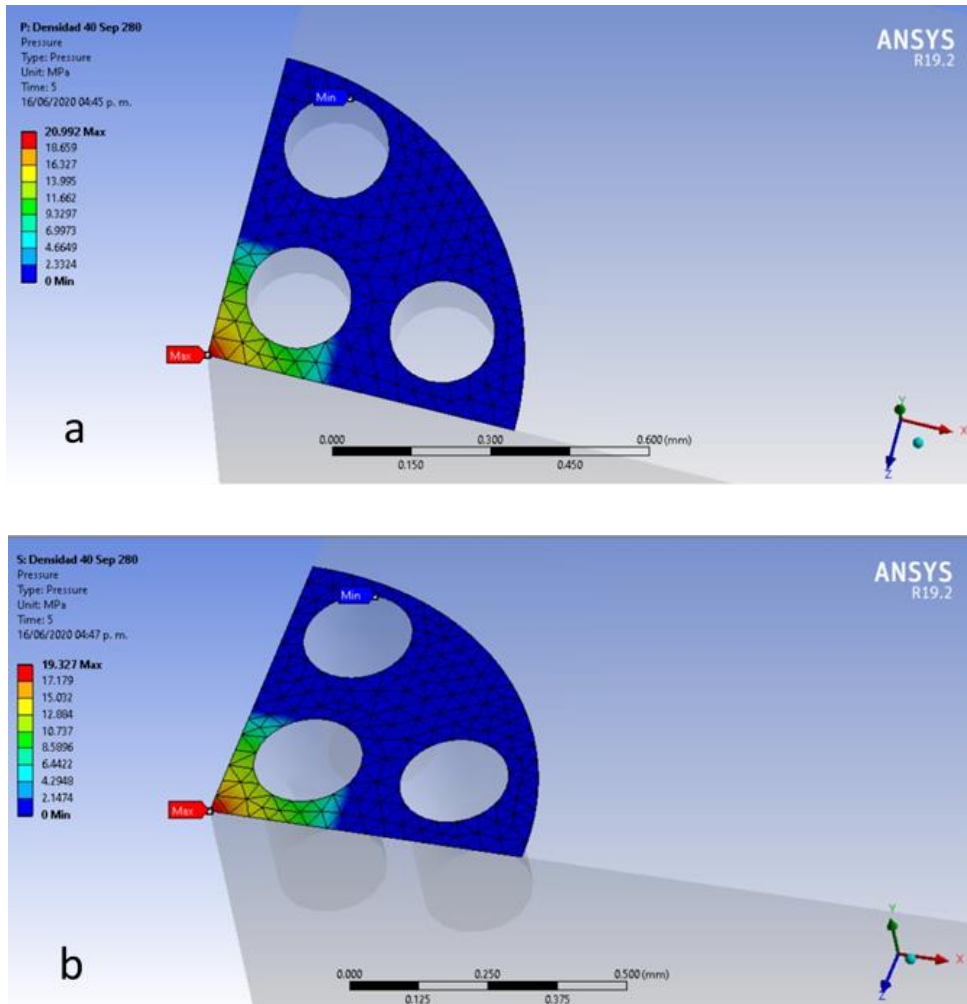


Fig. 4.6. Simulación de la presión de contacto sobre una superficie texturizada utilizando ANSYS (estudiante), para la carga de 11 N para las cavidades con, a) diámetro y profundidad de 200 μm , y b) diámetro de 200 μm y profundidad de 300 μm .

4.1.3. Esfuerzo cortante máximo aplicado sobre un disco texturizado

Concretizando las simulaciones se realizaron con la finalidad de poder conocer cuantas cavidades se pueden colocar sobre la superficie del UHMWPE sin que el material falle por fatiga, puesto que las cavidades actúan como concentradores de esfuerzos. Por lo tanto, aquí se presentan los resultados de la simulación del esfuerzo cortante máximo de von Mises para superficies texturizadas, para ello se analizaron los siguientes arreglos de cavidades en la superficie del disco de UHMWPE:

- Las cavidades tienen geometría circular con diámetros de 100, 200 y 300 μm .
- Se probaron 3 profundidades: 100, 200 y 300 μm .
- Se analizaron tres densidades de área texturizada 10, 20 y 40%

El ancho de la huella es de 1.91 mm

En las Fig. 4.7 y 4.8 se presentan los resultados del esfuerzo máximo de von Mises para una superficie de UHMWPE en contacto con una bola de acero inoxidable, para fines prácticos, solo se muestra la superficie de UHMWPE después de obtener el esfuerzo máximo de von Mises en ANSYS. Los del esfuerzo de von Mises se dan por una escala de colores, que van desde el menor esfuerzo que es en color azul hasta el color rojo, este último representa el mayor esfuerzo cortante, además, se observa una probeta con la leyenda sobre las imágenes que dice (Max), esta nos indica el punto donde se encuentra el valor máximo del esfuerzo cortante.

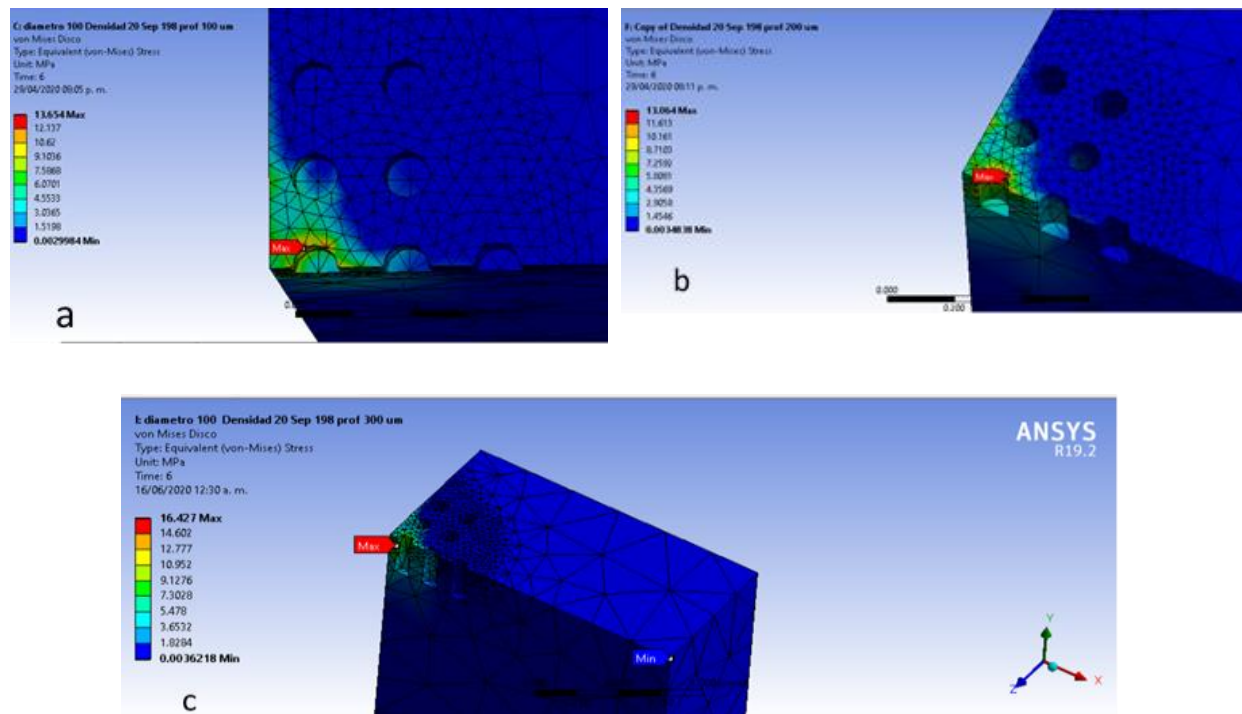


Fig. 4.7. Comportamiento del esfuerzo cortante máximo de von Mises de la densidad de texturizado del 20 % para la carga (L) de 1 N, a) profundidad de 100 μm , b) las cavidades con profundidad de 200 μm y c) con profundidad de 300 μm .

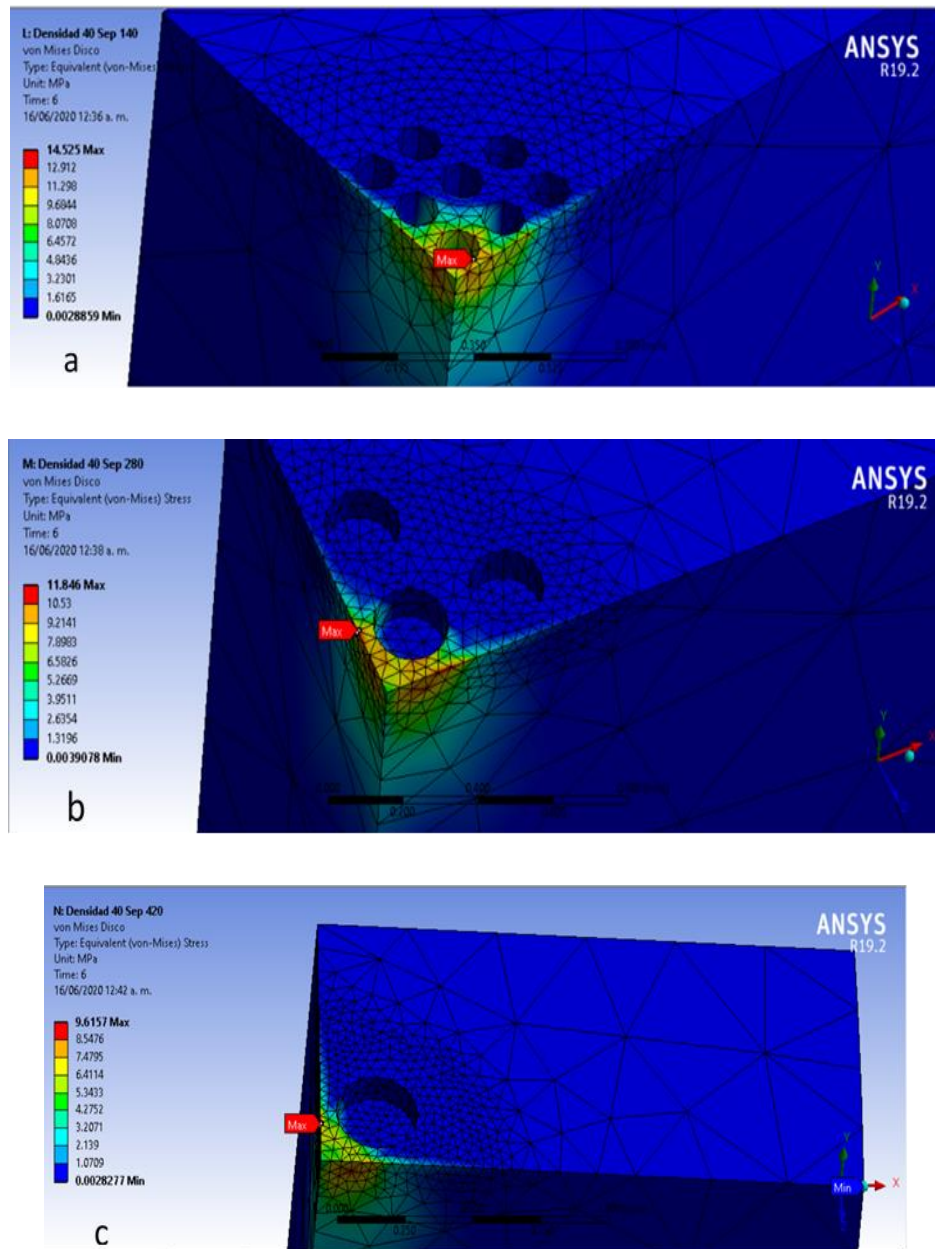


Fig. 4.8. Resultados del esfuerzo cortante máximo de von Mises para la carga de 11 N, utilizando ANSYS para las cavidades con diámetro de a) 100 μm , b) 200 μm y c) 300.

En las Figs. 4.9 y 4.10 se resumen los resultados del esfuerzo cortante máximo de von Mises mediante gráficas de contorno función de la relación de área texturizada, diámetro y profundidad cuando se aplica una carga constante de 11 N.

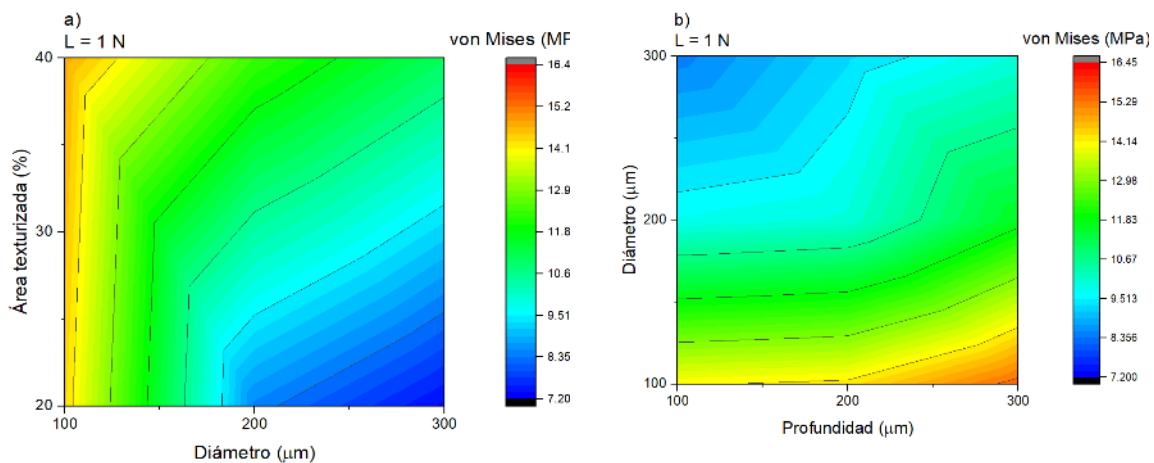


Fig. 4.9. a) Gráfica de superficie del esfuerzo cortante máximo con relación a la profundidad y densidad de área texturizada, y b) resultado del esfuerzo de von Mises en función del diámetro y densidad de área texturizada, para la carga de 1 N.

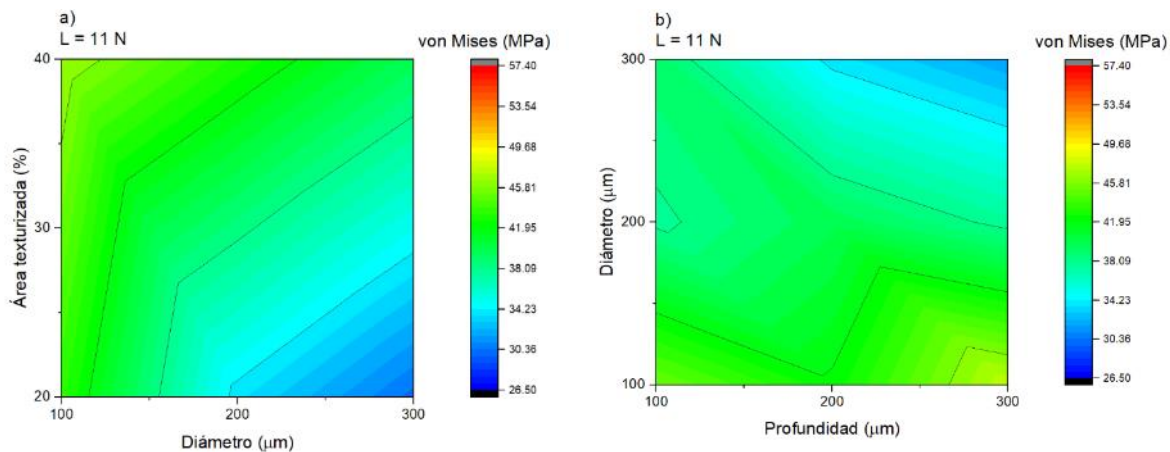


Fig. 4.10. Gráficas de superficie del comportamiento del esfuerzo cortante máximo en función de a) diámetro y densidad de área texturizada para la carga de 11 N, y b) profundidad y diámetro.

4.2. Tribómetro de bola en disco (MTM2)

4.2.1. Comportamiento tribológico de superficie lisa de UHMWPE utilizando agua

Para poder comparar el efecto de una superficie texturizada de UHMWPE lubricada con suero bovino es necesario primero conocer el coeficiente de fricción (COF) de una superficie lisa de UHMWPE lubricada con agua destilada, por lo cual, se realizaron los siguientes experimentos en el tribómetro de bola en disco (MTM2).

Se utilizaron 55 discos de UHMWPE con acabado espejo, los discos se encuentran en un rango de rugosidad de $R_a 0.025 \pm 0.016 \mu\text{m}$. Se realizaron 5 réplicas, es decir, se repitieron las condiciones experimentales 5 veces, para cada replica se utilizó un disco nuevo. En la Tabla 4.5 se muestran las condiciones experimentales para realizar las pruebas en el tribómetro de bola en disco.

Tabla 4.5. Condiciones experimentales para el par tribológico (disco liso de UHMWPE y bola de acero inoxidable 316L).

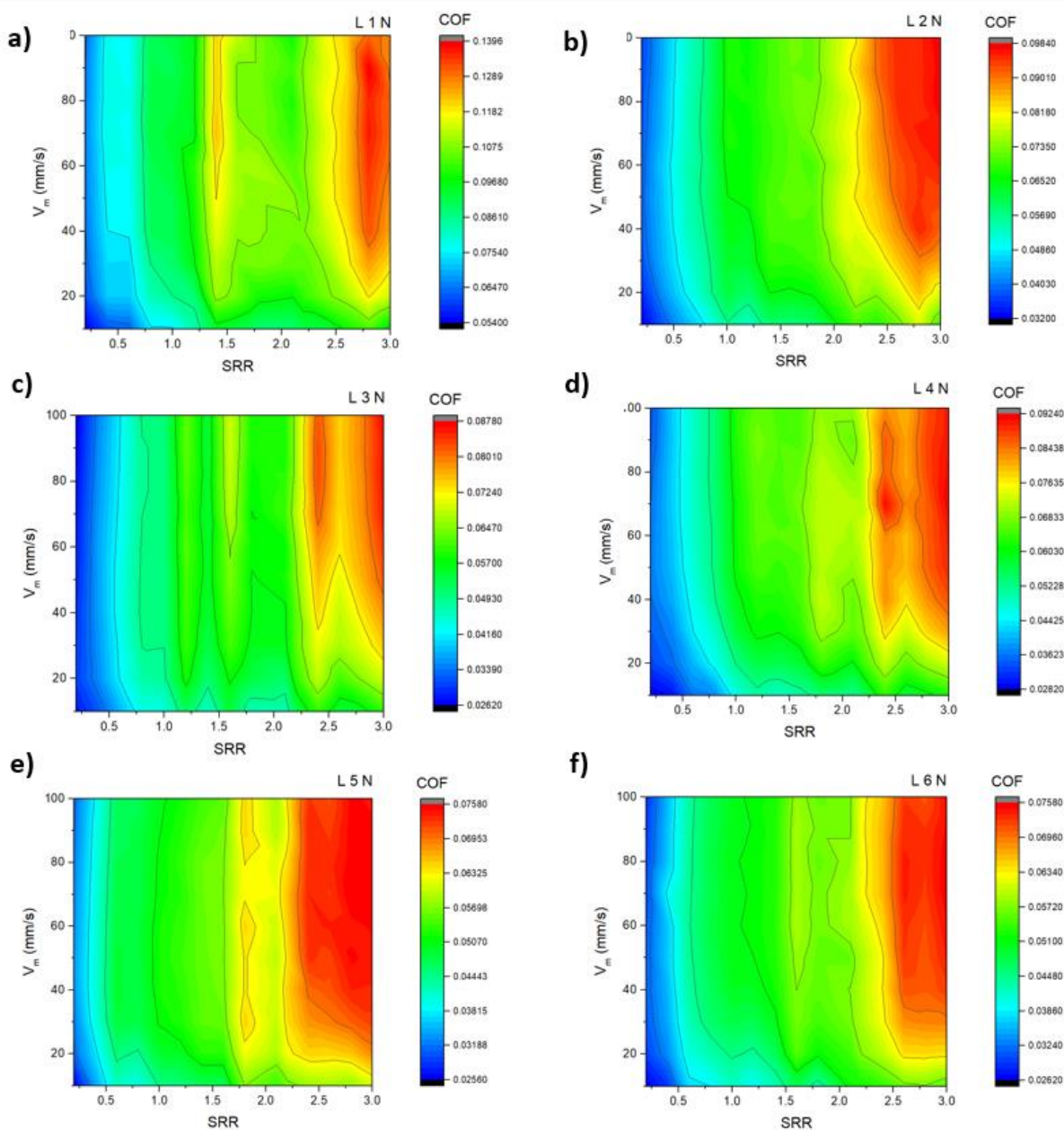
| Carga (L) N | V_m (mm/s) | SRR |
|-------------|------------------------|--------------------------|
| 1-11 | 10 a 100 | 0.20 a 3 |
| | (en incrementos de 10) | (en incrementos de 0.20) |

Las gráficas de contorno de las Fig. 4.11a) hasta la k) muestran el comportamiento del coeficiente de fricción (COF) entre las superficies de disco liso de UHMWPE y bola de acero inoxidable lubricadas con agua destilada, en cada gráfica de contorno se puede observar que el COF está en función de SRR y V_m para una carga constante. Se muestran los resultados para las condiciones experimentales descritas en la Tabla 4.5.

En la Fig. 4.11a) se observa que el valor más alto del COF es para la carga de 1 N, este valor se encuentra al tener deslizamiento puro (SRR = 2). Además, en las Fig. 4.11b) hasta la k) se muestra que para todas las cargas el pico máximo del COF ocurre al tener deslizamiento puro. Por otro lado, el valor más bajo del COF de 0.064 es para la carga de 11 N Fig. 4.11k), este comportamiento de la carga sobre el COF puede deberse a que cuando se tiene una mayor carga (11 N) se incrementa la conformidad del contacto haciendo que el COF reduzca. El análisis de estos resultados se muestra con detalle en la sección 4.2.1 mediante diferentes modelos matemáticos. Vale la pena destacar que es evidente el comportamiento del fluido Newtoniano

porque presenta una tendencia lineal con relación a los parámetros SRR y V_m , puesto que al incrementar SRR y V_m , de la misma manera se incrementara el valor del COF. Este comportamiento del COF es contrario a lo observado al lubricar con suero bovino.

En las Fig. 4.11 a) hasta la k) se observan las gráficas de contorno donde se aprecia el efecto del COF en función de la velocidad media (V_m) y la relación de rodamiento/deslizamiento (SRR) al utilizar como lubricante un fluido Newtoniano (agua destilada).



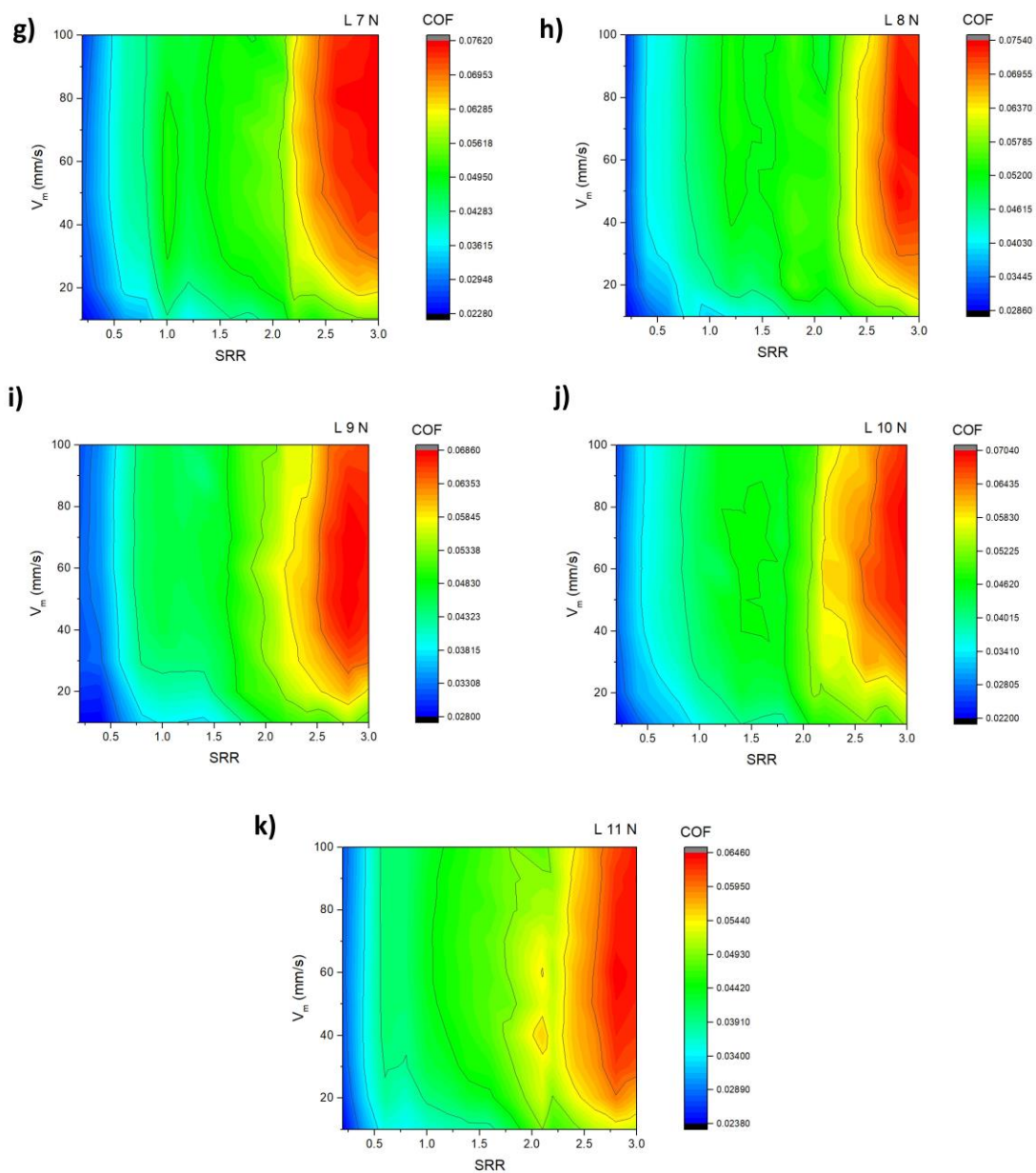


Fig. 4.11. Comportamiento del COF en superficies lisas lubricadas con agua al aplicar las cargas de a) 1 N, b) 2 N, c) 3 N hasta la carga de k) 11 N.

4.2.2. Análisis del Comportamiento tribológico de superficie lisa de UHMWPE utilizando agua

Existen modelos para predecir el espesor de la película elastohidrodinámica (EHL) para contactos no conformes como el que se observa en la Ec. 4.0, donde se evalúa el espesor de la película EHL en términos adimensionales considerando las velocidades, cargas, radio efectivo, propiedades mecánicas de ambos materiales como: módulos elásticos y coeficientes; sin embargo, lo complejo de aplicar estos modelos es el conocer cuál es el valor de la viscosidad del fluido Newtoniano, estas ecuaciones se resuelven asumiendo que el fluido es Newtoniano por lo tanto la viscosidad es constante [102]. También, existen diversos modelos desde otra aproximación para entender el problema de lubricación “soft-EHL” o isoviscoso-EHL para contactos no conformes enfocados en entender el comportamiento de la formación de la película y las propiedades de fricción de fluidos complejos en contactos suaves, estos modelos se encuentran descritos en las Ec. 4.1 y 4.2. La Ec. 4.1 se utiliza para calcular el coeficiente de fricción de Couette considerando la velocidad cortante del fluido (SRR) para dos diferentes regiones de contacto que son: la zona central de Hertz y la periferia, cada una tiene diferentes condiciones de cargas y velocidades [103]. Por ello, se proponen dos modelos de regresión que muestran en las Ec. 4.3 y 4.4 para entender la lubricación “soft-EHL” al utilizar el par tribológico (superficie lisa de UHMWPE y bola de acero inoxidable 316L) bajo diferentes factores implicados (velocidades, cargas y SRR), con la finalidad de cuantificar su efecto en el COF y en la lubricación al utilizar como lubricante un fluido Newtoniano (agua destilada). Todos los modelos matemáticos se encuentran en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Modelos matemáticos.

$$H = 3.68 U_e^{0.68} G^{0.49} W_e^{-0.073} \quad \text{Ec. 4.0} \quad [102]$$

$$\mu_{\text{Couette}} = \text{SRR} \left(3.8 \bar{U}^{0.71} \bar{W}^{-0.76} + 0.96 \bar{U}^{0.36} \bar{W}^{-0.11} \right) \quad \text{Ec. 4.1} \quad [103]$$

$$\mu_{\text{Poiseuille}} = 1.46 U^{0.65} W^{-0.70} \quad \text{Ec. 4.2} \quad [103]$$

$$\text{COF} = \text{CSRR}^{b2} |V_m|^{b3} \quad \text{Ec. 4.3}$$

Nota: el parámetro fijo es L (carga)

$$COF = CL^{b1}|V_m|^{b3} \quad \text{Ec. 4.4}$$

Nota: se mantiene fijo el SRR (relación de rodamiento/deslizamiento).

En la Fig. 4.12 se observan 4 tipos de gráficas de superficie de respuesta, las cuales corresponden a diferentes modelos matemáticos, la gráfica de la Fig. 4.12a) corresponde a los resultados experimentales del COF obtenidos del tribómetro de bola en disco para el par tribológico antes mencionado. La Fig. 4.12b) es el resultado del modelo del COF de Couette, la cual tiene una predicción de los resultados experimentales bastante lejana, esto es similar a lo que ocurre en la Fig. 4.12c); no obstante, la Fig.4.12d) muestra como se ve un modelo ajustado correctamente a los resultados de los datos experimentales, más adelante se detalla cómo se ajustó este modelo de potencias. Todos estos modelos ajustados se realizaron al mantener constante la carga de 1 N y variar los valores de SRR. Por otro lado, en la Fig. 4.13 se observan los resultados de los modelos al mantener constante la carga de 9 N para el amplio rango de V_m (10 a 100 mm/s) y SRR (0.2 a 3).

La Tabla 4.7 nos muestra el resultado del ANOVA, esta nos indica que el orden de importancia de los parámetros sobre el comportamiento del COF es: el SRR con un efecto directo en el incremento del COF y el segundo parámetro es la V_m , la cual tiene un efecto directo en el incremento del COF; sin embargo, aunque los modelos de potencias (Ec. 4.3) presentan un ajuste razonable al comportamiento de los resultados experimentales tal como se observa en la Tabla 4.7, no se utilizó el modelo descrito como el de la Ec. 4.3 puesto que el dejar el modelo en función de SRR y V_m manteniendo constante la carga no es lo ideal, puesto que la V_m es dependiente del SRR, con la finalidad de separar dicho comportamiento se optó por ajustar modelos como el que se muestra en la Ec. 4.4, los cuales se encuentran descritos más adelante.

Tabla 4.7. Resumen de los coeficientes del modelo de regresión para cada valor de carga en la Ec. 4.3.

| $COF = CSRR^{b_2} V_m ^{b_3}$ | | | | | |
|-------------------------------|--------|-------|-------|---------------|------------------|
| Carga (N) | b_0 | b_2 | b_3 | R- Squared | Adj-R Squared |
| 1 | 0.0673 | 0.245 | 0.081 | 0.893 | 0.892 |
| 2 | 0.054 | 0.196 | 0.043 | 0.968 | 0.968 |
| 3 | 0.036 | 0.351 | 0.083 | 0.916 | 0.915 |
| 6 | 0.0347 | 0.307 | 0.086 | 0.951 | 0.951 |
| 7 | 0.0316 | 0.351 | 0.095 | 0.932 | 0.932 |
| 9 | 0.034 | 0.279 | 0.071 | 0.909 | 0.907 |
| 11 | 0.0342 | 0.282 | 0.057 | 0.944 | 0.944 |

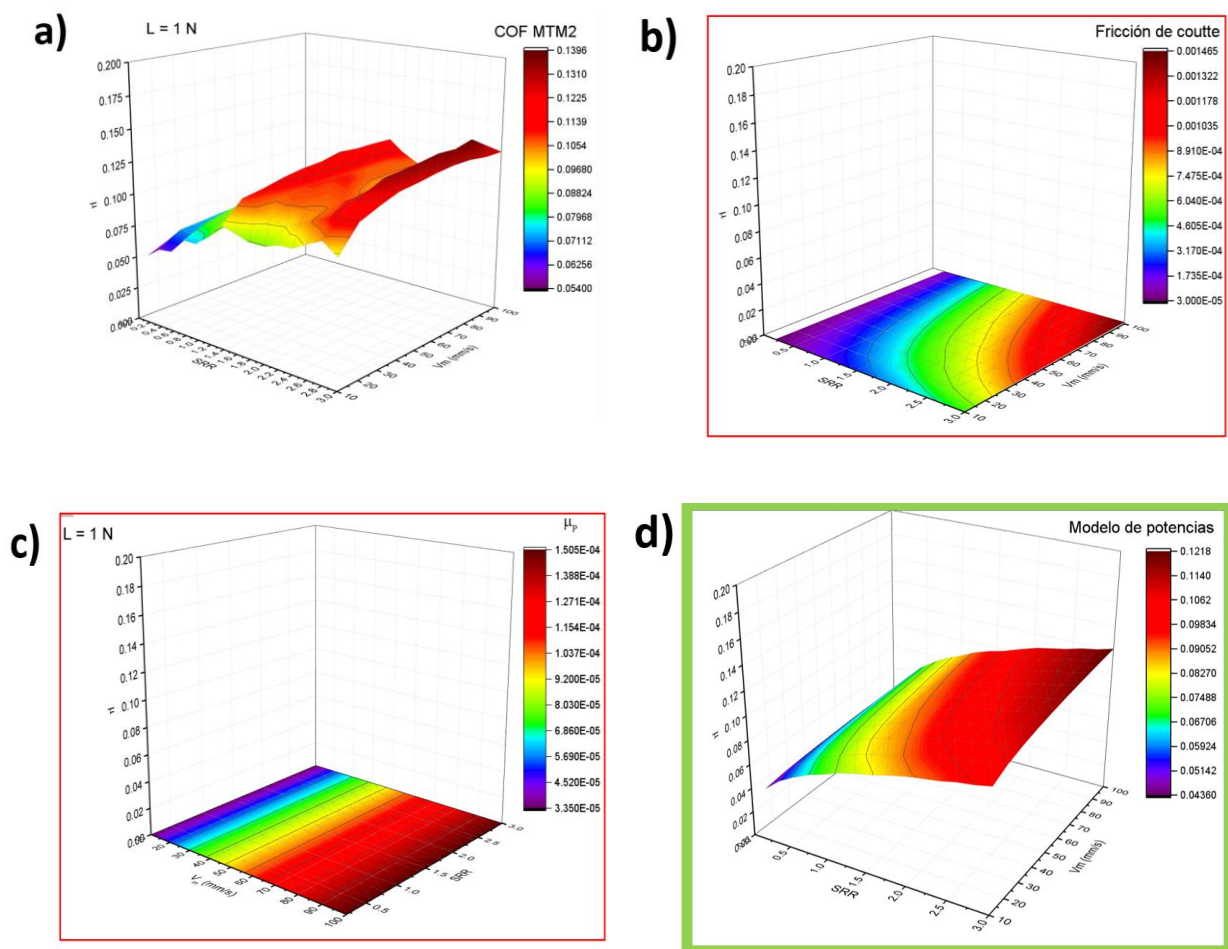


Fig. 4.12. Ajuste de modelos matemáticos para la carga de 1 N, a) datos crudos del COF obtenidos del tribómetro de bola en disco, b) modelo de Couette, c) modelo de potencias y d) modelo de poiseuille.

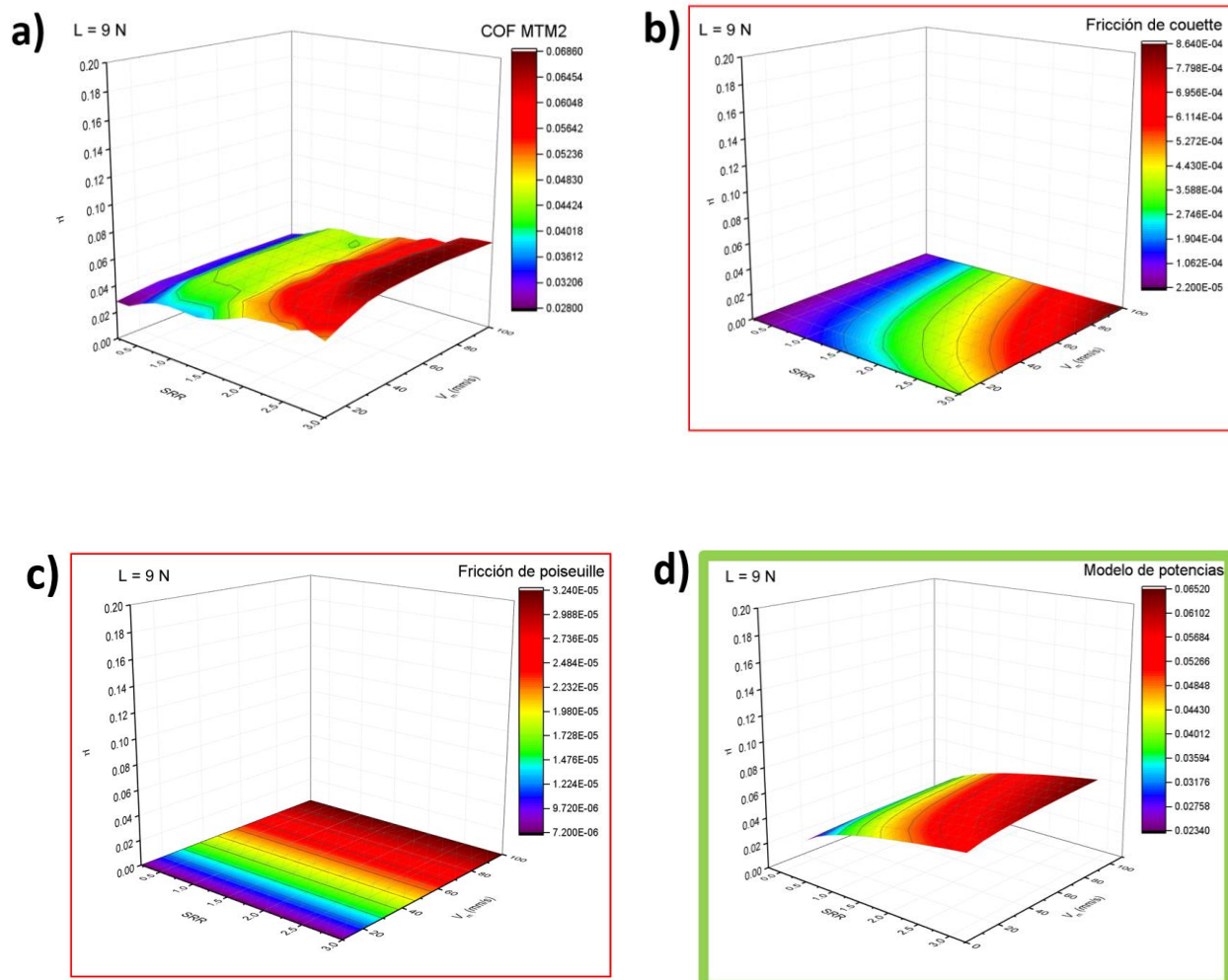


Fig. 4.13. Ajuste de modelos matemáticos para la carga de 9 N, a) datos crudos del COF obtenidos del tribómetro de bola en disco, b) modelo de Couette, c) modelo de potencias y d) modelo de Poiseuille.

Los modelos que se utilizaron para predecir el comportamiento de los resultados experimentales del COF fueron aplicando el de la Ec. 4.3, puesto que al mantener constante el valor de SRR se puede observar que efecto tienen sobre el COF los parámetros de (cargas y velocidades). En la Fig. 4.14 se observan diferentes gráficas de superficies de respuesta al variar la carga y mantener fijo un valor de SRR, donde el único modelo que dio un buen ajuste es el de potencias Fig. 4.14d), los modelos del COF de Couette y Poiseuille carecen de la capacidad de predecir el comportamiento de los resultados experimentales. Esto es análogo a lo mostrado en la Fig. 4.15.

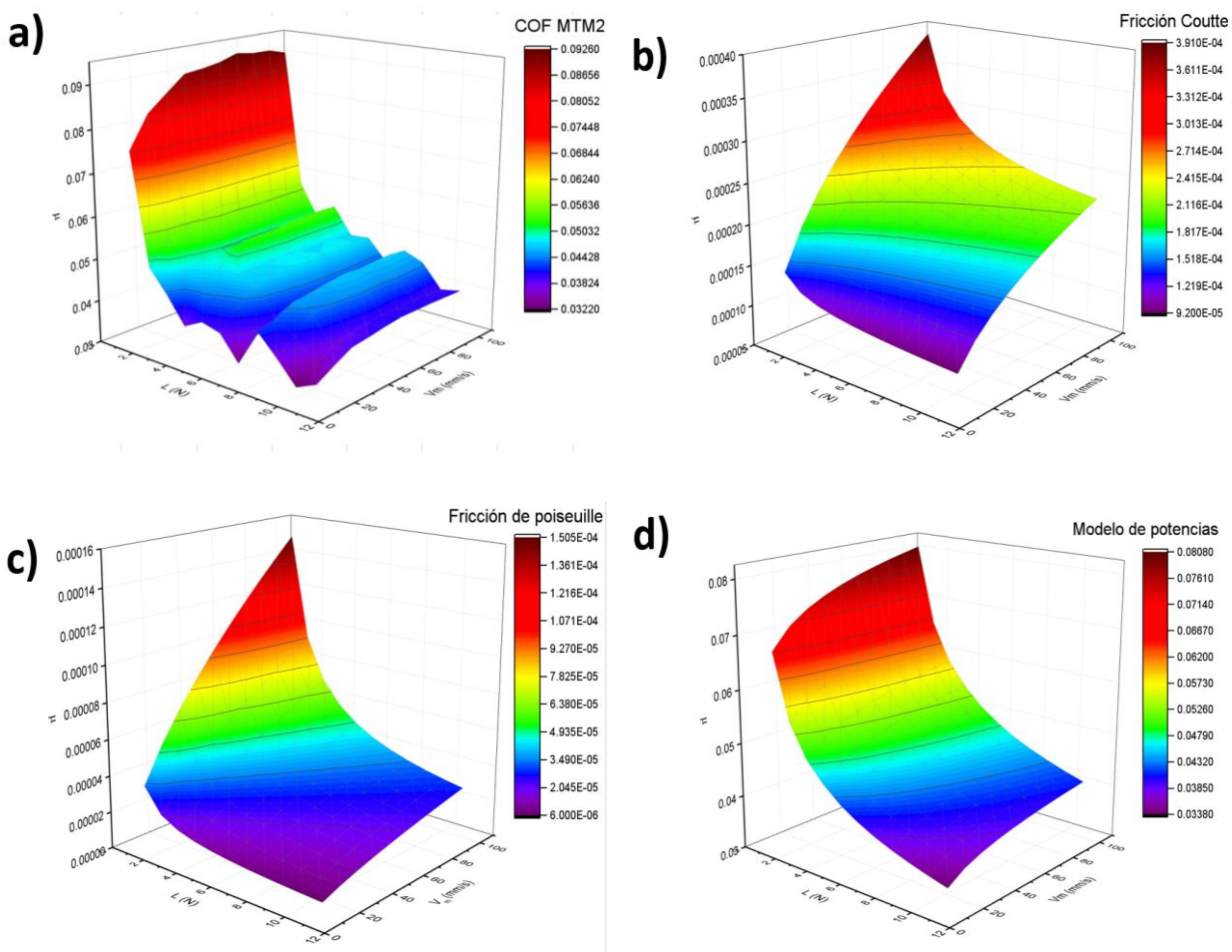
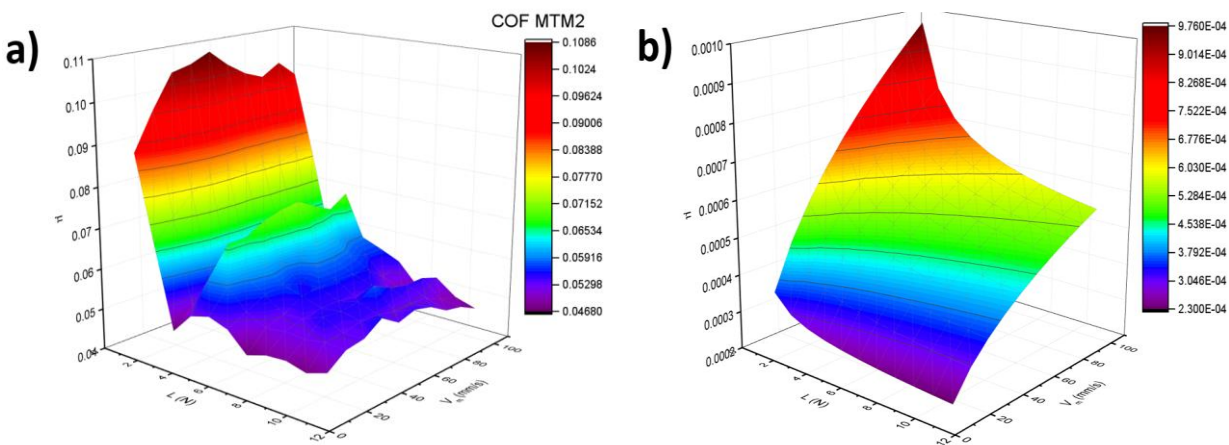


Fig. 4.14. Ajuste de modelos matemáticos para $SRR = 0.8$.



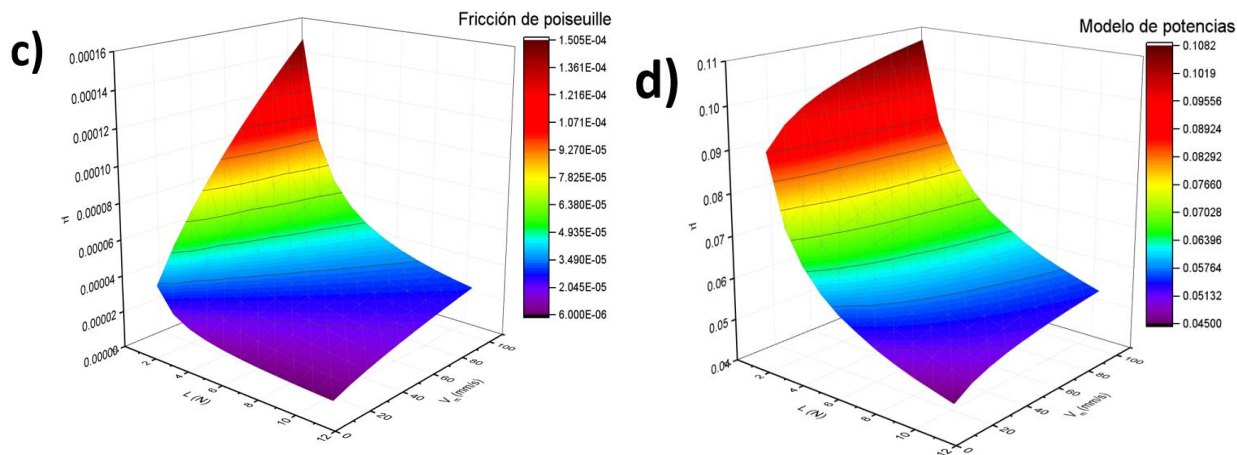


Fig. 4.15. Ajuste de modelos matemáticos para $SRR = 2$.

El análisis de todos los datos del mapeo del COF para el agua se realizó mediante modelos de regresión del tipo que se observa en la Ec. 4.4, con la finalidad de cuantificar el efecto de las variables (L , V_m y SRR) en el COF. Por esta razón se ajustaron modelos de regresión para los datos del agua, aquí se describe con detalle cómo se aplicó el modelo de regresión.

Con la finalidad de saber cómo influyen los factores de carga (L) y velocidad media (V_m) en el comportamiento del COF, se ajustaron modelos de regresión en función de la siguiente ecuación:

$$COF = CL^{b1}|V_m|^{b3} \quad \text{Ec. 4.4}$$

Los modelos de regresión para los resultados del COF de una superficie lisa de UHMWPE en contacto contra una bola de acero inoxidable lubricada con [agua destilada](#):

- Se fijó el valor de la relación de rodamiento-deslizamiento (SRR), para poder tener un valor de SRR para todas las combinaciones de cargas (1 a 11 N).
- Se realizaron 15 modelos de regresión puesto que son 15 valores de SRR .

En la Tabla 4.8 se observan los resultados del ANOVA para la Ec.4.4, en esta se muestra que el ajuste fue bastante pobre cuando se tienen condiciones de rodamiento (SRR de 0.2 y 0.4), pero al tener otras condiciones de movimientos como rodamiento/deslizamiento, deslizamiento puro y superdeslizamiento el ajuste mejoró considerablemente, obteniendo valores de R^2 del orden de 0.9. También, se observa cual es el orden de importancia de los parámetros en el incremento del COF de acuerdo con el modelo de potencias ajustado, asimismo en la Fig. 4.16 se muestra que la carga (L) tienen un efecto inverso en el incremento del COF, esto es, que para la carga más alta se tendrá el valor más bajo del COF tal y como se observa en la gráfica de la Fig. 4.11k) presentada

en la sección 4.2.1. El segundo parámetro importante en el incremento del COF es la V_m con una relación directa, esto es, que al tener el valor más alto de V_m se tendrá el valor más alto del COF.

Tabla 4.8. Resumen de los coeficientes por SRR para el AGUA al ajustar la Ec. 4.4.

| SRR | b₀ | b₁ | b₃ | R² | Adj-R² |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|
| 0.2 | 0.04214053 | -0.2804 | 0.0485 | 65.45% | 68.88% |
| 0.4 | 0.05307622 | -0.3618 | 0.0804 | 75.11% | 74.64% |
| 0.6 | 0.05031645 | -0.280026 | 0.081673 | 99.99% | 99.99% |
| 0.8 | 0.05561603 | -0.2895 | 0.0823 | 86.45% | 86.20% |
| 1 | 0.06038096 | -0.2793 | 0.0768 | 87.07% | 86.83% |
| 1.2 | 0.05561603 | -0.2895 | 0.0823 | 86.45% | 86.20% |
| 1.4 | 0.07046931 | -0.3459 | 0.0813 | 85.99% | 85.73% |
| 1.6 | 0.07120328 | -0.32669 | 0.07988 | 93.60% | 93.48% |
| 1.8 | 0.07136742 | -0.2941 | 0.0709 | 83.07% | 82.76% |
| 2 | 0.07584029 | -0.2591 | 0.049 | 82.93% | 82.61% |
| 2.2 | 0.07495489 | -0.2593 | 0.0664 | 92.02% | 89.84% |
| 2.4 | 0.07431902 | -0.27261 | 0.0958 | 92.96% | 92.83% |
| 2.6 | 0.07207755 | -0.25062 | 0.1033 | 87.56% | 87.32% |
| 2.8 | 0.07421642 | -0.2661 | 0.1142 | 87.45% | 87.22% |
| 3 | 0.07097412 | -0.25261 | 0.12302 | 91.50% | 91.34% |

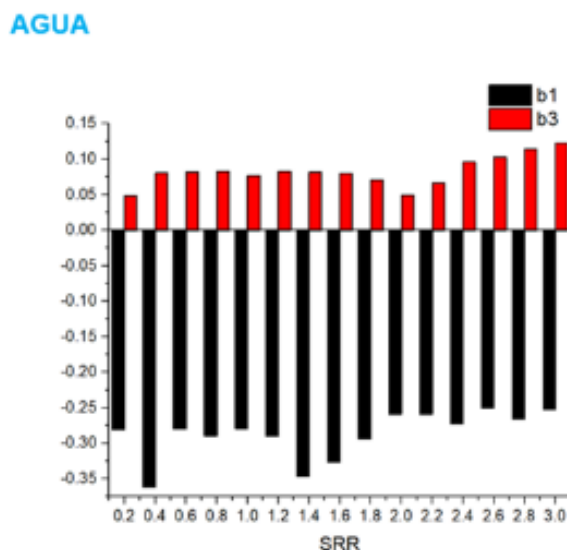


Fig. 4.16. Resumen de los coeficientes de la Ec. 4.4 para los datos del COF del par tribológico (disco liso de UHMWPE y bola de acero inoxidable 316L), lubricado con agua.

4.2.3. Pre-experimentos del COF de una superficie texturizada de UHMWPE

Se realizaron pre-experimentos del desempeño tribológico de una superficie texturizada de UHMWPE bajo condiciones del ciclo de la marcha, para realizar las pruebas se trasladaron las condiciones artrocinemática y de cargas al tribómetro de bola en disco utilizando la metodología propuesta por Barceinas et al., [104]. Estos pre-experimentos se realizaron para conocer el desempeño de la superficie texturizada. Los experimentos se realizaron utilizando cavidades con: geometría circular, diámetros de 360 μm , profundidad de 360 μm , y dos densidades de área texturizada del 9 y 20 %. En la Fig. 4.17. se observa el comportamiento del COF del par tribológico (AISI 316L/UHMWPE) lubricado con agua destilada, además, se puede apreciar el comportamiento del COF al utilizar una superficie lisa de polietileno y una superficie texturizada de polietileno bajo condiciones del ciclo de la marcha. También, en la Fig. 4.17 se aprecia claramente que el texturizado no reduce el COF bajo condiciones del ciclo de la marcha, es complicado poder realizar un análisis puntual de las condiciones del ciclo de la marcha puesto que se tienen condiciones no sistemáticas, por otro lado, la reducción del COF se presenta cuando se utiliza una superficie lisa de polietileno.

Se utilizaron discos con densidad de texturizado del 10 y 20 %, con diámetros de 360 ± 40 μm y profundidad de 360 ± 40 μm . Para explorar el comportamiento de la superficie texturizada, se realizaron pruebas experimentales del COF del par tribológico disco texturizado de UHMWPE y bola de acero inoxidable lubricados con agua destilada a 37 $^{\circ}\text{C}$, bajo las condiciones artrocinemáticas y de cargas presentes en el ciclo de la marcha [105]. Es importante mencionar, que los cambios en los parámetros no son sistemáticos, cada punto que se observa en la Fig. 4.17 representa condiciones diferentes de V_m , L y SRR.

En la Fig. 4.17 se observa que el comportamiento del COF es mayor para ambas superficies texturizadas en comparación con la superficie sin cavidades. Se esperaba que el texturizado redujera el valor de la fricción, sin embargo, al utilizar las condiciones del ciclo de la marcha esto no ocurre.

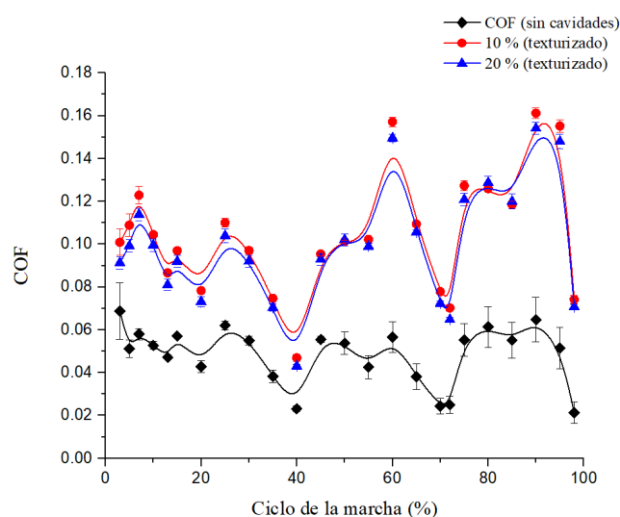


Fig. 4.17. Comportamiento del COF en una superficie texturizada lubricada con agua.

4.2.4. Análisis de los pre-experimentos del COF de una superficie texturizada de UHMWPE

Con el fin de conocer cómo influyen los factores relación de rodamiento/deslizamiento (SRR), carga (L) y velocidad media (V_m) en el comportamiento del COF de una superficie texturizada de UHMWPE, se realizaron modelos de regresión, a fin de conocer el efecto puntual de estos parámetros sobre el COF. Primero se analizaron las densidades de texturizado del 10 y 20%, cuando se tienen diámetros de 360 ± 40 μm , con relación a la Fig. 4.17.

El modelo de regresión se ajustó a lo largo del todo el ciclo de la marcha, se muestra en la Ec. 4.5. En este modelo la variable de respuesta (COF) está en función de los parámetros independientes (L , SRR y V_m).

$$COF = b_0 L^{b_1} |SRR|^{b_2} |V_m|^{b_3} \quad \text{Ec. 4.5}$$

Posteriormente, se realizó el análisis de varianza (ANOVA), los resultados se presentan en la Tabla 4.9. Para conocer cuál es el parámetro más importante en el comportamiento del COF para una superficie texturizada. En las Figs. 4.18 y 4.19 se muestran los ajustes de los modelos de potencias en relación con el comportamiento del COF del tribómetro de bola en disco.

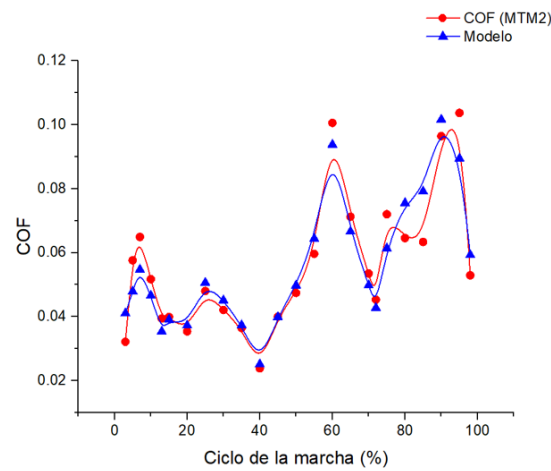


Fig. 4.18. Ajuste del modelo de regresión para la densidad de texturizado del 10 %.

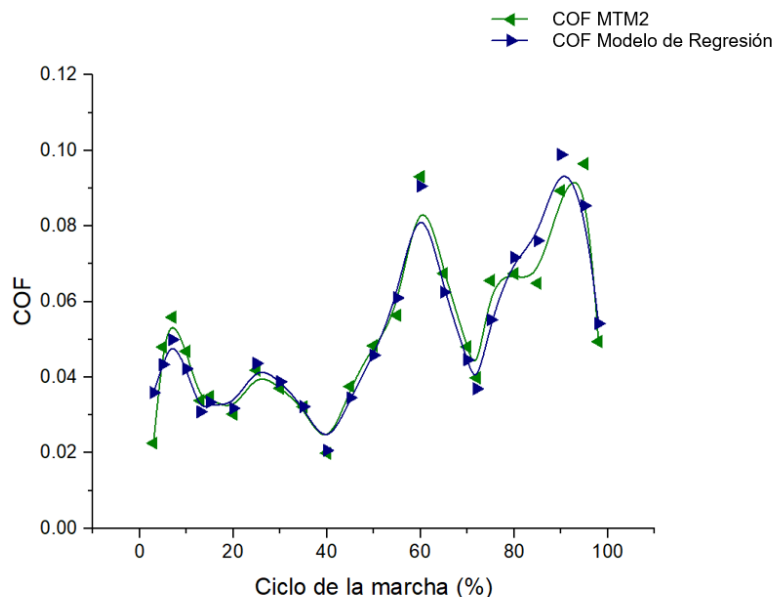


Fig. 4.19. Ajuste del modelo de regresión para la densidad de área texturizada del 20 %.

Los resultados de los valores de los coeficientes de los modelos de regresión se presentan en la Tabla. 4.9, además, podemos ver que los modelos de regresión explican cerca del 90% de la variabilidad de los resultados experimentales.

Tabla 4.9. Resultados de los coeficientes del modelo de regresión ajustado en la Ec.4.

| Coeficientes | Densidad de texturizado del 10 % | Densidad de texturizado del 20 % |
|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|
| b_0 | 0.0144 | 0.0104 |
| b_1 | -0.3452 | -0.3629 |
| b_2 | 0.1752 | 0.1912 |
| b_3 | 0.2183 | 0.2644 |
| R^2 | 0.8948 | 0.8986 |
| Ajuste de R^2 | 0.8797 | 0.8834 |

En la Fig. 4.20, se muestra de una manera más clara cuál es el efecto de los factores. En esta gráfica se observa que el efecto más importante sobre el COF es la carga (L), el segundo efecto es la V_m y finalmente el último factor es el SRR. L tiene una relación inversa sobre el COF, esto

significa que la carga en conjunto con las cavidades no es lo suficientemente grande para generar una presión extra de empuje que separe a las dos superficies. La V_m tiene una relación directa sobre el incremento del COF, esto quiere decir que las cavidades representan obstáculos para el movimiento de la bola y el disco, a medida que se incrementa las velocidades de deslizamiento habrá mayores obstáculos para el avance de la bola sobre el disco, esto hará que se incremente el COF. Además, las condiciones de parámetros presentes en el ciclo de la marcha harán que existan diferentes mecanismos de lubricación. Otra razón por la cual el COF no disminuye al utilizar una superficie texturizada es porque cuando el SRR cambia de rodamiento a deslizamiento el fluido se queda a la entrada del contacto provocando una película inestable, esto origina que el COF no disminuya al utilizar una superficie texturizada.

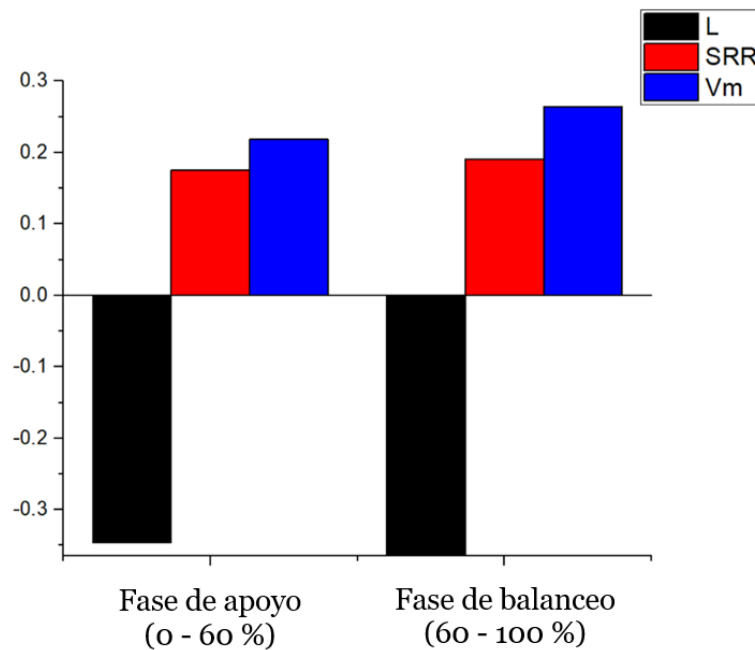


Fig. 4.20. Magnitud de las potencias del modelo de regresión.

4.2.5. Superficie texturizada lubricada con Suero Bovino

Uno de los principales objetivos es mejorar el desempeño tribológico de los biomateriales UHMWPE y AISI 316L, para lo cual se empleó una superficie texturizada de UHMWPE para explorar las condiciones del espacio fase (Fig. 4.21) utilizando un tribómetro de bola en disco, MTM2, PCS Instruments.

En la Fig. 4.21 se observa una trayectoria de color rojo, esta contiene diferentes valores de cargas (L), velocidad media (V_m) y relación de rodamiento/deslizamiento (SRR) que corresponden a una prótesis de rodilla. En el trabajo de Barceinas et al., [104] se encuentra el método para trasladar las condiciones artrocinemáticas y de cargas bajo la norma ISO 14243-3:2014 [105] a una geometría simplificada de bola en disco. Por consiguiente, se extendieron las condiciones experimentales (L , V_m , SRR) obteniendo un espacio de fase como el que se observa en la Fig. 4.21, con la finalidad de explorar el comportamiento de una superficie texturizada de UHMWPE en el COF al utilizar una amplia gama de combinaciones de velocidades y cargas, utilizando como lubricante suero bovino.

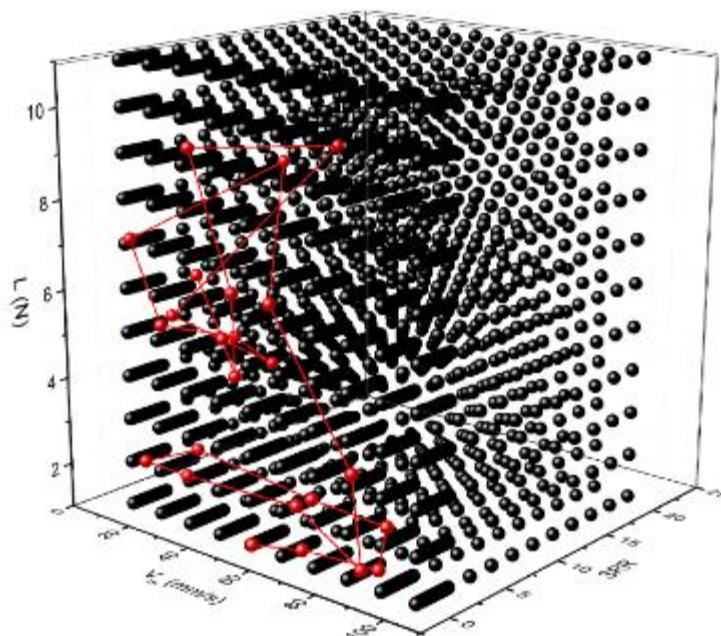


Fig. 4.21. Espacio de puntos de las condiciones experimentales con trayectoria de una prótesis de rodilla.

Los experimentos se realizaron utilizando un tribómetro de bola en disco para evaluar el desempeño tribológico del disco texturizado de UHMWPE y la bola de acero inoxidable 316L, empleando una concentración de 20 g/L de suero bovino.

Los experimentos se realizaron utilizando un disco texturizado de UHMWPE; las cavidades tienen un diámetro de 100 μm y un arreglo angular, esto fue descrito en el capítulo III, sección 3.3.1. En la Tabla 4.10. se observan las condiciones experimentales para realizar los experimentos tribológicos en el tribómetro de bola en disco, donde se muestra que se utilizaron 3 cargas diferentes, para evaluar el texturizado superficial del UHMWPE se utilizaron 9 discos, los cuales tienen diferentes condiciones de texturizado como: profundidades, separación entre cavidades, separación radial y separación angular, por cada disco texturizado se realizaron 3 réplicas pero reemplazando el lubricante entre una prueba y otra. En total se realizaron 27 corridas.

Tabla 4.10. Condiciones experimentales del par tribológico disco texturizado de UHMWPE y bola de acero inoxidable 316 L evaluadas en el tribómetro de bola en disco.

| Temperatura | L (N) | V _m (mm/s) | SRR | Replicas |
|-------------|-----------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------|
| 37 °C | 2, 6 y 8. | 10 a 100 (en incrementos de 10). | 0.2 a 3 (en incrementos de 0.2). 3 a 21 (en incrementos de 2). | 3 |

En la Fig. 4.22 se muestran los resultados del COF para una superficie texturizada de UHMWPE en diferentes condiciones de contacto rodante/deslizante contra una bola de acero inoxidable 316L, en la Fig. 4.22a) se muestran los resultados del COF al mantener la carga fija (2 N) para las condiciones SRR (0.2 a 21) y V_m (10 a 100 mm/s). Por otro lado, en la Fig. 4.22b) se muestran una sección a detalle de los resultados para el rango de SRR de 0.2 a 3, puesto que en esta zona es donde se encuentra diferentes condiciones de movimientos: rodamiento puro, rodamiento/deslizamiento, deslizamiento puro y super deslizamiento. Además, se observa la variación del COF, los valores más altos del COF se presentan cuando el movimiento predominante es el rodamiento (SRR 0.2) para el rango de V_m de 10 a 50 mm/s. Otro aspecto importante que vale la pena destacar es que el COF tiende a disminuir cuando V_m se va incrementando. El comportamiento anterior del COF es análogo para las otras cargas (6 y 10 N). Por otro lado, el utilizar texturizado y cargas grandes como 6 y 10 N se observa que se reduce el valor del COF en las Figs. 4.22b) y c). En las Figs. 4.22b), d) y f) se muestra que el COF tiende a disminuir cuando se reduce el valor de la V_m, esta tendencia también se observa al reducir el valor de SRR.

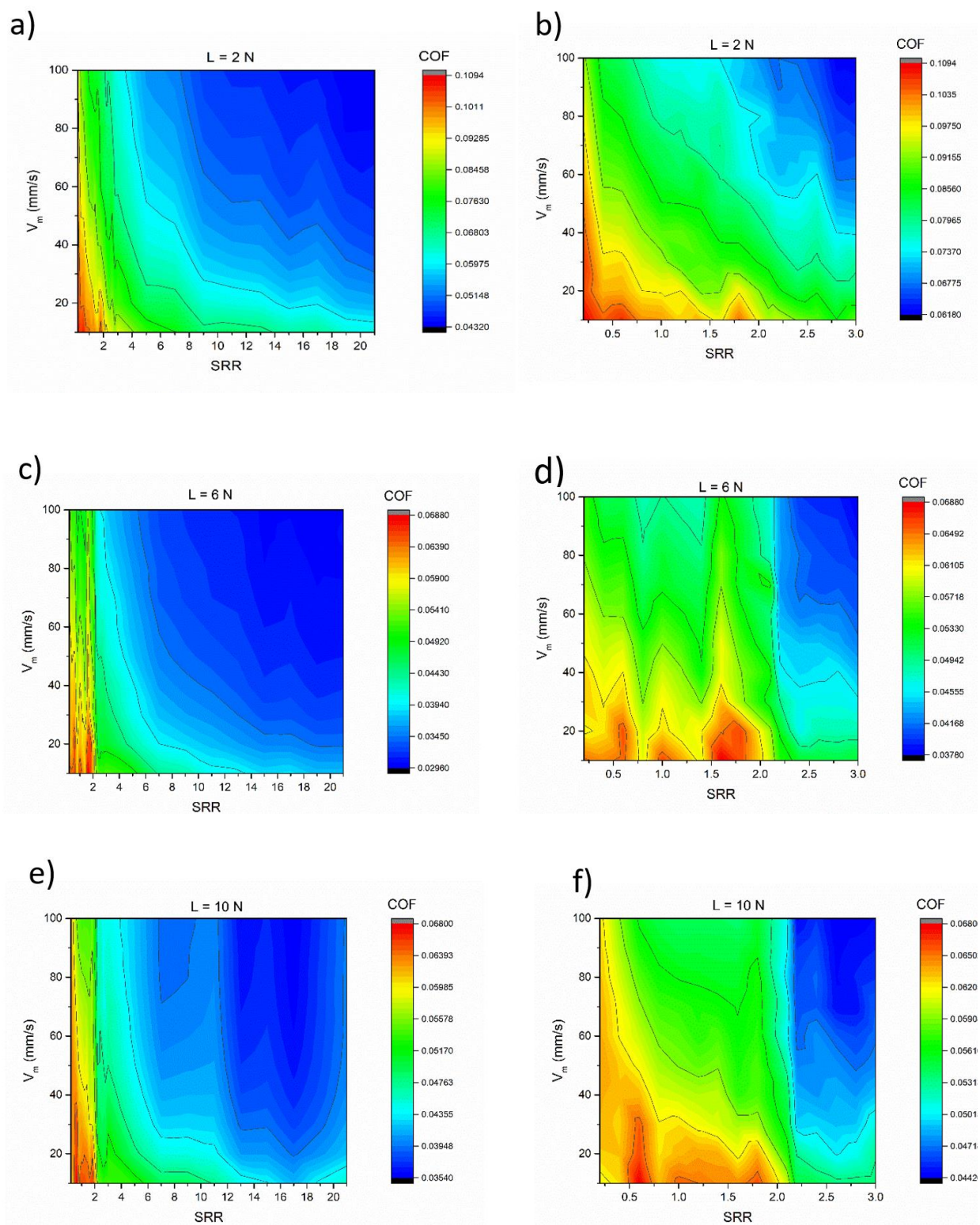


Fig. 4.22. Resultados del COF para una superficie texturizada de UHMWPE utilizando una concentración de 20 g/L de suero bovino.

4.2.6. Análisis de la superficie texturizada de UHMWPE lubricada con suero bovino

Se ajustaron modelos matemáticos de regresión, ya que estos nos permiten encontrar la relación entre las variables independientes (L , V_m y SRR) con la variable dependiente (COF). Los modelos ajustados son de la forma como el que se describe en la Ec. 4.6, donde se observa que para este modelo se mantuvo fija la carga, y el ajuste fue en función de las variables de velocidad media y relación de rodamiento/deslizamiento (V_m y SRR). Los análisis de varianza (ANOVA) se clasificaron por cargas para la carga de 2, 6 y 10 N, por eso se encuentran 3 ANOVA, ver las Tabla 4.11, 4.12 y 4.13.

$$COF = C * (V_m^{b_1}) * (SRR^{b_2}) \quad \text{Ec. 4.6}$$

En la Tabla 4.11., se observa que el modelo es significativo porque al ser muy pequeño el valor de p (0.01%) se rechaza la hipótesis nula ($\alpha \leq \text{valor } p$, se rechaza H_0), esto es, el modelo nos dice que sus términos son significativos al tener un valor p menor a 0.05, puesto que se está utilizando una confiabilidad del 95 %. En este caso los términos significativos son V_m y SRR : Además, se observa que el valor de R^2 del modelo tiene un nivel de significancia del 96% para explicar el comportamiento de los resultados. Por otra parte, este modelo nos presenta que la suma de cuadrados del error de predicción es relativamente baja con 0.11, esto significa que la desviación medida entre los valores ajustados y los valores observados es muy pequeña. Algo similar ocurre al observar el resultado de los ANOVAs para las cargas de 6 y 8 N ver Tablas 4.12 y 4.13, todos los modelos tienen un buen ajuste para predecir el comportamiento de los datos.

Tabla 4.11. ANOVA para la carga de 2 N.

Response 1 Log (COF)

ANOVA for Response Surface Linear model
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F | |
|---------------|-----------------------|-----------|--------------------|----------------|----------------------------|-------------|
| Model | 2.68 | 2 | 1.34 | 3034.04 | < 0.0001 | significant |
| Log (V_m) | 0.46 | 1 | 0.46 | 1031.55 | < 0.0001 | |
| Log (SRR) | 2.22 | 1 | 2.22 | 5038.39 | < 0.0001 | |
| Residual | 0.10 | 237 | 4.414E-004 | | | |
| Cor Total | 2.78 | 239 | | | | |

| | | | |
|-----------|-------|----------------|---------|
| Std. Dev. | 0.021 | R-Squared | 0.9624 |
| Mean | -1.15 | Adj R-Squared | 0.9621 |
| C.V. % | 1.82 | Pred R-Squared | 0.9610 |
| PRESS | 0.11 | Adeq Precision | 212.287 |

| Factor | Coefficient Estimate | df | Standard Error | 95% CI Low | 95% CI High | VIF |
|---------------|-----------------------------|-----------|-----------------------|-------------------|--------------------|------------|
| Intercept | -1.10 | 1 | 1.585E-003 | -1.11 | -1.10 | |
| Log (V_m) | -0.073 | 1 | 2.271E-003 | -0.077 | -0.068 | 1.00 |
| Log (SRR) | -0.18 | 1 | 2.500E-003 | -0.18 | -0.17 | 1.00 |

Final Equation in Terms of Coded Factors:

$$\begin{aligned} \text{Log (COF)} = & \\ & -1.10 \\ & -0.073 * \text{Log (} V_m \text{)} \\ & -0.18 * \text{Log (SRR)} \end{aligned}$$

Final Equation in Terms of Actual Factors:

$$\begin{aligned} \text{Log (COF)} = & \\ & -0.83301 \\ & -0.14437 * \text{Log (} V_m \text{)} \\ & -0.17574 * \text{Log (SRR)} \end{aligned}$$

Tabla 4.12. ANOVA para la carga de 6 N.

ANOVA for Response Surface Linear model para la L = 6 N.
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F | |
|---------------|----------------|-----|-------------|---------|------------------|-------------|
| Model | 2.40 | 2 | 1.20 | 1043.55 | < 0.0001 | significant |
| Log (V_m) | 0.27 | 1 | 0.27 | 237.34 | < 0.0001 | |
| Log (SRR) | 2.13 | 1 | 2.13 | 1853.50 | < 0.0001 | |
| Residual | 0.27 | 237 | 1.151E-003 | | | |
| Cor Total | 2.68 | 239 | | | | |

| | | | |
|-----------|-------|----------------|---------|
| Std. Dev. | 0.034 | R-Squared | 0.8980 |
| Mean | -1.36 | Adj R-Squared | 0.8972 |
| C.V. % | 2.50 | Pred R-Squared | 0.8951 |
| PRESS | 0.28 | Adeq Precision | 121.382 |

| Factor | Coefficient Estimate | df | Standard Error | 95% CI Low | 95% CI High | VIF |
|---------------|----------------------|----|----------------|------------|-------------|------|
| Intercept | -1.31 | 1 | 2.573E-003 | -1.31 | -1.30 | |
| Log (V_m) | -0.057 | 1 | 3.709E-003 | -0.064 | -0.050 | 1.00 |
| Log (SRR) | -0.17 | 1 | 4.044E-003 | -0.18 | -0.17 | 1.00 |

Final Equation in Terms of Coded Factors:

$$\begin{aligned} \text{Log (COF)} = & \\ & -1.31 \\ & -0.057 * \text{Log} (V_m) \\ & -0.17 * \text{Log} (SRR) \end{aligned}$$

Final Equation in Terms of Actual Factors:

$$\begin{aligned} \text{Log (COF)} = & \\ & -1.08781 \\ & -0.11269 * \text{Log} (V_m) \\ & -0.17198 * \text{Log} (SRR) \end{aligned}$$

Tabla 4.13. ANOVA para la carga de 10 N.

ANOVA for Response Surface Linear model para L = 10 N.**Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]**

| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F | |
|---------------|-----------------------|-----------|--------------------|----------------|----------------------------|-------------|
| Model | 1.41 | 2 | 0.70 | 1119.11 | < 0.0001 | significant |
| Log (V_m) | 0.12 | 1 | 0.12 | 195.30 | < 0.0001 | |
| Log (SRR) | 1.28 | 1 | 1.28 | 2041.73 | < 0.0001 | |
| Residual | 0.15 | 237 | 6.283E-004 | | | |
| Cor Total | 1.56 | 239 | | | | |

| | | | |
|-----------|-------|----------------|---------|
| Std. Dev. | 0.025 | R-Squared | 0.9043 |
| Mean | -1.31 | Adj R-Squared | 0.9034 |
| C.V. % | 1.91 | Pred R-Squared | 0.9012 |
| PRESS | 0.15 | Adeq Precision | 122.738 |

| Factor | Coefficient Estimate | df | Standard Error | 95% CI Low | 95% CI High | VIF |
|---------------|-----------------------------|-----------|-----------------------|-------------------|--------------------|------------|
| Intercept | -1.28 | 1 | 1.876E-003 | -1.28 | -1.27 | |
| Log (V_m) | -0.040 | 1 | 2.856E-003 | -0.046 | -0.034 | 1.00 |
| Log (SRR) | -0.13 | 1 | 2.983E-003 | -0.14 | -0.13 | 1.00 |

Final Equation in Terms of Coded Factors:

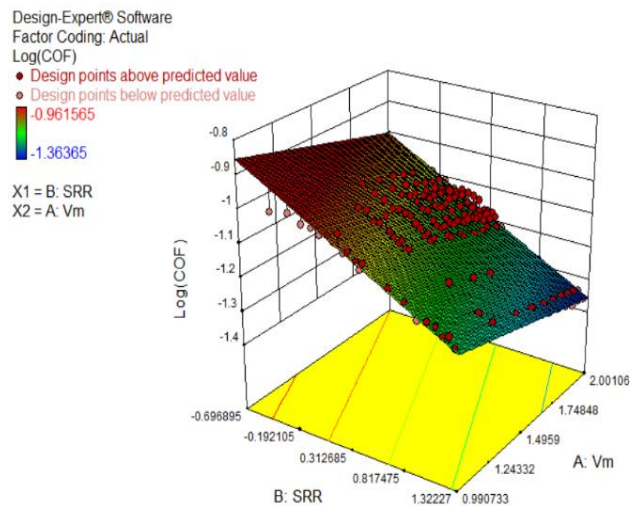
$$\begin{aligned} \text{Log (COF)} = & \\ & -1.28 \\ & -0.040 * \text{Log} (V_m) \\ & -0.13 * \text{Log} (SRR) \end{aligned}$$

Final Equation in Terms of Actual Factors:

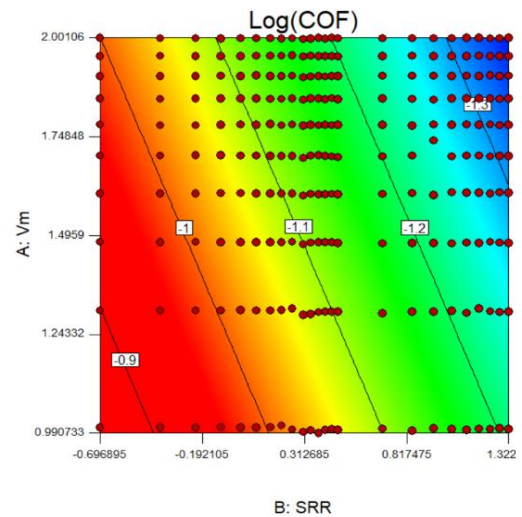
$$\begin{aligned} \text{Log (COF)} = & \\ & -1.12343 \\ & -0.074835 * \text{Log} (V_m) \\ & -0.13349 * \text{Log} (SRR) \end{aligned}$$

En las Fig. 4.23a), c) y d) se aprecian las gráficas de las superficies de respuesta, estas gráficas permiten analizar la relación entre las variables tridimensionalmente, por lo tanto, se puede localizar para que valores de V_m y SRR se obtiene el valor más alto del COF. También, se muestran las gráficas de contorno en las Fig.4.23b), f) y d), las cuales fueron obtenidas con los modelos de regresión, estas gráficas se utilizaron para explorar la relación entre las variables (L , V_m y SRR) ya que nos ofrecen una vista bidimensional para establecer cuáles son los valores de las variables que nos dan el valor más bajo y/o alto del COF, ya que estas graficas nos permiten observar cómo se conectan las variables mediante líneas de contorno. Por ejemplo: la Fig. 4.23a) podemos observar en que combinación de valores de V_m y SRR obtenemos los puntos más altos y bajos el COF, pero en la Fig. 4.23b) podemos encontrar con mayor detalle la intercepción de estas variables.

a)



b)



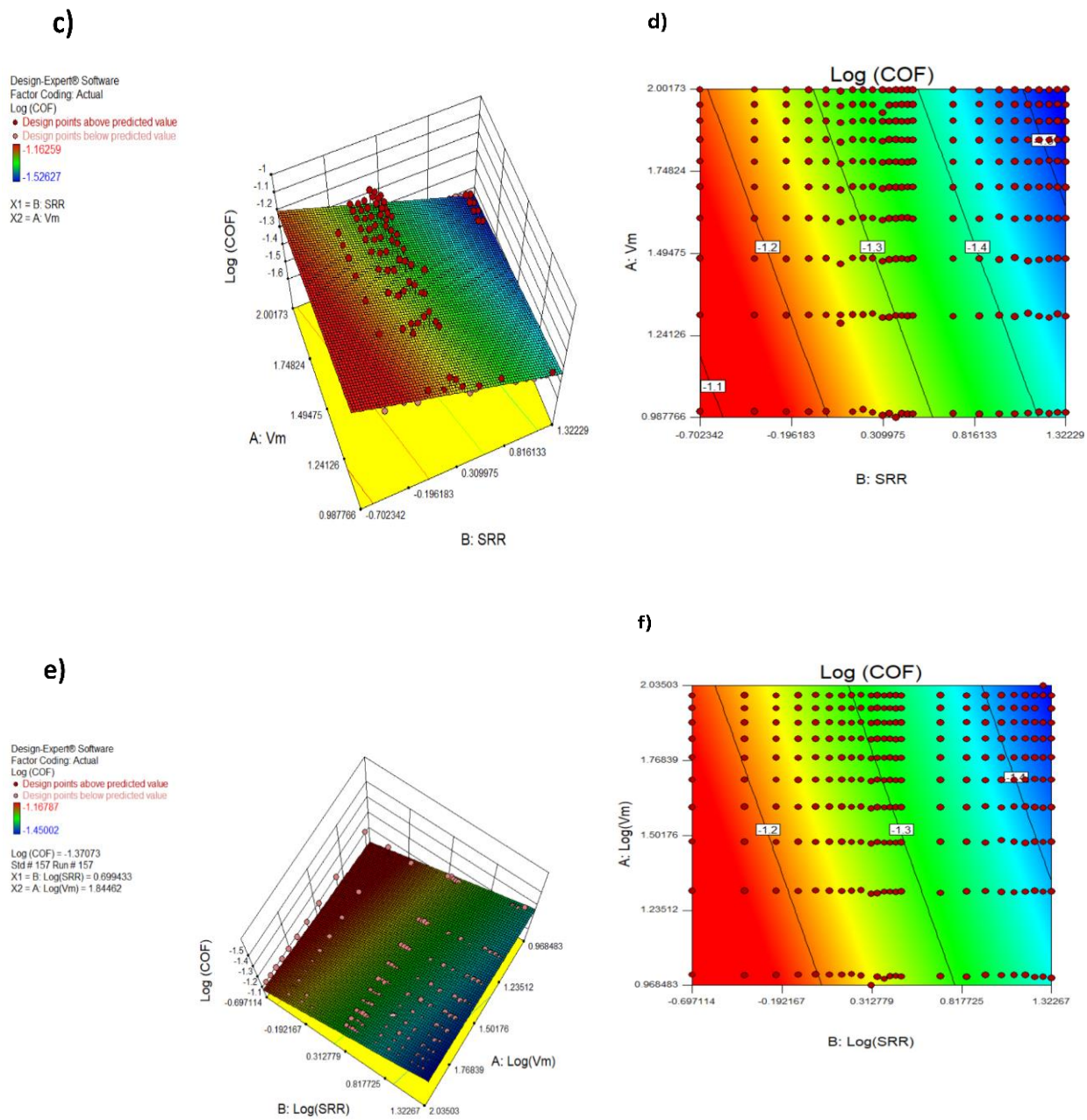


Fig. 4.23. Superficie de respuesta y gráficas de contorno para la carga de a) 2 N, b) 6 N y 10 N.

En la Fig. 4.24 se observa a detalle el comportamiento de los factores (L , V_m y SRR) sobre el COF, encontrándose que todos los factores (L , SRR y V_m) tienen un efecto inverso en el COF, pero el efecto más importante es la carga con una relación inversa sobre el COF, lo cual significa que para la carga más baja (2 N) se presenta el valor más alto del COF. El segundo efecto en el COF es el SRR , con una relación inversa sobre el COF, esto es que para los valores más bajos de SRR se presentan las condiciones más altas del COF, por ejemplo, para valores de SRR 0.2 a 0.6 donde predomina el rodamiento observamos los valores más altos del COF, ver las Figs. 4.22b), e) y f). Finalmente, el último efecto que se observa en la Fig. 4.24 es la V_m igualmente con una relación inversa sobre el COF.

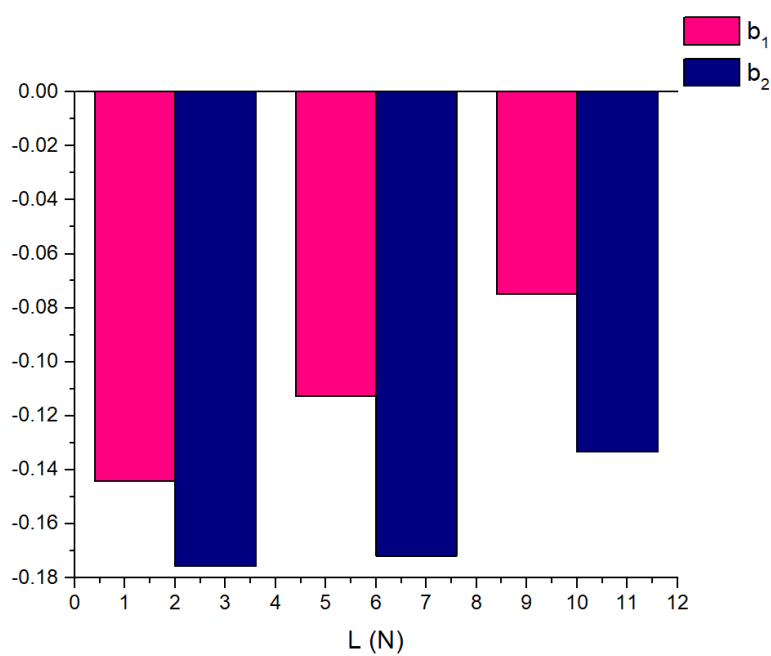


Fig. 4.24. Magnitud de las potencias de los coeficientes del modelo de regresión para una superficie texturizada de UHMWPE, Ec. 4.6.

4.3. Espectrofotometría UV-visible

Con la finalidad de conocer los cambios de las proteínas presentes en el suero bovino al estar interactuando sobre una superficie texturizada de UHMWPE bajo diferentes condiciones de movimientos (contacto rodante, rodante/deslizante, deslizante y superdeslizante) contra una bola de acero inoxidable 316 L, y aplicando diferentes cargas, se recolectó el lubricante utilizado en las pruebas para realizar mediciones mediante la técnica de espectrofotometría UV-visible.

En la Fig. 4.25 se presentan los resultados obtenidos del barrido espectral de la concentración de 20 g/L del suero bovino sin tratar y para el fluido que se empleó en las superficies texturizadas para las cargas de 2, 6 y 10 N. La tendencia que presentó el suero bovino tratado para la carga de 10 N fue un aumento considerable en el nivel de absorbancia para las longitudes de onda de 400, 475 y 580, claramente se muestra que el pico máximo de absorbancia se obtuvo cuando se trabajó el lubricante con la carga de 10 N. Todos los fluidos tratados de suero bovino presentan un incremento en la absorbancia justo en 300 pero el ancho de la longitud de onda es muy pequeño en comparación con el incremento de la longitud en 400 y 475 nm. La absorbancia de la muestra del suero bovino sin tratar es constante porque este es el blanco, debido a que se busca ver el comportamiento de las proteínas sin el efecto de la carga. Las longitudes de onda para la absorbancia se encuentran en el rango de luz visible (400 a 700 nm).

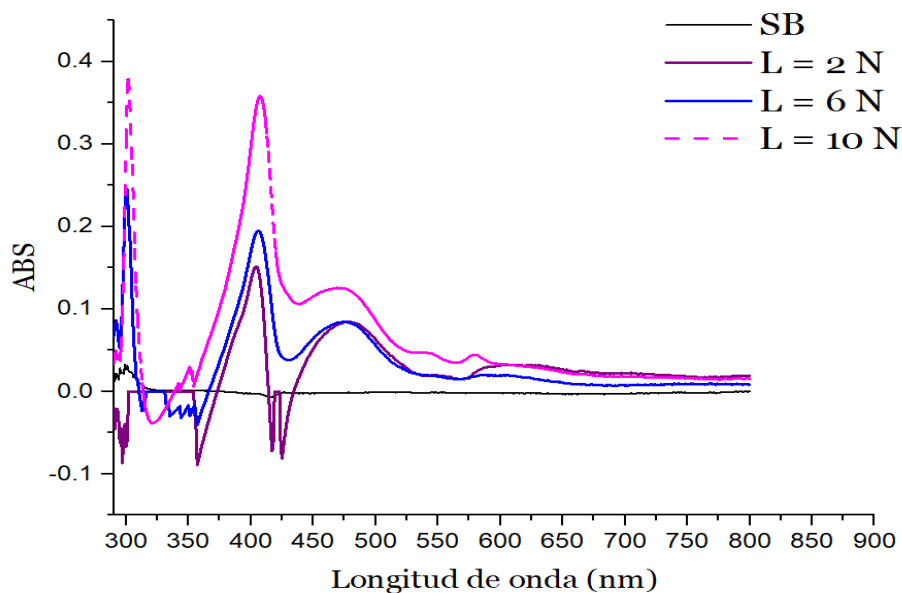


Fig. 4.25. Espectro de absorción del suero bovino tratado.

5. Discusión de los resultados experimentales del COF

5.1. Comparación de la superficie lisa de UHMWPE vs una superficie texturizada de UHMWPE

En la Fig. 5.1 se resumen el comportamiento del COF al cambiar de una superficie lisa lubricada con suero bovino en la Fig. 5.1a) y Fig.5.2a) y agua destilada la Fig. 5.1b) y Fig. 5.2b), y en la Fig. 5.1c) una superficie texturizada de UHMWPE lubricada con suero bovino, es evidente que existe un comportamiento diferente al lubricar las superficies lisas con un fluido no-Newtoniano a un fluido Newtoniano. En la Fig. 5.1a) y Fig. 5.2a) el comportamiento observado del COF se debe al efecto de las proteínas, cuando tenemos deslizamiento puro ($SRR = 2$) ocurre una acumulación de proteínas, esto quiere decir que el régimen presente es el de agregación de proteínas o por sus siglas en inglés “proteín-aggregation lubrication” (PAL); este mecanismo de lubricación se refiere a que las proteínas se acumulan a la entrada del contacto causando un espesor de película más viscoso lo que ocasiona que incremente el valor del COF [106], lo cual concuerda con el trabajo descrito por García et al., [60]. El régimen PAL es análogo con el régimen de lubricación reforzada su nombre en inglés es “boosted lubrication” de acuerdo con Stevenson and Cann [107], pues es el mismo mecanismo de formación de película que ocurre en las articulaciones naturales y artificiales; lo que ocurre en la articulación natural para la formación de la película bajo el régimen de lubricación reforzada “boosted lubrication” es que cuando las dos superficies de cartílago se presionan juntas, las grandes moléculas de ácido hialurónico presentes en el líquido sinovial forman una capa gelatinosa sobre la superficie articular, lo cual ocasiona que quede atrapado fluido sinovial y el agua es forzada a pasar dentro de la superficie porosa del cartílago, en lugar de salir de la superficie. Todo esto significa que el problema es comprender donde y cuando ocurre este régimen en la superficie de la lubricación natural e *in-vitro* [108]. Por ello la importancia de este trabajo en utilizar modelos de regresión para comprender por separado los parámetros que influyen en el comportamiento tribológico, para poder cuantificarlos y entender cuándo y dónde ocurre este mecanismo.

El comportamiento observado del COF en la Fig. 5.1 y Fig. 5.2c) se debe a que las cavidades están funcionando como reserva de lubricante proporcionando una presión de empuje extra para separar a las dos superficies que se encuentran bajo movimiento relativo. Además, al agregar texturizado superficial sobre la superficie del UHMWPE se modifica el ángulo de contacto del UHMWPE [109], lo cual ayuda a mejorar la lubricación del biomaterial. Si comparamos el comportamiento del COF al utilizar una superficie texturizada de UHMWPE Fig. 5.1c) vs Fig. 5.1a), observamos que se redujo el COF en un 33 % cuando se mantiene constante la carga de 2 N y se utiliza como lubricante suero bovino. En la Fig. 5.1c) se observa que la superficie texturizada para la carga de 6 N el COF se reduce en un 22 % respecto a una superficie lisa lubricada con suero bovino bajo las mismas condiciones experimentales.

Vale la pena destacar que al utilizar una superficie texturizada de UHMWPE cambia el comportamiento del COF conforme se incrementa la carga de 2 N, Fig. 5.1c) a la carga de 6 N Fig. 5.2c), este cambio del comportamiento en el COF en la Fig. 5.2c), se debe al movimiento de las superficies que ocasiona que las proteínas se acumulen en la entrada del contacto y sobre las cavidades.

En la Fig. 5.2c), se observan 3 comportamientos del COF en color rojo, el primero es cuando se tiene movimiento donde predomina el rodamiento (SRR 0.2 a 0.6 y V_m de 10 a 40 mm/s), donde se observan los valores más altos del COF, debido a que se está formando un gel de proteínas viscoso causando que incremente el valor del COF porque hay acumulación de proteínas a la entrada del contacto y sobre las cavidades, después cuando se tiene un SRR de 0.7 se reduce el valor del COF porque se rompe esa película viscosa (gel), el segundo comportamiento del COF es cuando se tiene movimiento de rodamiento/deslizamiento (SRR de 0.8 a 1.2) y V_m de 10 a 20 mm/s, lo cual se relaciona con la formación de una película lubricada viscosa (gel). Por ello las fluctuaciones del COF observadas en la Fig. 5.2c) se deben a la formación y ruptura de la película lubricante viscosa.

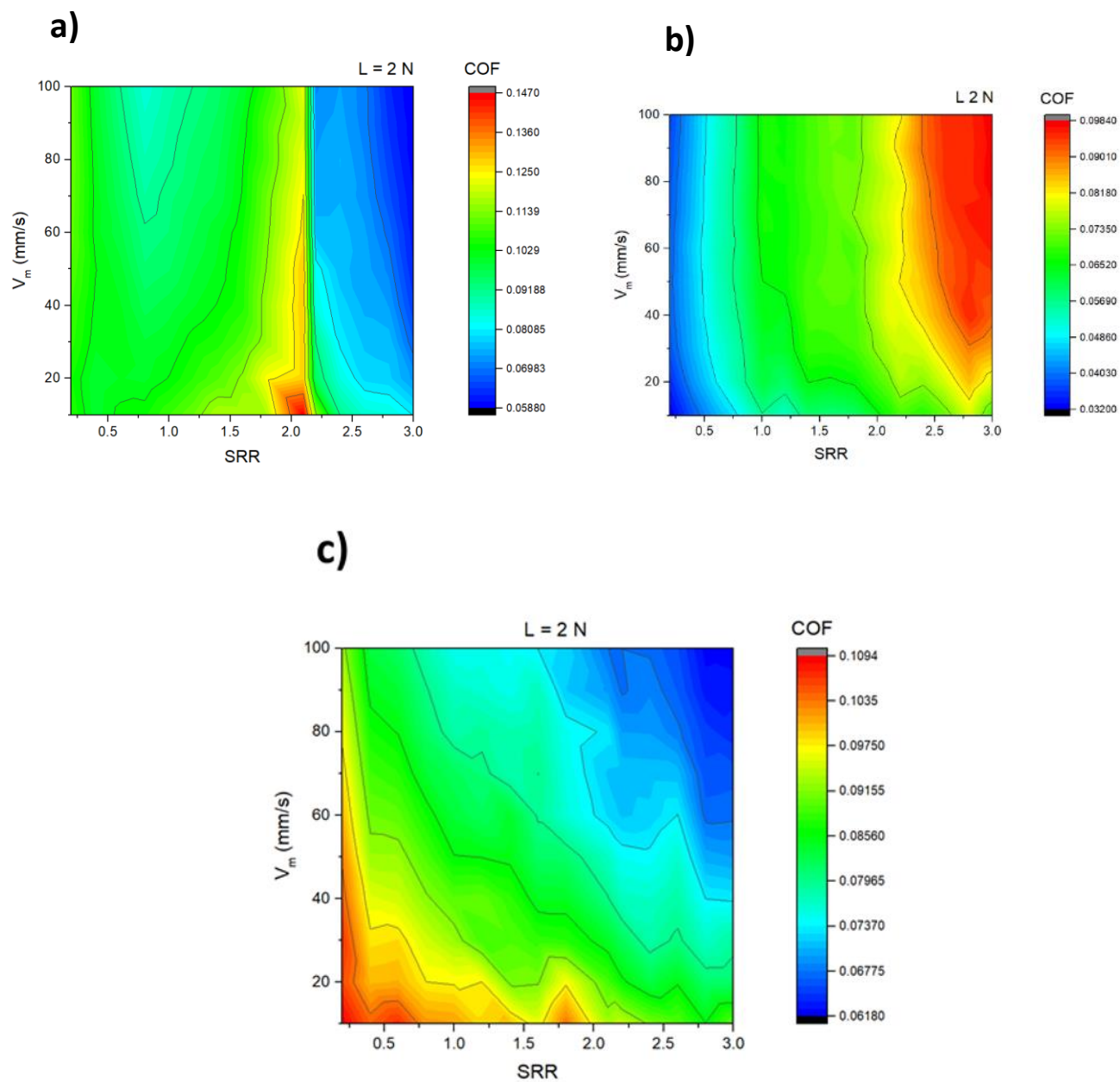


Fig. 5.1. Superficies de respuesta del COF para la carga de 2 N al tener una a) superficie lisa de UHMWPE lubricada con suero bovino, b) superficie lisa de UHMWPE lubricada con agua destilada y c) superficie texturizada de UHMWPE lubricada con suero bovino.

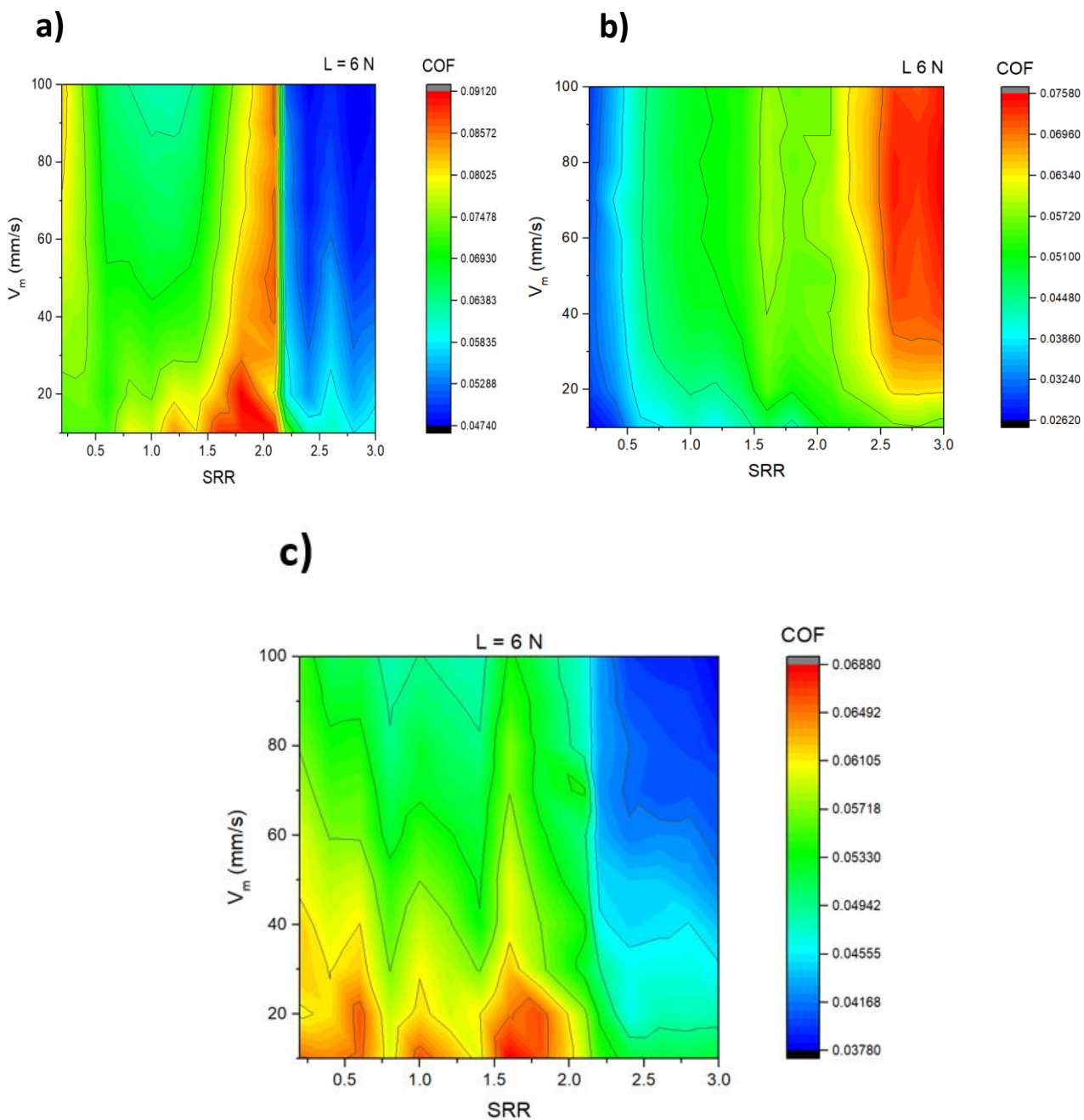


Fig. 5.2. Superficies de respuesta del COF para la carga de 6 N al tener una a) superficie lisa de UHMWPE lubricada con suero bovino, b) superficie lisa de UHMWPE lubricada con agua destilada y c) superficie texturizada de UHMWPE lubricada con suero bovino.

6. Conclusiones

Los polímeros tienen una resistencia al desgaste relativamente baja, por lo cual es necesario incrementar la resistencia al desgaste del UHMWPE mediante el texturizado superficial para mejorar el régimen de lubricación, a continuación, se listan las conclusiones generales de esta investigación son las siguientes:

- La tendencia del COF observada en las gráficas de la Fig. 4.11 se debe al lubricante utilizado que es un fluido Newtoniano sobre el par tribológico (disco liso de UHMWPE y bola de acero inoxidable 316L), por eso el COF incrementa conforme se incrementa el SRR (0.2 a 3; en incrementos de 0.2) y la V_m (10 a 100 mm/s; en incrementos de 10 mm/s).
- El utilizar cavidades grandes para el texturizado superficial sobre la superficie del UHMWPE y lubricar con agua destilada, demostró que no existe una reducción en el COF.
- El texturizado superficial para cavidades grandes no ayuda en la reducción del COF al lubricar con suero bovino.
- La reducción más evidente del COF al utilizar microcavidades (en un rango de 50 a 100 μm) es cuando se aplican cargas mayores a 2 N, como 6 y 10 N, lubricando las superficies con suero bovino.
- Los espectros de absorción del suero bovino nos revelan que para la carga de 2 N presentan una absorbancia mucho menor para la longitud de onda de (400 nm) en comparación con la absorbancia para la carga de 10 N.
- Se demostró que utilizar microcavidades de geometría circular sobre la superficie del UHMWPE hace que el material sea menos hidrófobo, ayudando a guardar el lubricante promoviendo un mejor régimen de lubricación, lo cual ayuda en la reducción del COF.
- Al utilizar una superficie texturizada (con microcavidades diámetros de 50 a 100 μm y profundidades de 50 y 100 μm) de UHMWPE lubricada con suero bovino los parámetros de L, V_m y SRR tienen importancia en el incremento del COF, esto es, la SRR y la V_m representan un efecto directo en el incremento del COF al mantener fijo el valor de carga, por el contrario, al utilizar una superficie lisa de UHMWPE lubricada con un fluido Newtoniano los parámetros más representativos en el incremento del COF son la carga con una relación inversa y la V_m con efecto directo.

- Al utilizar texturizado superficial (cavidades grandes 350 a 450 μm) sobre el UHMWPE y lubricar con agua destilada, las cavidades no funcionan como reserva de lubricante, se demostró que las cavidades funcionan como obstáculos a medida que se incrementa la velocidad por eso el COF es mayor en comparación con una superficie lisa.

7. Referencias

1. Stachowiak GW, Batchelor AW. Engineering Tribology. Fourth. Stachowiak GW, Batchelor AW, editors. Elsevier; 2014.
2. Deters L. Tribology. In: Grote K, Antonsson E, editors. Springer Handbook Mechanical Engineering. Springer; 2008. p. 295–320.
3. Hamrock BJ, Schmid SR. Fundamentals of Fluid Film Lubrication. Second. 2004.
4. Friedrich K. Polymer composites for tribological applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2018;1:3–39.
5. Lusitâneo D, Macuvele P, Nones J, Matsinhe J V, Lima MM, Soares C, et al. Advances in ultra high molecular weight polyethylene / hydroxyapatite composites for biomedical applications : A brief review ☆. *Material Science and Engineering C*. Elsevier B.V.; 2017;76:1248–62.
6. Bian YY, Zhou L, Zhou G, Jin ZM, Xin SX, Hua ZK, et al. Study on biocompatibility, tribological property and wear debris characterization of ultra-low-wear polyethylene as artificial joint materials. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. Elsevier Ltd; 2018;82:87–94.
7. Gallo J, Goodman SB, Konttinen T, Wimmer A, Holinka M. Osteolysis around total knee arthroplasty: A review of pathogenetic mechanisms. *Acta Biomaterialia*. 2013;9:8046–58.
8. Ruggiero A, D'Amato R, Gómez E, Merola M. Experimental comparison on tribological pairs UHMWPE/TiAl6V4 alloy, UHMWPE/AISI316L austenitic stainless and UHMWPE/Al₂O₃ceramic, under dry and lubricated conditions. *Tribology International* [Internet]. Elsevier; 2016;96:349–60. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2015.12.041>
9. Honggang W, Junfang R, Gui G, Shengsheng C, Jinqing W, Honggang W, et al. Effect of Compatibilization on Reciprocating Frictional Behavior of Polyamide 66 / UHMWPE Blends Effect of Compatibilization on Reciprocating Frictional Behavior of. *Tribology Transactions*. 2016;59:560–8.
10. Kurtz SM. UHMWPE Biomaterials Handbook. Third. Kurtz SM, editor. Elsevier; 2016.
11. Mohammed AS. UHMWPE Nanocomposite Coatings Reinforced with. *Coatings*. 2018;18–26.
12. Ramesh A, Akram W, Mishra SP, Cannon AH, Polycarpou AA, King WP. Friction characteristics of microtextured surfaces under mixed and hydrodynamic lubrication. *Tribology International* [Internet]. Elsevier; 2013;57:170–6. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2012.07.020>
13. de la Guerra Ochoa E, Otero JE, Tanarro EC, Morgado PL, Lantada AD, Munoz-Guijosa JM, et al. Optimising lubricated friction coefficient by surface texturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2013;227:2610–9.

14. Segu DZ, Choi SG, Choi J hyouk, Kim SS. The effect of multi-scale laser textured surface on lubrication regime. *Applied Surface Science* [Internet]. Elsevier B.V.; 2013;270:58–63. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.12.068>
15. Ibatan T, Uddin MS, Chowdhury MAK. Recent development on surface texturing in enhancing tribological performance of bearing sliders. *Surface and Coatings Technology* [Internet]. Elsevier B.V.; 2015;272:102–20. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.04.017>
16. Wang X, Adachi K, Otsuka K, Kato K. Optimization of the surface texture for silicon carbide sliding in water. 2006;253:1282–6.
17. Zhang YL, Zhang XG, Matsoukas G. Numerical study of surface texturing for improving tribological properties of ultra-high molecular weight polyethylene. *Biosurface and Biotribology* [Internet]. Elsevier; 2015;1:270–7. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S240545181500063X>
18. Uddin MS, Liu YW. Design and optimization of a new geometric texture shape for the enhancement of hydrodynamic lubrication performance of parallel slider surfaces. *Biosurface and Biotribology*. Elsevier; 2016;2:59–69.
19. Chyr A, Qiu M, Speltz JW, Jacobsen RL, Sanders AP, Raeymaekers B. A patterned microtexture to reduce friction and increase longevity of prosthetic hip joints. *Wear*. Elsevier; 2014;315:51–7.
20. Qiu M, Chyr A, Sanders AP, Raeymaekers B. Designing prosthetic knee joints with bio-inspired bearing surfaces. *Tribology International*. Elsevier; 2014;77:106–10.
21. Cho M, Choi H-J. Optimization of Surface Texturing for Contact Between Steel and Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Under Boundary Lubrication. *Tribology Letters* [Internet]. 2014;56:409–22. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s11249-014-0418-9>
22. López-Cervantes A, Domínguez-López I, Barceinas-Sánchez JDO, García-García AL. Effects of surface texturing on the performance of biocompatible UHMWPE as a bearing material during in vitro lubricated sliding/rolling motion. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2013;20:45–53.
23. Montoya-Santiyanes LA. Efecto de la concentración de ácido hialurónico sobre la viscosidad y el coeficiente de tracción entre una bola de acero y un disco texturizado de UHMWPE bajo condiciones dinámicas del ciclo de marcha de una prótesis de rodilla. IPN CICATA QRO; 2014.
24. Singh Y, Farooq A, Raza A, Mahmood MA, Jain S. Sustainability of a non-edible vegetable oil based bio-lubricant for automotive applications: A review. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017;111:701–13.
25. Singh P, Goel V. Effect of bio-lubricant on wear characteristics of cylinder liner-piston ring and cam-tappet combination in simulated environment. *Fuel*. 2018;233:677–84.
26. Willing A. Lubricants based on renewable resources - an environmentally compatible alternative to mineral oil products. *Chemosphere*. 2001;43:89–98.

27. Luqman Hasan M, Afiqah Zainol Abidin N, Singh A. The rheological performance of guar gum and castor oil as additives in water-based drilling fluid. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5:21810–7.
28. Papakonstantinou E, Roth M, Karakiulakis G. Hyaluronic acid A key molecule in skin aging. *Dermato-Endocrinology*. 2012;4:253–8.
29. Kogan G, Šoltés L, Stern R, Gemeiner P. Hyaluronic acid: A natural biopolymer with a broad range of biomedical and industrial applications. *Biotechnology Letters*. 2007;29:17–25.
30. Brown SS, Clarke IC. A Review of Lubrication Conditions for Wear Simulation in Artificial Hip Replacements. *Tribology Transactions* [Internet]. 2007;49:72–8. Available from: <https://doi.org/10.1080/05698190500519223>
31. Bortel E, Charbonnier B, Heuberger R. Development of a Synthetic Synovial Fluid for Tribological Testing. *Lubricants*. 2015;3:664–86.
32. Harsha AP, Joyce TJ. Challenges associated with using bovine serum in wear testing orthopaedic biopolymers. *ProcIMEchE Part H: J Engineering in Medicine* [Internet]. 2011;225:948–58. Available from: <https://doi.org/10.1177/0954411911416047>
33. Binette JP, Schmid K. The Proteins of Synovial Fluid : A Study of the α_1/α_2 Globulin Ratio. *Athritis and Rheumatism*. 1965;8:14–28.
34. ISO. ISO 14243-3 Implants for surgery-Wear of total knee-joint prostheses - Part 3: Loading and displacement control and corresponding environmental conditions for test. *International Standard*. 2014;Second edi:1–16.
35. Wang A, Essner A, Schmidig G. The effects of lubricant composition on in vitro wear testing of polymeric acetabular components. *Journal of Biomedical Materials Research* [Internet]. 2004;68B:45–52. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/jbm.b.10077>
36. Scholes SC, Unsworth A. The tribology of metal-on-metal total hip replacements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. 2006;220:183–94.
37. Ibrahim MZ, Sarhan AAD, Yusuf F, Hamdi M. Biomedical materials and techniques to improve the tribological, mechanical and biomedical properties of orthopedic implants – A review article. *Journal of Alloys and Compounds*. Elsevier B.V; 2017;714:636–67.
38. Kunčická L, Kocich R, Lowe TC. Advances in metals and alloys for joint replacement. *Progress in Materials Science* [Internet]. 2017;88:232–80. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079642517300361>
39. Zappone B, Ruths M, Greene GW, Jay GD, Israelachvili JN. Adsorption, lubrication, and wear of lubricin on model surfaces: Polymer brush-like behavior of a glycoprotein. *Biophysical Journal*. Elsevier; 2007;92:1693–708.

40. Corvelli M, Che B, Saeui C, Singh A, Elisseeff J. Biodynamic performance of hyaluronic acid versus synovial fluid of the knee in osteoarthritis. *Methods* [Internet]. Elsevier Inc.; 2015;84:90–8. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1046202315001255>
41. Kobayashi M, Koide T, Hyon SH. Tribological characteristics of polyethylene glycol (PEG) as a lubricant for wear resistance of ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE) in artificial knee joint. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* [Internet]. Elsevier; 2014;38:33–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmbbm.2014.06.003>
42. Wang A, Essner A, Stark C, Dumbleton JH. Comparison of the size and morphology of UHMWPE wear debris produced by a hip joint simulator under serum and water lubricated conditions. *Biomaterials*. 1996;17:865–71.
43. Gale LR, Coller R, Hargreaves DJ, Hills BA, Crawford R. The role of SAPL as a boundary lubricant in prosthetic joints. *Tribology International*. 2007;40:601–6.
44. Hills BA. Boundary lubrication in vivo. *Journal of Engineering in Medicine* [Internet]. 2000;214:83–94. Available from: <https://doi.org/10.1243/0954411001535264>
45. Serro AP, MP G, MC M, P B, R C, B S. Adsorption of albumin on prosthetic materials: Implication for tribological behavior. *Biomed Mater*. 2006;33:581–9.
46. Mishina H, Kojima M. Changes in human serum albumin on arthroplasty frictional surfaces. *Wear* [Internet]. 2008;265:655–63. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.12.006>
47. Roba M, Naka M, Gautier E, Spencer ND, Crockett R. The adsorption and lubrication behavior of synovial fluid proteins and glycoproteins on the bearing-surface materials of hip replacements. *Biomaterials* [Internet]. Elsevier Ltd; 2009;30:2072–8. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S014296120801065X>
48. Nečas D, Vrbka M, Urban F, Křupka I, Hartl M. The effect of lubricant constituents on lubrication mechanisms in hip joint replacements. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* [Internet]. 2016;55:295–307. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1751616115004245>
49. McClellan SJ, Franses EI. Adsorption of bovine serum albumin at solid/aqueous interfaces. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2005;260:265–75.
50. Myant C, Underwood R, Fan J, Cann PM. Lubrication of metal-on-metal hip joints: The effect of protein content and load on film formation and wear. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* [Internet]. Elsevier Ltd; 2012;6:30–40. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1751616111002426>
51. Mavraki A, Cann PM. Friction and lubricant film thickness measurements on simulated synovial fluids. *ImechE*. 2009;223:325–35.

52. Prekasan D, Saju KK. Review of the Tribological Characteristics of Synovial Fluid. *Procedia Technology* [Internet]. The Author(s); 2016;25:1170–4. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.235>
53. Lacroix D, Planell J. Joint Biomechanics. In: Narayan R, editor. *Biomedical Materials* [Internet]. Boston, MA: Springer US; 2009. p. 147–50. Available from: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-84872-3>
54. Wang A, Essner A, Schmidig G. The Effects of Lubricant Composition on in Vitro Wear Testing of Polymeric Acetabular Components. *Biomedical Materials* [Internet]. 2003;168:45–52. Available from: <https://doi.org/10.1002/jbm.b.10077>
55. Davies D V. Paper 7: Properties of synovial fluid. ARCHIVE: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings 1964-1970 (vols 178-184), Various titles labelled Volumes A to S [Internet]. 1966;181:25–9. Available from: https://doi.org/10.1243/PIME_CONF_1966_181_203_02
56. Brandt JM. *Wear and Boundary Lubrication in Modular Total Knee Replacements*. University of Waterloo. University of Waterloo; 2008.
57. Biowest. Certificate of Analysis Fetal Bovine Serum (Mexico, USDA approved) [Internet]. 2017. 2017. p. 3021609. Available from: <https://www.biowest.net/>
58. Joyce TJ. Wear tests of orthopaedic biopolymers with the biolubricant augmented by a visco-supplement. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology [Internet]. 2009;223:297–302. Available from: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1243/13506501JET480>
59. Smith AM, Fleming L, Wudebwe U, Bowen J, Grover LM. Development of a synovial fluid analogue with bio-relevant rheology for wear testing of orthopaedic implants. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* [Internet]. Elsevier; 2014;32:177–84. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmbbm.2013.12.009>
60. Garcia-Garcia AL, Alvarez-Vera M, Montoya-Santiyanes LA, Dominguez-Lopez I, Montes-Seguedo JL, Sosa-Savedra JC, et al. Regression models to predict the behavior of the coefficient of friction of AISI 316L on UHMWPE under ISO 14243-3 conditions. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* [Internet]. 2018;82:248–56. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1751616118304065>
61. Yao JQ, Laurent MP, Johnson TS, Blanchard CR, Crowninshield RD. The influences of lubricant and material on polymer/CoCr sliding friction. *Wear* [Internet]. 2003;255:780–4. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164803001807>
62. Mavraki A, Cann PM. Lubricating film thickness measurements with bovine serum. *Tribology International* [Internet]. Elsevier; 2011;44:550–6. Available from:

- <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X10001775>
63. Petsko G, Ringe D. Protein structure and function. New Science Press Ltd; 2004.
 64. Vaclavik V, Christian E. Part III Proteins. In: Vaclavik V, Christian E, editors. Essentials of food science. Third. Springer; 2008. p. 43.
 65. Frauenfelder H. Myoglobin as an example of protein complexity. Chemical Physics. Elsevier B.V.; 2010;375:612–5.
 66. Whitford D. Proteins structure and function. Wiley; 2005.
 67. Neurath H, Greenstein JP, Putnam FW, Erickson JO. The chemistry of protein denaturation. Chemical Reviews. 1944;34:157–265.
 68. Held P. Quantitation of Peptides and Amino Acids with a Synergy™ HT using UV Fluorescence. BioTek Application Note. 2006;1–8.
 69. Stachowiak GW, Batchelor AW. Hydrodynamic Lubrication. In: Stachowiak GW, Batchelor AW, editors. Engineering Tribology. Tribology. Elsevier; 1993. p. 218–20.
 70. Davim PJ. Tribology for Engineers 1st Edition A Practical Guide. Woodhead P. 2011.
 71. Hori Y. Hydrodynamic Lubrication. In: Hori Y, editor. October. Springer; 2006.
 72. Myant C, Cann P. Review Article On the matter of synovial fluid lubrication: Implications for Metal-on-Metal hip tribology. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials [Internet]. Elsevier; 2014;34:338–48. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S175161611300427X>
 73. Fowell MT, Myant C, Spikes HA, Kadiric A. A study of lubricant film thickness in compliant contacts of elastomeric seal materials using a laser induced fluorescence technique. Tribology International [Internet]. Elsevier; 2014;80:76–89. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2014.05.028>
 74. Mattei L, Di Puccio F, Piccigallo B, Ciulli E. Lubrication and wear modelling of artificial hip joints: A review. Tribology International [Internet]. Elsevier; 2011;44:532–49. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X10001647>
 75. Szeri AZ, Spencer RL, Engineer- M, Engineering M. Fluid Film Lubrication Theory & Design. 1998.
 76. Dowson D, Higginson GR. A numerical solution to the elasto-hydrodynamic problem. Journal of Mechanical Engineering Science. 1959;1:15.
 77. Bhushan B. Introduction to tribology. Second. 2013.
 78. Bannister KE. Lubrication Theory. In: Bannister KE, editor. Lubrication for industry. Industrial Press; 1996. p. 9–28.
 79. Hsu SM, Gates RS. Boundary lubricating films: Formation and lubrication mechanism. Tribology International. 2005;38:305–12.

80. Khonsari MM, Booser ER. Applied Tribology Bearing design and lubrication. John Wiley & Sons, Inc; 2001.
81. Björling M. Friction in elasto-hydrodynamic lubrication. Luleå University of Technology; 2014.
82. Arthur P, Schmidt RJ, Hayton J, Hepburn K. Second Moment (Moment of Inertia) of a Plane Area. Advanced Mechanics of Materials. 2003.
83. Johnson KL. Normal contact of elastic solids- Hertz theory. In: Johnson KL, editor. Contact Mechanics. Cambridge University Press; 1985. p. 84–144.
84. Shigley JE. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. 8th ed. Budynas RG, Nisbett JK, editors. McGraw-Hill Interamericana; 2008.
85. Borezi AP, Schmidt RJ. Advanced Mechanics. Hayton J, editor. Advanced Mechanics. Oxford University Press; 2003.
86. Křen J, Hynčík L. Modelling of non-Newtonian fluids. Mathematics and Computers in Simulation [Internet]. 2007;76:116–23. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2007.01.006>
87. Liddle AD, Pegg EC, Pandit H. Knee replacement for osteoarthritis. Maturitas. Elsevier Ireland Ltd; 2013;75:131–6.
88. Citters DW Van, Kennedy FE, Currier JH, Collier JP, Nichols TD. A Multi-Station Rolling / Sliding Tribotester for Knee Bearing. Spectroscopy [Internet]. 2004;126:380–5. Available from: <https://doi.org/10.1115/1.1645536>
89. Flannery M, Jones E, Birkinshaw C. Compliant layer knee bearings. Part I: Friction and lubrication. Wear [Internet]. 2010;269:325–30. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.04.001>
90. Saikko V, Vuorinen V, Revitzer H. Analysis of UHMWPE wear particles produced in the simulation of hip and knee wear mechanisms with the RandomPOD system. Biotribology [Internet]. Elsevier B.V.; 2015;1–2:30–4. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.biotri.2015.03.002>
91. Kennedy FE, Wongseedakaew K, McHugh DJ, Currier JH. Tribological conditions in mobile bearing total knee prostheses. Tribology International [Internet]. Elsevier; 2013;63:78–88. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.03.011>
92. Mongkolwongrojn M, Wongseedakaew K, Kennedy FE. Transient elastohydrodynamic lubrication in artificial knee joint with non-Newtonian fluids. Tribology International. Elsevier; 2010;43:1017–26.
93. Blunn GW, Joshi AB, Minns RJ, Lidgren L, Lilley P, Ryd L, et al. Wear in retrieved condylar knee arthroplasties: A comparison of wear in different designs of 280 retrieved condylar knee prostheses. Journal of Arthroplasty [Internet]. 1997;12:281–90. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0883-5403\(97\)90024-3](https://doi.org/10.1016/S0883-5403(97)90024-3)
94. Brandt J-M, Brière LK, Marr J, MacDonald SJ, Bourne RB, Medley JB. Biochemical comparisons of

osteoarthritic human synovial fluid with calf sera used in knee simulator wear testing. *Journal of Biomedical Materials Research Part A* [Internet]. 2010;9999A:NA-NA. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/jbm.a.32728>

95. Hamilton DB, Walowit JA, Allen CM. A Theory of Lubrication by Micro-irregularities. *Journal of Basic engineering* [Internet]. 1966;88:177–85. Available from: http://pij.sagepub.com/lookup/doi/10.1177/1350650116652286%5Cnhttp://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X16301566%5Cnhttp://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X16301074%5Cnhttp://www.im.ugal.ro/AnnalsFasc8Tribology/pdf/2008/030_TalaIgh

96. Borjali A, Langhorn J, Monson K, Raeymaekers B. Using a patterned microtexture to reduce polyethylene wear in metal-on-polyethylene prosthetic bearing couples. *Wear* [Internet]. Elsevier B.V.; 2017;392–393:77–83. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2017.09.014>

97. Hussain M, Sufyan M, Abbas N, Ahmad H, Joyia FM, Noman M, et al. Influence of laser processing conditions for texturing on ultra-high-molecular-weight-polyethylene (UHMWPE) surface. *Case Studies in Thermal Engineering* [Internet]. 2019;14:100491. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214157X19301212>

98. Gropper D, Wang L, Harvey TJ. Hydrodynamic lubrication of textured surfaces : A review of modeling techniques and key findings. *Tribology International*. 2016;94:509–29.

99. L.C. Passos M, M.F.S. Saraiva ML. Detection in UV-visible spectrophotometry: Detectors, detection systems, and detection strategies. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 2019;135:896–904.

100. JASCO. Theory of UV-Visible Spectroscopy (The Basics) [Internet]. 2021. Available from: <https://jascoinc.com/products/spectroscopy/uv-visible-nir-spectrophotometers/>

101. López Cervantes A. Texturizado de UHMWPE para la reducción de articulación de rodilla. IPN unidad CICATA Qro.; 2010.

102. Dowson D. Elastohydrodynamic and micro-elastohydrodynamic lubrication. *Wear*. 1995;190:125–38.

103. Vicente J De. Behaviour of complex fluids between highly deformable surfaces: isoviscous elastohydrodynamic lubrication. *MariecurieOrg* [Internet]. 2005; Available from: <http://www.mariecurie.org/annals/volume4/phy1.pdf>

104. Barceinas-Sanchez JDO, Alvarez-Vera M, Montoya-Santiyanes LA, Dominguez-Lopez I, Garcia-Garcia AL. The coefficient of friction of UHMWPE along an entire walking cycle using a ball-on-disc tribometer under arthrokinematics and loading conditions prescribed by ISO 14243-3:2014. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* [Internet]. Elsevier; 2017;65:274–80. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.08.032>

105. ISO. ISO 14243-3 (en) Implants for surgery - Wear of total knee-joint prostheses- Part 3: Loading and

displacement parameters for wear-testing machines with displacement control and corresponding environmental conditions for test. International Organization. 2014;1–16.

106. Myant C, Cann P. On the matter of synovial fluid lubrication : Implications for Metal-on-Metal hip tribology. Mechanical behavior of biomedical materials. 2014;34:338–48.

107. Stevenson H, Cann PM. Protein Content of Model Synovial Fluid and CoCrMo Wear. Biotribology. 2021;26.

108. Martin RB, Burr DB, Sharkey NA, Fyhrie DP. Synovial Joint Mechanics. Skeletal Tissue Mechanics. Springer; 2015. p. 227–67.

109. Shen G, Fang F, Kang C. Tribological Performance of Bioimplants: A Comprehensive Review. Nami Jishu yu Jingmi Gongcheng/Nanotechnology and Precision Engineering. 2018;1:107–22.