

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUAR EL COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DE ACEITES LUBRICANTES ADITIVADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ZrO_2

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por el Bachiller

Meléndez Gambino, Reinaldo Andrés

Para optar al título de Ingeniero Mecánico

Caracas 2014

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUAR EL COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DE ACEITES LUBRICANTES ADITIVADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ZrO_2

Tutor académico: Prof. Yucelys Santana

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por el Bachiller

Meléndez Gambino, Reinaldo Andrés

Para optar al título de Ingeniero Mecánico

Caracas 2014

DEDICATORIA

Este trabajo así como la culminación de mi carrera va dedicado principalmente a Dios y mi familia, quienes son los que día a día me dieron apoyo para lograr esta nueva etapa.

En especial dedico este trabajo a una persona, quien me acompaña a diario y me da fuerzas para seguir adelante, mi primo José Miguel Ponte Martínez que donde quiera que esté, su apoyo nunca me falta.

Por último se lo dedico a mis compañeros de estudios y amigos de la infancia que de una u otra manera han influido en la persona que hoy soy.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecerle a la ilustre Universidad Central de Venezuela, especialmente a la Facultad de Ingeniería, por todos estos maravillosos años de enseñanza y aprendizaje, sin duda mi segundo hogar.

Gracias a mi tutora académica Dra. Yucelys Santana que a pesar de la distancia siempre supo cómo darme apoyo y guiarme durante toda la realización del trabajo.

Un agradecimiento especial a la Universidad de Oviedo en España, por todos los recursos disponibles y en especial a su equipo de trabajo, dirigido por el Dr. Antolín Hernández Battez, el Dr. Rubén González y el Dr. José Luis Viesca, los cuales me brindaron toda su confianza y aportaron todos sus conocimientos en todo momento para realizar un trabajo de calidad.

Finalmente quiero agradecer al Dr. Crisanto Villalobos por su apoyo en todo momento y por su confianza durante la realización del trabajo.

RESUMEN

MELÉNDEZ G. REINALDO A.

EVALUAR EL COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DE ACEITES LUBRICANTES ADITIVADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ZrO_2

**Tutor académico Prof. Yucelys Santana. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad
de Ingeniería. Escuela de Mecánica. 2014, 113 páginas.**

**Palabras Claves: Tribología, Lubricantes, Tribómetro, Coeficiente de
Fricción, Desgaste**

Se realizó un estudio del comportamiento de distintos aceites lubricantes los cuales se les agregó nanopartículas de ZrO_2 como aditivo. Para ello se utilizaron dos tipos de lubricantes, un aceite base y un aceite formulado Telex, ambos a tres distintas viscosidades ISO 32, 46 y 68 insertando en los mismos nanopartículas de ZrO_2 en dos concentraciones diferentes 0,5 y 2% en peso, realizando luego ensayos tribológicos en el tribómetro TE53SLIM en configuración bloque-anillo a una sola condición de ensayo de una carga de 165 N, una velocidad de giro de 300 rpm, un tiempo total de ensayo de 1530 seg. y finalmente una temperatura del lubricante de 25 °C. Luego de realizado el ensayo tribológico se analizó la superficie mediante microscopia confocal midiendo el volumen desgastado en la superficie del bloque, seguido de un análisis mediante microscopia electrónica de barrido y espectrometría de energía por dispersión para observar comportamiento y porcentaje de nanopartículas alojada en la superficie desgastada. Al contrastar los ensayos realizado con los lubricantes en su estado puro y los lubricantes con aditivos de nanopartículas, se ve una clara reducción tanto del coeficiente de fricción como del volumen de desgaste actuando así de manera favorable las nanopartículas en la superficie de contacto. Para los aceites de viscosidad 32 se observa que 2% de nanopartículas fue la mezcla que obtuvo mejor comportamiento tribológico al igual que en la viscosidad 46. Sin embargo para la viscosidad ISO 68 se indica un resultado totalmente adverso, en donde se obtuvo que aumentó el volumen de desgaste.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
RESUMEN.....	V
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	4
FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.1. <i>Planteamiento del problema</i>	4
1.2. <i>Objetivo general</i>	5
1.2.1 <i>Objetivos específicos</i>	5
ANTECEDENTES	6
CAPÍTULO II.....	12
MARCO TEÓRICO.....	12
2.1 <i>Tribología</i>	12
2.2 <i>Fricción</i>	13
2.2.1 <i>Fricción por deslizamiento</i>	14
2.2.2 <i>Fricción por rodadura</i>	15
2.2.3 <i>Fenómenos relativos a la fricción</i>	17
2.3 <i>Desgaste</i>	18
2.3.1 <i>Desgaste adhesivo</i>	21
2.3.2 <i>Desgaste abrasivo</i>	23
2.3.3 <i>Desgaste corrosivo</i>	26
2.3.4 <i>Desgaste por fatiga</i>	30
2.4 <i>Lubricación</i>	32
2.4.1 <i>Lubricantes líquidos y sus propiedades</i>	33
2.4.2 <i>Aceites minerales</i>	34

2.4.2.1	Fabricación de aceites minerales.....	34
2.4.3	Tipos de aceites minerales.....	35
2.4.4	Aceites sintéticos	36
2.4.4.1	Fabricación de aceites sintéticos	38
2.4.5	Aditivos y Formulación de lubricantes	39
2.4.5.1	Aditivos de Adsorción o Modificadores de Fricción	41
2.4.5.2	Aditivos Antioxidantes.....	42
2.4.5.3	Aditivos Controladores de la Corrosión.....	43
2.4.5.4	Aditivos de Control de Contaminación	44
2.4.5.5	Aditivos Mejoradores de la Viscosidad.....	45
2.4.5.6	Aditivos Depresores del Punto de Congelación	46
2.4.5.7	Aditivos Inhibidores de Espumas	46
2.4.5.8	Aditivos Antidesgaste (AW).....	46
2.4.5.9	Aditivos de Extrema Presión (EP)	48
2.4.6	Diagrama de Stribeck.....	49
2.4.7	Lubricantes con películas delgadas.....	52
2.4.8	Lubricantes con películas solidas	52
2.4.9	Densidad del lubricante y gravedad específica.....	52
2.4.10	Propiedades térmicas de los lubricantes	53
2.4.11	Características de la temperatura de los lubricantes	55
2.5	<i>Viscosidad</i>	57
2.6	<i>Nano materiales y Nanopartículas</i>	57
2.6.1	Uso de Nanopartículas como aditivos AW y EP	58
CAPÍTULO III.....		60
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL		60
3.1	<i>Materiales utilizados</i>	61
3.1.2	Nanopartículas	63
3.1.3	Probetas.....	63
3.2	<i>Preparación de las suspensiones</i>	64

3.3 <i>Evaluación Tribológica</i>	66
3.3.1 Procedimiento experimental	66
3.3.2 Volumen de Desgaste	68
3.3.3 Microscopio	68
3.3.4 Microscopio SEM – EDS	69
CAPITULO IV	70
PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	70
4.2 <i>Ensayos tribológicos bloque-anillo de aceites bases y formulados con viscosidades ISO 32, 46 y 68</i>	70
4.2.1 Coeficiente de fricción aceite base y aceite formulado (Telex) .	70
4.2.2 Volumen de desgaste aceite base y formulado	72
4.3 <i>Ensayos tribológicos bloque-anillo de aceites base y formulados con nanopartículas de ZrO₂ a una viscosidad ISO 32</i>	74
4.3.1 Coeficiente de fricción aceite base y formulado de viscosidad ISO 32.....	74
4.3.2 Volumen de desgaste aceite base y formulado de viscosidad ISO 32.....	76
4.4 <i>Ensayos tribológicos bloque-anillo de aceite base y formulados con nanopartículas de ZrO₂ a una viscosidad ISO 46</i>	79
4.4.1 Coeficiente de fricción aceite base y formulado a ISO 46.....	79
4.4.2 Volumen de desgaste aceite base y formulado viscosidad ISO 46	82
4.5 <i>Ensayos tribológicos bloque-anillo de aceite base y formulados con nanopartículas de ZrO₂ a una viscosidad ISO 68</i>	84
4.5.1 Coeficiente de fricción aceite base y formulado viscosidad ISO 68.....	84
4.5.2 Volumen de desgaste aceite base y formulado viscosidad ISO 68	87
4.6 <i>Análisis superficial</i>	89

4.6.1 Huellas de desgaste para Aceite Base y Aceite Telex.....	89
4.6.2 Composición del Aceite Formulado utilizado en los ensayos....	91
4.6.3 Superficies desgastadas usando aceite base y Telex de viscosidad ISO 32 con nanopartículas de ZrO ₂	91
4.6.4 Aglomeración de nanopartículas usando aceite base viscosidad ISO 32 con nanopartículas de ZrO ₂	95
4.6.5 Superficies desgastadas aceite base y Telex viscosidad ISO 46	96
4.6.6 Superficies desgastadas con aceite base y telex viscosidad ISO 68.....	98
CAPITULO V	102
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	102
CAPITULO VI	104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fuerza friccional (FR) de resistencia al movimiento.....	14
Figura 2. Esfera en rodadura sobre superficie plana.....	16
Figura 3. Diferentes tipos de desgaste.....	20
Figura 4. Desgaste adhesivo	21
Figura 5. Árbol de acero + Cromo duro. Cojinete de grafito llenado con metal. Entorno: agua. $V = 2$ m/s, $P = 1$ MPa (transferencia de metal/cromo).	22
Figura 6. Árbol de acero templado carburado. Cojinete de hierro fundido. Movimiento de oscilación. Entorno: gas butano. $V = 0.037$ m/s, $P = 8$ MPa. 22	
Figura 7. Abrasión con dos y tres cuerpos	23
Figura 8. Desgaste por abrasión. Ejemplos de manifestaciones	24
Figura 9. Influencia de la dureza del abrasivo en el desgaste de los metales.	25
Figura 10. Apariencia de partículas de desgaste corrosivo.	27
Figura 11. Relación entre corrosión y desgaste.	28
Figura 12. Desgaste por fretting. Ejemplos de manifestaciones.....	29
Figura 13. Desgaste por fatiga superficial. Ejemplos de manifestaciones. ...	30
Figura 14. Diagrama de Stribeck	50
Figura 15. Nanopartículas de ZrO_2	63
Figura 16 Nanopartículas de ZrO_2	63
Figura 17. Agitador por ultrasonidos.....	65
Figura 18. Balanza de precisión.....	65
Figura 19. Tribómetro TE53SLIM.....	67
Figura 20. Microscopio confocal LEICA 3D.....	68
Figura 21. Microscopio metalográfico	69
Figura 22. Microscopio electrónico de barrido.....	69
Figura 23. Coeficiente de fricción aceite base a distintas viscosidades	71
Figura 24. Coeficiente de fricción aceite telex a distintas viscosidades.....	71
Figura 25. Volumen de desgaste aceite base a distintas viscosidades	73

Figura 26. Volumen de desgaste aceite telex a distintas viscosidades	73
Figura 27. Coeficiente de fricción aceite base ISO 32 con nanopartículas de ZrO ₂ al 0,5% y al 2,0%	75
Figura 28. Coeficiente de fricción aceite telex ISO 32 con nanopartículas de ZrO ₂ al 0,5% y al 2,0%	75
Figura 29. Reducción del coeficiente de fricción al aditivar el aceite telex ISO 32 con nanopartículas de ZrO ₂ al 0,5% y al 2,0%	76
Figura 30. Volumen de desgaste aceite base ISO 32 con nanopartículas de ZrO ₂ al 0,5% y al 2,0%	77
Figura 31. Reducción del volumen de desgaste al aditivar el aceite base ISO 32 con nanopartículas de ZrO ₂ al 0,5% y al 2,0%	77
Figura 32. Volumen de desgaste aceite telex ISO 32 con nanopartículas de ZrO ₂ al 0,5% y al 2,0%	78
Figura 33. Comparación del volumen de desgaste aceite base ISO 32 y aceites telex ISO 32 con nanopartículas de ZrO ₂ al 0,5% y al 2,0%	78
Figura 34. Coeficiente de fricción aceite base ISO 46 con nanopartículas de ZrO ₂ al 0,5% y al 2,0%	80
Figura 35. Reducción del coeficiente de fricción al aditivar el aceite base ISO 46 con nanopartículas de ZrO ₂ al 0,5% y al 2,0%	80
Figura 36. Coeficiente de fricción aceite telex ISO 46 con nanopartículas de ZrO ₂ al 0,5% y al 2,0%	81
Figura 37. Reducción del coeficiente de fricción al aditivar el aceite telex ISO 46 con nanopartículas de ZrO ₂ al 0,5% y al 2,0%	81
Figura 38. Volumen de desgaste aceite base ISO 46 con nanopartículas de ZrO ₂ al 0,5% y al 2,0%	82
Figura 39. Reducción del volumen de desgaste al aditivar el aceite base ISO 46 con nanopartículas de ZrO ₂ al 0,5% y al 2,0%	83
Figura 40. Volumen de desgaste aceite telex ISO 46 con nanopartículas de ZrO ₂ al 0,5% y al 2,0%	83

Figura 41. Comparación del volumen de desgaste aceite base ISO 46 y aceites telex ISO 46 con nanopartículas de ZrO ₂ al 0,5% y al 2,0%.....	84
Figura 42. Coeficiente de fricción aceite base ISO 68 con nanopartículas de ZrO ₂ al 0,5% y al 2,0%.....	85
Figura 43. Reducción del coeficiente de fricción al aditivar el aceite base ISO 68 con nanopartículas de ZrO ₂ al 0,5% y al 2,0%	85
Figura 44. Coeficiente de fricción aceite telex ISO 68 con nanopartículas de ZrO ₂ al 0,5% y al 2,0%.....	86
Figura 45. Coeficiente de fricción aceite telex ISO 68 con nanopartículas de ZrO ₂ al 0,5% y al 2,0%.....	86
Figura 46. Volumen de desgaste aceite base ISO 68 con nanopartículas de ZrO ₂ al 0,5% y al 2,0%.....	88
Figura 47. Volumen de desgaste aceite telex ISO 68 con nanopartículas de ZrO ₂ al 0,5% y al 2,0%.....	88
Figura 48. a) Huella de desgaste aceite base 32 b) Huella de desgaste aceite telex 32.....	89
Figura 49. a) Huella de desgaste aceite base 46 b) Huella de desgaste aceite telex 46	90
Figura 50. a) Huella de desgaste aceite base 68 b) Huella de desgaste aceite telex 68.....	91
Figura 51. Micrografía y Microanálisis de la huella de desgaste utilizando como lubricante Telex 32.....	92
Figura 52. Huella de desgaste aceite telex 32 + 0,5% de ZrO ₂	93
Figura 53. Huella de desgaste aceite telex 32 + 2% de ZrO ₂	93
Figura 54. Micrografía y Microanálisis de la huella de desgaste utilizando como lubricante Telex 32 + 0,5% ZrO ₂	94
Figura 55. Microanálisis de la huella de desgaste utilizando como lubricante Telex 32 + 0,5% ZrO ₂	95
Figura 56. Huella de desgaste aceite base 46 + 0,5% ZrO ₂	96

Figura 57. Micrografía y microanálisis de la huella de desgaste utilizando como lubricante Base 46 + 0,5% ZrO ₂	97
Figura 58. Huella de desgaste aceite base 46 + 2% ZrO ₂	97
Figura 59. Micrografía y microanálisis de la huella de desgaste utilizando como lubricante Base 46 + 2% ZrO ₂	98
Figura 60. Huella de desgaste aceite telex 68	99
Figura 61. Huella de desgaste aceite telex 68 + 0,5% ZrO ₂	99
Figura 62. Huella de desgaste aceite telex 68 + 2% ZrO ₂	100
Figura 63. Micrografía y microanálisis de la huella de desgaste utilizando como lubricante Telex 68 + 0,5% ZrO ₂	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades morfológicas de las nanopartículas utilizadas.	63
Tabla 2. Propiedades de las probetas.....	64
Tabla 3. Concentración superficial de nanopartículas de ZrO ₂	98
Tabla 4. Concentración superficial de ZrO ₂	101

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una sensibilidad social creciente centrada en el ahorro energético y en la obtención de energías no contaminantes, lo que se traduce en la mejora del rendimiento de los sistemas de producción, y en la generación de energías renovables, tales como la eólica, solar, entre otras. Dado que la fricción y el desgaste son las principales causas de la disipación de la energía en los sistemas mecánicos, es importante el empleo de una lubricación adecuada que permita el ahorro energético sustancial de los equipos y maquinarias utilizadas en las diferentes industrias a nivel mundial y más específicamente a nivel nacional. La innovación en el diseño de lubricantes está regida por la competencia a nivel industrial, centrada principalmente en la obtención de ventajas sobre la eficiencia operacional, la accesibilidad desde un punto de vista económico y la sostenibilidad ambiental.

Un lubricante es un producto formulado con una base de aceite, generalmente derivado del petróleo o también puede ser generado de manera sintética; adicionalmente contiene una serie de aditivos constituidos por compuestos que se incorporan en pequeñas cantidades, para obtener un producto terminado que posea unas determinadas características de antifricción y antidesgaste, así como una calidad adecuada para su aplicación. Estos aditivos tienden a ser compuestos que contienen cloro, azufre y fósforo, que están diseñados para reaccionar químicamente con las superficies metálicas formando capas de cloruros, sulfuros o fosfuros, con una baja resistencia al cizallamiento o esfuerzo de corte. Sin embargo, y debido precisamente a su composición tienen un alto impacto en el medio ambiente, por lo cual a nivel mundial, se está tendiendo a restringir su uso. El 13 % de los lubricantes utilizados en los procesos industriales acaban en el

vertedero, lo que representa, para países altamente industrializados, unas 300.000 toneladas anuales, tal es el caso de Alemania en donde se estima alrededor de 3,5 kg por persona, y a nivel mundial se han estimado 12 millones de toneladas anuales.

El empleo de aditivos en lubricantes es necesario para conferir nuevas propiedades a estos compuestos o mejorar las ya existentes y que son importantes para cumplir su tarea. Su empleo es fundamental en el sector industrial para minimizar la fuerza de fricción, el desgaste y los fenómenos destructivos de soldadura, rayado y desprendimiento de material de las superficies rodantes.

No obstante lo anterior, con una sociedad y poderes públicos cada vez más sensibilizados con la preservación del medio ambiente, hoy en día, de forma general no es suficiente con diseñar lubricantes capaces de trabajar de forma eficiente en los más exigentes y variados escenarios. Los nuevos lubricantes deben además ser ambientalmente aceptables, esto es, deben minimizar el impacto que sobre el medio provocan durante su fabricación, utilización, eliminación o valorización. En ese sentido, y desde hace algunos años, se están desarrollado potentes técnicas para evaluar el impacto ambiental durante todas las etapas del ciclo de vida de algunos productos.

Por lo tanto, la innovación en el diseño de lubricantes operativamente eficientes, a unos costes razonables y, sobre todo, ambientalmente sostenibles, constituye la fundamental fuente de ventajas competitivas, que se espera para los próximos años en la industria de la lubricación.

En la última década, ha existido un gran interés en el desarrollo de los llamados lubricantes híbridos, donde se incorporan nanopartículas (NP) de distinta composición, como aditivo al aceite base de dichos lubricantes. Los estudios realizados demuestran que, cuando se añaden pequeñas cantidades de determinadas nanopartículas, se produce una reducción

mensurable del coeficiente de fricción así como la mejora de las propiedades de antidesgaste del lubricante. La hipótesis más generalizada está enfocada al efecto de la formación de una película homogénea y mecánicamente resistente de nanopartículas, que actúa como un colchón o cojín denominado en la literatura como "nano-cojinetes", que permite reducir el contacto entre las superficies en contacto.

A pesar del número de trabajos publicados en los últimos años, en relación con la utilización de nanopartículas de distintas naturalezas; tanto orgánica (grafenos, fullerenos, teflón) como inorgánica (grafito, diamante, metales; sulfuros, fluoruros, boratos, óxidos e hidróxidos metálicos), como potenciales aditivos antidesgaste y de extrema presión, el uso de nanopartículas funcionalizadas ha sido mucho más limitado. La funcionalización ha demostrado ser efectiva no sólo para conseguir dispersiones más estables sino para potenciar las propiedades tribológicas (antifricción y antidesgaste).

De esta manera surge la necesidad de "Evaluar y Determinar el Comportamiento Tribológico de Sistemas Lubricantes Aditivados con Nanopartículas".

CAPÍTULO I

FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

Las pérdidas económicas que sufre un país industrializado debido al desgaste y a la corrosión de los materiales en los sistemas mecánicos, alcanzan el 4,5% del Producto Nacional Bruto. Históricamente se ha empleado la lubricación como la manera más efectiva de controlar el desgaste y reducir la fricción de las máquinas y rodamientos, empleando para ello algunos compuestos denominados lubricantes, los cuales cumplen la función de lubricación, mediante la formación de películas estables entre dos superficies próximas. La industria mecánica no sólo busca que sus componentes tengan mejores prestaciones sino que resulten también más confiables y duraderos. Así mismo, nuevos materiales con propiedades tribológicas más eficaces contribuirían también a salvaguardar el medio ambiente al reducir sustancialmente el consumo de materias primas y el uso de lubricantes muy contaminantes.

Se ha demostrado que una de las estrategias para la mejora de los lubricantes comerciales es la adición de nanopartículas, las cuales actúan como nano-cojinetes al formar una película que disminuye el contacto entre superficies. Si bien se ha demostrado la efectividad de las nanopartículas como aditivos en lubricantes, su transferencia a lubricantes comerciales no ha sido implementado, debido a problemas de agregación y estabilidad.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, en el presente estudio se pretende evaluar el comportamiento tribológico de sistemas lubricantes, aditivados con diferentes concentraciones de nanopartículas minerales, para la cual se plantean los siguientes objetivos:

1.2. Objetivo general

Evaluar el comportamiento tribológico de lubricantes comerciales con y sin aditivos modificados, agregando nanopartículas de ZrO_2 .

1.2.1 Objetivos específicos

1. Evaluar el comportamiento tribológico de los lubricantes base con y sin nanopartículas de ZrO_2 al 0.5% y 2%, mediante ensayos de configuración de bloque sobre anillos.
2. Evaluar el comportamiento tribológico de los lubricantes con aditivos, con y sin nanopartículas de ZrO_2 al 0.5% y al 2% mediante ensayos de configuración de bloque sobre anillos.
3. Determinar e interpretar el desgaste producido sobre la superficie del bloque y su relación con las nanopartículas de ZrO_2 .

ANTECEDENTES

A continuación se revisan una serie de trabajos relacionados con el tema bajo estudio, y que serán de referencia para la posterior interpretación de los resultados obtenidos. Es importante indicar que los estudios relacionados al uso de nano partículas como aditivos en los lubricantes, se ha incrementado en los últimos años, por lo cual la bibliografía es bastante reciente.

Martínez *et al.* 2006, trabajaron una formulación de lubricantes basada en nanopartículas metálicas para contactos eléctricos y procedimiento de preparación. En este estudio se puede encontrar lo referente a la preparación y el empleo de nanopartículas metálicas protegidas por una corteza orgánica como sistema para mejorar el comportamiento tribológico de superficies en contacto y en movimiento relativo. Su utilización tanto en forma pura como dispersa en un medio continuo, permite el paso de la corriente eléctrica a través del contacto que ejerce el efecto de lubricación. En el trabajo se indica que la absorción de las nanopartículas metálicas sobre las superficies en contacto incrementa la capacidad de carga y previene el desgaste sin deterioro del coeficiente de fricción.

He-long *et al.* 2007, estudiaron las propiedades tribológicas de fricción y desgaste de superficies modificadas con nanopartículas de Cu como aditivo de aceites. Se evaluó el efecto de la temperatura sobre las propiedades tribológicas de las nanopartículas de cobre mediante un tribómetro de 4 bolas. La morfología, distribución de las partículas y composición química de las superficies desgastadas se caracterizaron mediante MEB (microscopia electrónica de barrido), ERED (espectroscopía de rayos X por energía dispersiva) y EFR (espectroscopía fotoelectrónica de rayos X), respectivamente. Adicionalmente, para evaluar el mecanismo de las nanopartículas de Cu sobre el comportamiento tribológico, se utilizó un

equipo de nanoindentación, el cual permitió determinar las propiedades mecánicas de la superficie desgastada. Los resultados indicaron que a más alta temperatura se obtienen mejores propiedades tribológicas de las nanopartículas de Cu. Esto pudo ser inferido debido a la formación de una fina película protectora con los más bajos valores de módulo de elasticidad y dureza sobre la superficie desgastada, lo cual genera un buen desarrollo tribológico de las nanopartículas de Cu, especialmente a altas temperaturas.

Hernández *et al.* 2008, analizaron el comportamiento tribológico de nanopartículas de CuO, ZrO₂ y ZnO suspendidas en un aceite base de polialfa-olefinas (PAO 6) a tres concentraciones diferentes 0,5%, 1,0%, 2,0%. El ensayo se realizó en un tribómetro TE53SLIM en la configuración bloque-anillo, con una carga de 165 N, velocidad de deslizamiento de 2 m/s y una distancia total recorrida de 3066m. Como conclusión se obtuvo que todas las nanopartículas mostraron una reducción en el desgaste de la superficie, siendo la de ZnO y ZrO₂ al 0,5% en peso la que presentó el mejor comportamiento a nivel tribológico. Así mismo, el mecanismo de antidesgaste de las nanopartículas aditivadas puede ser explicado por el depósito de las mismas en la superficie de desgaste.

Chou *et al.* 2010, determinaron el comportamiento de nanopartículas de níquel en aceite base PAO6 estudiando su comportamiento tribológico mediante un tribómetro en configuración de bloque anillo para cargas medias, y en configuración de 4 bolas (ASTM D2783). Se analizó la superficie de desgaste mediante las técnicas de MEB y ERED. Se demuestra que las nanopartículas de níquel reducen la fricción e incrementa la capacidad de carga del aceite base. Esto es explicado debido a la deposición de nanopartículas en la superficie de desgaste.

Viesca *et al.* 2011, realizaron estudios de la influencia de nanopartículas de cobre de 25 nm, recubiertas con carbono en un aceite base de polialfaolefina

(PAO6) y compararon este comportamiento con nanopartículas de cobre no recubiertas, para determinar la influencia del recubrimiento. Se utilizó el tribómetro en configuración bloque-anillo y en configuración de 4 bolas, analizando la superficie desgastada mediante MEB y ERED. El estudio concluyó que la adición del recubrimiento de carbono a la nanopartículas de cobre disminuye el desgaste e incrementan la fuerza de soporte del aceite base PAO6, esta mejora se sugiere que se debe a la deposición de nanopartículas en la superficie desgastada y en acción como pequeños “nano-cojinetes”. Las nanopartículas recubiertas de carbono no presentaron mejor comportamiento que las nanopartículas no recubiertas.

Jiao *et al.* 2011, evaluaron las propiedades tribológicas de Nanopartículas compuestas de alumina/silice como aditivos en lubricantes, la investigación se realizó en un tribómetro en configuración 4 bolas y bloque-anillo para cuatro tipos de concentraciones en peso de nanopartículas 0,05%, 0,1%, 0,5%, 1%. Los ensayos de 4 bolas se realizaron bajo las siguientes condiciones, una temperatura de 348 °K, velocidad de giro 1450 rpm, una carga de 147 N y un tiempo total de 1800 seg. Para el ensayo bloque-anillo utilizaron una temperatura de 348 °K, una velocidad de giro de 1200 rpm, una carga de 200 N y un tiempo de 1800 seg. Finalmente encontraron que con una concentración del 0,5% en peso se obtiene una reducción del coeficiente de fricción y una reducción en el desgaste en comparación de los mismos compuestos pero puros de Al_2O_3 y SiO_2 .

Otro trabajo de interés es el realizado por Cocuzza *et al.* 2011, el cual es un documento que ofrece una visión general de las aplicaciones de la nanotecnología y destaca de manera crítica, los posibles beneficios que pueden obtenerse de la transposición de la misma, adaptada a soluciones para la industria del petróleo. A pesar de no ser un proyecto sobre nanopartículas funcionalizadas sino recubrimientos depositados con PVD, puede servir de base para este trabajo, debido a los estudios recientes en

tribología y mejoras en consumo de lubricantes. El trabajo se refiere a la tribología con nanomateriales, citando además a autores como Vallés y Vergara (2008), en el cual se presentan los proyectos financiados por la Unión Europea (uno de ellos es el proyecto MICLUB), cuya meta era conseguir una drástica reducción en el consumo de lubricantes durante el proceso de conformación de piezas metálicas. Para ello, desarrollaron un nuevo sistema de preparación de recubrimientos, basado en la deposición física en fase vapor (PVD) y de un solo paso. Este sistema, que puede trabajar a bajas temperaturas, permite recubrir las herramientas con capas delgadas cuya superficie posee una nanoestructura predefinida.

Por otra parte, Díaz *et al.* 2012, permiten obtener una introducción a los nanomateriales, considerando aquellos cuyos principales componentes tengan un tamaño entre 1 y 100 nanómetros; indicando que los nanomateriales se usan actualmente en centenares de aplicaciones y productos de consumo, que van desde la pasta de dientes hasta las pilas, las pinturas o prendas de vestir.

Song *et al.* 2012, sintetizaron y formularon nanopartículas esféricas monodispersadas de aluminato de zinc $ZnAl_2O_4$ (es un mineral del grupo de las espinelas), mediante un método denominado solvotermal y modificadas mediante ácido oleico en solución de ciclohexanol. Se caracterizaron estas nanopartículas mediante difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectroscopía infrarroja (EI). Se logró medir la capacidad de dispersión de estas partículas en el aceite lubricante mediante espectroscopía de absorbancia óptica. Los resultados mostraron que las nanopartículas modificadas son monodispersas y pueden generar de manera estable la dispersión del aceite lubricante. Se evaluaron las propiedades tribológicas de los lubricantes con aditivos de nanopartículas de $ZnAl_2O_4$, mediante el ensayo con tribómetro de 4 bolas y de anillos de empuje (four-ball test and thrust ring test). Adicionalmente, para comparar

se analizaron nanopartículas de óxido de zinc y aluminio (ZnO y Al_2O_3), como aditivos en aceites lubricantes, respectivamente. Los resultados mostraron que las nanopartículas del mineral ZnAl_2O_4 presentaban mejores propiedades tribológicas en términos de efectos de antifricción y antidesgaste que los lubricantes con las nanopartículas de ZnO y Al_2O_3 . El mecanismo de anti fricción y antidesgaste mediante el cual actúan las nanopartículas de ZnAl_2O_4 puede ser explicado debido a un efecto de formación de “nanocojinetes” y “tribosinterización” en las zonas de contacto.

Kalin *et al.* 2013, utilizaron recubrimientos del tipo DLC, constituido por carbono amorfo con algunas propiedades del diamante, observando que proveen baja fricción y desgaste en las zonas de mayor demanda tribológica los cuales son los puntos de contacto entre metales. Sin embargo, su reactividad química con los aditivos de los lubricantes ha sido muy difícil de mejorar. Además, incluso los aditivos parcialmente eficaces, pero con altas concentraciones de cenizas sulfúricas, fosforo y azufre, se eliminarán en un futuro cercano por razones ambientales. Sobre la base de los últimos estudios de nanopartículas inorgánicas de sulfuro de molibdeno y wolframio (MoS_2 y WS_2), las cuales basan su mecanismo de lubricación mediante cizallamiento de los planos basales, en este trabajo se proponen reemplazar la lubricación actual basada en reactividad química por una nueva tecnología de naturaleza física a base de recubrimientos DLC poco reactivos. En este trabajo, se alcanzó un 30% menos de fricción sobre las superficies de acero, utilizando el lubricante sin aditivo y 50% menos de fricción mediante el empleo de nanotubos de MoS_2 , en la superficie de contacto de los recubrimientos DLC. Esta tecnología basada en tecnología de lubricación física, representa una solución innovadora y eficaz para superficies no reactivas y al mismo tiempo provee un comportamiento amigable al ambiente.

Alves *et al.* 2013, desarrollaron lubricantes de base vegetal con nanopartículas de óxido de zinc y cobre (ZnO y CuO) como aditivos a condiciones de presiones extremas, en el trabajo se evaluó el efecto de esas altas presiones sobre el comportamiento tribológico del lubricante. Los resultados mostraron que con la adición de nanopartículas a los lubricantes convencionales se puede mejorar significativamente sus propiedades tribológicas; esto puede ser explicado debido a la formación de una delgada pero compacta película que se forma sobre la superficie desgastada, la cual es además responsable de reducir la fricción y el desgaste. Adicionalmente, el desarrollo de lubricantes de base aceite vegetal pueden reemplazar los de aceite mineral, mejorando las propiedades tribológicas y siendo además menos contaminantes ambientales. Sin embargo, se observó que la adición de nanopartículas a lubricantes de base aceite vegetal no mejora considerablemente el aspecto de reducción de desgaste.

Zhou *et al.* 2013, realizaron una investigación sobre la adición de nanopartículas de Fe_3O_4 como aditivos en aceite base, estudiaron además a diferentes concentraciones 0,5 g/L, 1 g/L y 2 g/L y a diferentes cargas 10, 30 y 50 N, obteniendo como resultado una mejora de hasta 64.7% de reducción en la superficie de desgaste, a una carga de 10 N y 2 g/L de concentración. El mecanismo por el cual actúan, se refiere a la protección que pueden ofrecer estas nanopartículas entre ambas caras de contacto.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

A continuación se presentan algunos conceptos teóricos que son necesarios para el entendimiento de algunos aspectos involucrados en el desarrollo de este proyecto y que de igual forma pueden contribuir en la discusión e interpretación de los resultados.

2.1 Tribología

La Tribología es la ciencia encargada del estudio del frotamiento, es decir, cómo interactúan dos o más superficies en contacto y en movimiento relativo. Esta se ocupa principalmente de tres fenómenos importantes como lo son la fricción, el desgaste y la lubricación. Es un área del conocimiento multidisciplinaria, que requiere contribuciones de la química de superficies, de la ciencia de los materiales y de la mecánica.

Las interacciones en la interfase tribológica son muchas y complejas. Antes de detallar los principales mecanismos que interactúan en una interfase tribológica en movimiento relativo, se debe tener en cuenta que cuando dos superficies se ponen en contacto, pueden definirse un área aparente de contacto y un área real de contacto. Esta última está formada por la suma de todos aquellos puntos discretos donde las dos superficies están en contacto a distancias atómicas. Por su parte la aparente, es aquella área que sólo tiene en cuenta la superficie total de los cuerpos en contacto. Es por esta razón que el área real de contacto es función de la rugosidad, propiedades interfaciales del material y las condiciones de carga aplicadas.

2.2 Fricción

La fuerza de rozamiento o de fricción entre dos superficies en contacto, es definida como la fuerza que se opone al movimiento de una superficie sobre la otra. Esta se genera debido a las imperfecciones, especialmente microscópicas, entre las superficies en contacto. Cuando los cuerpos están en movimiento, esta amplia definición abarca las dos importantes clases del mismo: el deslizamiento y la rodadura. La distinción entre ambos es útil, aunque no son mutuamente excluyentes, aún la denominada rodadura pura siempre involucra algún deslizamiento. (Viesca, 2011).

Tanto en el deslizamiento como en la rodadura ideal, (Fig. 1), se necesita aplicar una fuerza tangencial (F) para mover el cuerpo superior sobre la superficie. La relación entre la fuerza de fricción (FR) y la carga normal (N) se conoce como el coeficiente de fricción, y se denota usualmente por μ_k :

$$\mu_k = \frac{F_r}{N}$$

F_R - es la fuerza de rozamiento [N].

μ_k - es el coeficiente de rozamiento cinético.

N - es la fuerza en la dirección normal al movimiento [N].

La magnitud de la fuerza friccional se describe convenientemente mediante el valor del coeficiente de fricción, el cual varía en un amplio rango: desde aproximadamente 0.001 en un cojinete de contacto rodante cargado ligeramente, hasta más de 10 para deslizamiento entre metales limpios en el vacío. Para la mayoría de los materiales comunes en deslizamiento en el aire, el valor de μ_k se encuentra en el estrecho rango de 0.1 a 1.

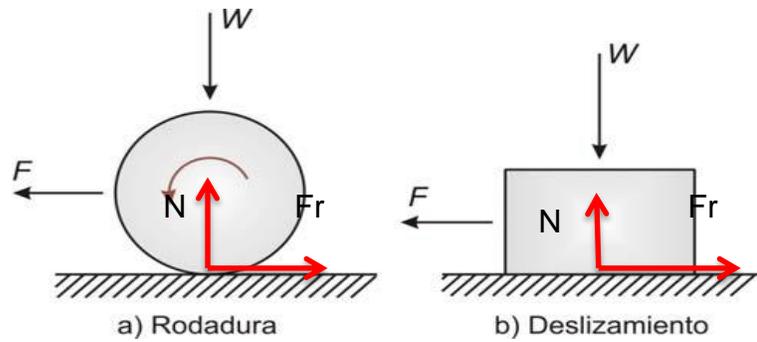


Figura 1. Fuerza friccional (FR) de resistencia al movimiento.

2.2.1 Fricción por deslizamiento

En una condición de contacto estático seco, si la carga aplicada tangencialmente a la superficie de contacto excede cierto valor, ocurre un deslizamiento neto entre los componentes en contacto. A partir de observaciones hechas por Leonardo Da Vinci 200 años atrás, Amontons en el año 1699, formula dos leyes empíricas de la fricción por deslizamiento. Estas leyes, también denominadas de Amontons, establecen:

1. La fuerza de fricción es proporcional a la fuerza normal.
2. La fuerza de fricción es independiente del área aparente de contacto. A estas leyes se le añadió una tercera, la cual se le atribuye a Coulomb en 1785.
3. La fuerza de fricción es independiente de la velocidad.

Estas tres Leyes son de fiabilidad variable, ya que existen casos importantes en los que los resultados no se corresponden con las observaciones.

2.2.2 Fricción por rodadura

El término fricción por rodadura se restringe usualmente a cuerpos de forma casi perfecta y con una rugosidad superficial muy pequeña. Para tales cuerpos el componente rugoso de la fuerza de fricción es muy bajo, y en consecuencia los coeficientes de fricción que se obtienen son también muy bajos, sus valores están entre $5 \cdot 10^{-3}$ y $5 \cdot 10^{-5}$. La resistencia al movimiento en este caso no se debe sólo a una causa, sino a una combinación de ellas, cada una de las cuales tiende a prevalecer en determinadas condiciones. Estas causas son:

Deslizamiento en la región de contacto: si el contacto entre los cuerpos en rodadura fuese un punto se podría considerar que las condiciones son de rodadura pura. Sin embargo, en la práctica la región de contacto se deforma elásticamente y, en casos extremos, plásticamente. Esto hace que el contacto sea un área de una magnitud determinada, y los puntos dentro de la misma están situados en diferentes planos (Fig. 1). En consecuencia, no es posible que ocurra la acción pura de rodadura (excepto en un pequeño número de puntos) ya que se tiene una combinación de rodadura con un pequeño grado de deslizamiento. Para que tenga lugar este deslizamiento se requiere que se venza la resistencia al deslizamiento en la interfase, y para que esto suceda es necesario que actúe la fuerza de fricción por rodadura. Aunque las velocidades de deslizamiento son generalmente pequeñas (usualmente 5% o menos de la velocidad de rodadura), esta pequeña cantidad de deslizamiento en muchos casos es una parte importante de la resistencia total a la rodadura (Visca, 2008)

Pérdidas por histéresis: durante la rodadura las diferentes regiones de las bolas y la superficie con la que contacta sufren ciclos de carga y descarga. Durante la carga en cada ciclo de un elemento de volumen de cualquiera de los cuerpos, se acumula energía elástica en ellos. La mayoría de esta

energía se libera una vez se descarga el elemento de volumen; pero una pequeña parte se pierde (en forma de calor) por la histéresis elástica del material. Este fenómeno trae consigo la adición de un componente de histéresis al coeficiente de fricción por rodadura, que es pequeño en algunos casos (menor de 10^{-4}) aunque en la mayoría de las situaciones tiene una contribución predominante al coeficiente de fricción por rodadura total.

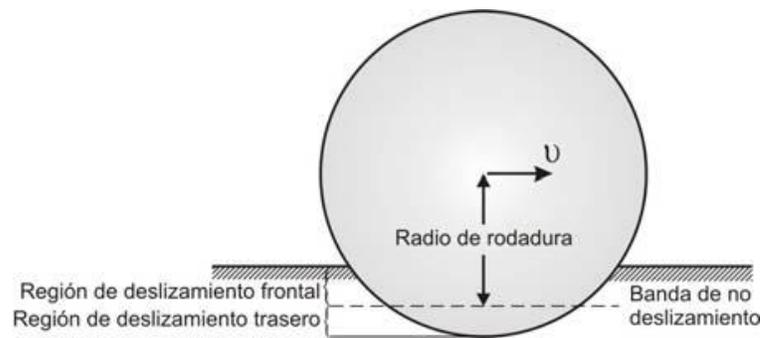


Figura 2. Esfera en rodadura sobre superficie plana.

Otras pérdidas friccionales durante la rodadura: en esta categoría están presentes un número de fenómenos, de los cuales pueden ocurrir uno o todos durante el proceso de rodadura y uso de la energía. El primero de ellos es la pérdida de energía causada por la falta de perfección en la geometría de la rodadura, por ejemplo, falta de redondez en una bola de cojinete o la presencia de una partícula dura en la pista de rodadura. Esto dará lugar a un componente rugoso de fricción. En segundo lugar se tiene las pérdidas de energía causadas por la deformación de las asperezas de la superficie rugosa, si estas superficies no son perfectamente lisas. De igual forma habrá pérdidas análogas, si en las superficies de rodadura hay presente partículas contaminantes, o si éstas se tornan más grandes. Por último, hay otras pérdidas de energía en los sistemas de contacto por rodadura que ocurren

independientemente de la acción de rodadura, las principales son la acción de deslizamiento en la interfase entre las pistas y las bolas de rodadura, y las pérdidas viscosas en el aceite líquido o grasa que pueda estar presente. Todas estas pérdidas se adicionan a la fuerza de fricción en un orden de magnitud de 10^{-4} , es decir, rara vez predomina en magnitud, pero no se desprecia frecuentemente.

2.2.3 Fenómenos relativos a la fricción

Cuando las superficies deslizan entre si, casi siempre toda la energía disipada en la fricción aparece en forma de calor en la interfase. Este calor friccional incrementa la temperatura de la interface sobre la del medio circundante. El hecho de que el área real de contacto (siempre menor que el área aparente) esté formada por un conjunto de puntos, hace que éstos reciban unas cantidades sustanciales de energía térmica y su temperatura sea mucho más grande que la de las regiones superficiales circundantes. Las altas temperaturas asociadas a estos puntos se denominan frecuentemente “temperatura punta” (Flash Temperature). La temperatura flash alcanzada por los puntos en contacto tiende a ser constante bajo las mismas condiciones de deslizamiento.

En muchos casos es útil calcular dicha temperatura, por ejemplo, cuando un lubricante funciona bien sólo por debajo de una temperatura crítica o comienza a descomponerse por encima de ciertas temperaturas. Aunque la temperatura máxima posee dos componentes, la temperatura funcional y la punta, usualmente el mayor interés está en la temperatura flash, una vez que la primera es menor y generalmente muy fácil de medir.

2.3 Desgaste

El desgaste es el daño o eliminación de material de una o ambas superficies sólidas en deslizamiento, rodadura, o un movimiento relativo de impacto de una con respecto a la otra. En la mayoría de los casos ocurre a través de la interacción superficial de las asperezas. Durante el movimiento relativo, lo primero que ocurre es el desplazamiento del material sobre la superficie de contacto, modificando las propiedades del cuerpo sólido de la zona cercana a la misma pero sin producirse aún pérdida de material (si la hubiera sería muy pequeña). Más tarde, el material se elimina de la superficie y puede transferirse y unirse a la otra superficie o puede soltarse como una partícula de desgaste. En el caso de la transferencia de una superficie a otra, el volumen neto o la pérdida de masa del punto de contacto es cero, aunque una de las superficies se desgasta. La definición de desgaste se basa generalmente en la pérdida de material, pero debemos enfatizar que el daño debido al desplazamiento del material sobre un cuerpo dado (observado usando microscopía) con ningún cambio neto en volumen o peso, también constituyen desgaste.

El desgaste, desde el punto de vista de la fricción, no es una propiedad del material sino una respuesta del sistema. Las condiciones de operación afectan el punto de contacto del desgaste. Algunas veces se asume erróneamente que en los puntos de contacto la alta fricción muestra un alto índice de desgaste. Por ejemplo, los puntos de contacto de lubricantes sólidos y polímeros muestran una fricción relativamente baja y un desgaste relativamente alto, mientras que los de las cerámicas muestran fricción moderada y desgaste relativamente bajo.

Por otro lado, el desgaste puede ser beneficioso o perjudicial. Ejemplos de desgastes productivos son escribir con un lápiz, maquinado, pulido y limado, los cuales requieren un desgaste controlado. El desgaste es indeseado en

casi todas las aplicaciones de máquinas, tales como cojinetes, sellos, engranajes y levas. Los componentes necesitan ser reemplazados después de eliminar una cantidad relativamente pequeña de material o si la superficie es excesivamente rugosa. En sistemas tribológicos bien diseñados, la eliminación de material es un proceso muy lento, pero constante y continuo.

Dentro de la Tribología un aspecto de especial atención es la definición y clasificación de los diferentes tipos de desgaste, por lo complejo que resulta este fenómeno y por el hecho de que en la mayoría de los casos pueden presentarse simultáneamente diferentes tipos de desgaste. La existencia de diferentes tipos de uniones de fricción y el poder afectar éstas a distintas áreas, las distintas formas de rotura y los variados tipos de deformaciones, conducen a la existencia de diversos tipos de desgaste; es necesario, por tanto, considerar cada caso particular, para poder llegar al conocimiento del mismo. No es posible dar una regla fija para todas las formas de desgaste, ya que éste se ve afectado por una gran diversidad de factores. Entre ellos se pueden mencionar el tipo y magnitud de la carga, velocidad, cantidad y tipo de lubricante, clase de lubricación, temperatura de las superficies y del volumen del material, propiedades mecánicas de los mismos (dureza, resistencia a la deformación, etc.), acabado superficial, presencia de partículas extrañas, naturaleza química del medio ambiente, la cual tendrá una importancia decisiva al variar la naturaleza de las superficies, etc., y de acuerdo con las variaciones que pueden introducir éstos y otros factores, serán más o menos acusados los efectos del desgaste producido. Normalmente, en ingeniería no se presenta un tipo de desgaste aislado. Por esta causa no es fácil establecer con seguridad en una aplicación el tipo de desgaste que ha tenido lugar y menos aún remediarlo.

Con la intención de describir los variados procesos de desgaste que pueden ocurrir en un sistema tribomecánico, se hicieron esfuerzos para la clasificación de los mismos. Siebel (1938) propone una clasificación con

relación al tipo de movimiento relativo, y Burwell (1957) otro con relación al tipo de mecanismo de desgaste. De acuerdo a esto se puede especificar el tipo de desgaste a través de los elementos interactuantes, el tipo de movimiento relativo y los mecanismo de desgaste dominantes. Por otro lado, para una mayor caracterización cuantitativa, a las características anteriores se le deben añadir, el trabajo de entrada (carga normal, coeficiente de fricción, distancia recorrida a velocidad constante), las propiedades del material importantes para el desgaste, la velocidad de desgaste y la apariencia de las superficies desgastadas.

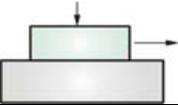
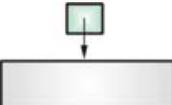
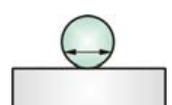
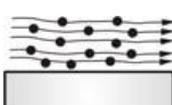
Elementos interactuantes	Tipo de movimiento relativo		Tipos de desgaste
Sólido/Sólido (metales, polímeros, minerales, etc.) con o sin lubricantes		Deslizamiento	Desgaste por deslizamiento
		Rodadura	Desgaste por rodadura
		Impacto	Desgaste por impacto
		Oscilación	Desgaste por fretting
Sólido/Fluido		Flujo	Desgaste por cavitación
Sólido/Fluido + Partículas		Flujo	Erosión por fluido

Figura 3. Diferentes tipos de desgaste

2.3.1 Desgaste adhesivo

Durante el movimiento relativo entre dos superficies en contacto, puede producirse una transferencia del material de cada una de ellas a la otra, generando calor y elevando la temperatura del material hasta la soldadura en fase sólida. Cuando se ponen en contacto dos superficies, estas se apoyan sobre las crestas de las asperezas microscópicas. Al aplicar una carga normal que es soportada por una pequeña área de las asperezas en contacto, aumenta la presión localizada en ellas y se produce una deformación plástica. Esto incrementa el área real de contacto hasta que toda la carga sea soportada. Luego se produce un acercamiento entre ambos cuerpos que lleva a la aparición de fuerzas de adhesión, las cuales se romperán en el deslizamiento para volverse a formar y repetir el ciclo.

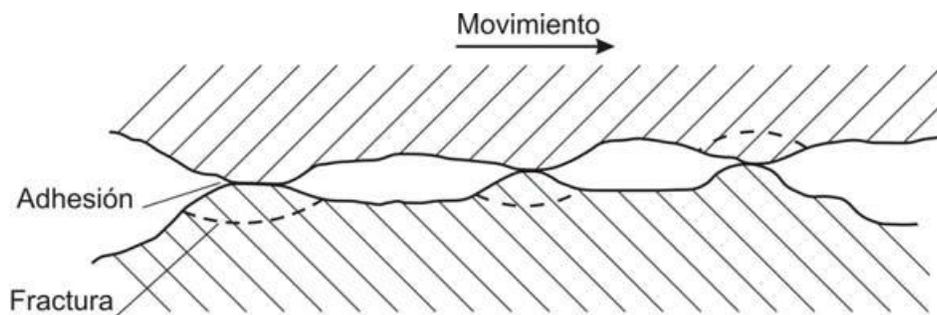


Figura 4. Desgaste adhesivo

En el material de las asperezas de cada superficie habrá una fuerza de cohesión, si esta es menor que la de adhesión, generará el desprendimiento de asperezas de la propia superficie pasando a formar parte de la otra, y de esta manera se produce una transferencia de material del blando al duro, lo cual da lugar al desgaste de la superficie más blanda (Fig. 4)

En el caso de que existiera en las superficies una película de contaminantes (óxidos, etc.) podría no producirse de forma inmediata la adhesión; no obstante, debido al movimiento tangencial relativo entre ellas, dicha película se rompería en los puntos de contacto, produciéndose el efecto primitivo de microsoldadura a presión en caliente que debido al movimiento se cizallaría nuevamente, repitiéndose una vez más el ciclo.

Estos esfuerzos de compresión y descompresión que soportan las asperezas, así como los choques entre ellas, producen una microfatiga superficial en el material que genera la separación de partículas y la formación de residuos, los cuales al estar interpuestos entre las superficies, podrán dar lugar a un desgaste abrasivo. Esta situación se puede combatir con el filtrado del lubricante.

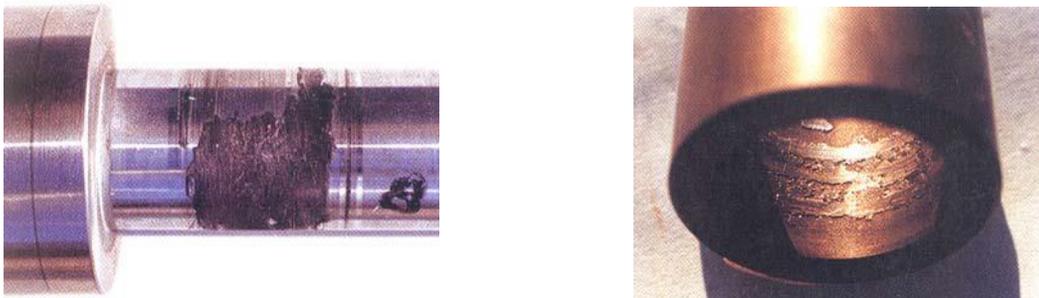


Figura 5. Árbol de acero + Cromo duro. Cojinete de grafito llenado con metal. Entorno: agua. $V = 2 \text{ m/s}$, $P = 1 \text{ MPa}$ (transferencia de metal/cromo).

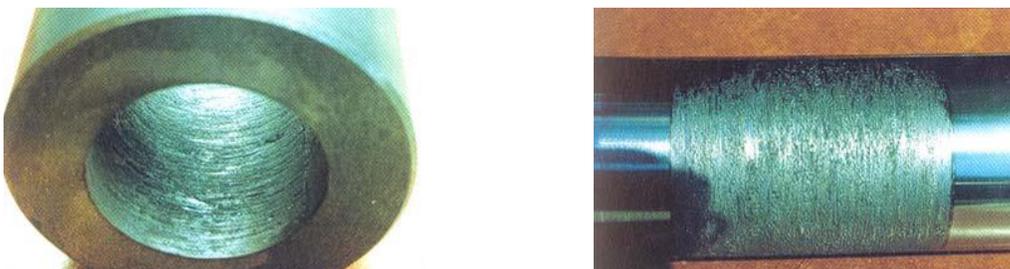


Figura 6. Árbol de acero templado carburado. Cojinete de hierro fundido. Movimiento de oscilación. Entorno: gas butano. $V = 0.037 \text{ m/s}$, $P = 8 \text{ MPa}$.

El mecanismo de adhesión depende de los contaminantes superficiales y del medio, por lo que es difícil cuantificar el desgaste en función de las propiedades del material base. Si el proceso de desgaste metal-metal se realizase en el vacío, se observaría que el desgaste adhesivo dependería de la estructura cristalina y de su orientación, así como de pequeñas cantidades de compuestos como carburos, sulfuros, o fosfuros, los cuales disminuyen este desgaste, el cual puede observarse fácilmente por la aparición de escoriaciones en forma de rayas a lo largo de toda la superficie en contacto, pero sin la modificación de su forma general. Un caso extremo de transferencia adhesiva es el gripado, que tiene lugar sobre áreas mayores y puede llegar al agarrotamiento, dando lugar a uniones adhesivas de tipo soldadura tan fuerte que pueden paralizar el sistema mecánico.

2.3.2 Desgaste abrasivo

Este tipo de desgaste es producido por la abrasión de una superficie rugosa de material duro en otra de material blando como se muestra en la Fig. 7 Actualmente se ha disminuido este tipo de desgaste, al conseguir un mejor acabado en la mecanización de las piezas.

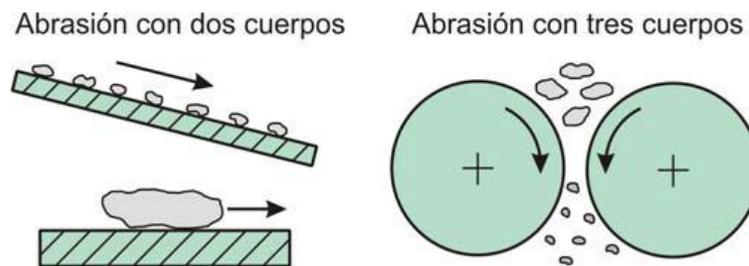


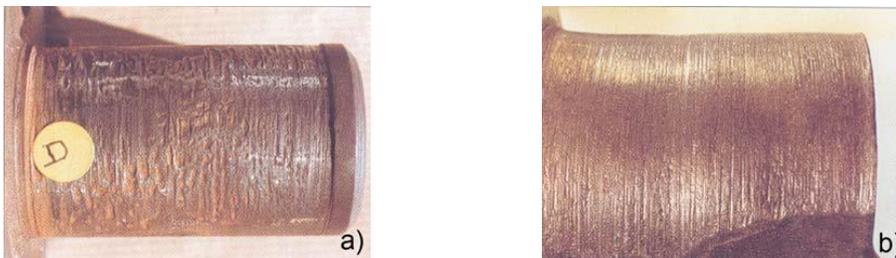
Figura 7. Abrasión con dos y tres cuerpos

El desgaste abrasivo también comprende el producido por partículas libres de arena, polvo, etc. (Fig. 7), que se hallen entre las superficies durante el

movimiento relativo, estas partículas son de material más duro que el de las superficies. Este tipo de desgaste es de gran importancia porque aparece en todos los mecanismos que trabajan en ambientes contaminados y además es debido a productos resultantes del desgaste corrosivo, adhesivo y de fatiga. Para eliminar estas partículas, se procede a la instalación de filtros atmosféricos en los circuitos de lubricación.

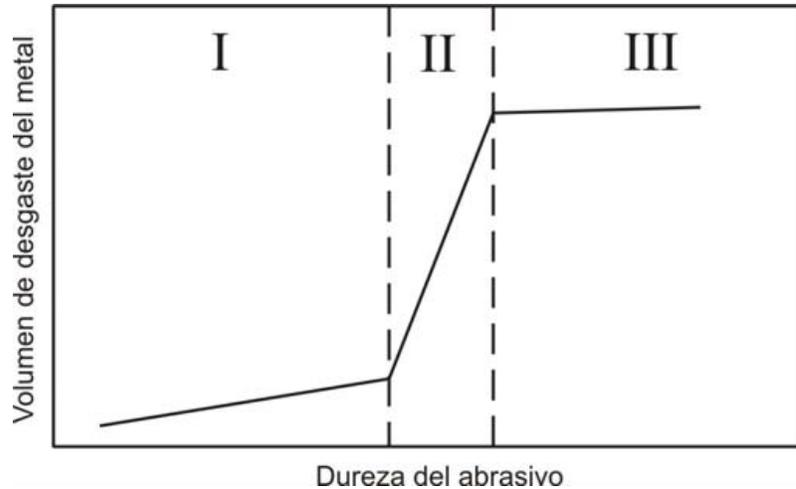
El desgaste abrasivo fue estudiado por Kruschov (1957) y Richardson (1968), partiendo de los siguientes criterios:

- a. El volumen de material removido es directamente proporcional a la carga y a la distancia deslizada. Puede haber variaciones si disminuye el tamaño de las partículas abrasivas.
- b. El desgaste abrasivo tiene una estrecha correlación con la dureza del abrasivo (H_a), y la dureza del metal (H_m), como se observa en la Fig.8.



- a) Árbol de acero nitrurado; cojinete de acero 100Cr6. Entorno: agua suspensionada con arena. $V = 20 \text{ mm/s}$, $P = 20 \text{ MPa}$.
- b) Árbol de acero nitrurado; contra cuerpo: el mismo. Entorno: aire + óxido de hierro. Temperatura = 200°C ; PV muy bajo.

Figura 8. Desgaste por abrasión. Ejemplos de manifestaciones



(I) Régimen de desgaste bajo si: $H_a < H_m$

(II) Régimen de transición si: $H_a \approx H_m$

(III) Régimen de desgaste alto si: $H_a > H_m$

Figura 9. Influencia de la dureza del abrasivo en el desgaste de los metales.

De aquí se concluye que para reducir el componente de desgaste abrasivo, la dureza del material (H_m) debe ser más grande que la del abrasivo al menos en un 30%. Se puede usar como criterio de baja velocidad de desgaste abrasivo la relación: $H_m \approx 1.3H_a$. No es necesario aumentar aún más la dureza del material porque no se logran mejoras significativas adicionales.

2.3.3 Desgaste corrosivo

Este tipo de desgaste se produce cuando las superficies de las piezas están en contacto con líquidos o gases con los que reaccionan química o electroquímicamente, formando unos productos de reacción que se adhieren a las superficies (si pasan al medio fluido y son más duras que las superficies, serían abrasivas). Este fenómeno no sería importante si ocurriese en condiciones estáticas, debido a que la primera capa formada impediría, si no es porosa, que siguiera el ataque; pero si hay deslizamiento esta película se romperá, por lo cual el ataque será continuo. La apariencia típica de las partículas de desgaste formadas se observa en la Fig. 10.

Generalmente los productos de la reacción son más duros y frágiles que el material de las superficies sobre las cuales se forman. Parece haber una tendencia a que la capa sea más resistente al desgaste en la medida que es más fina, por lo que el desgaste es posible una vez se excede cierto grosor de capa. Las condiciones de deslizamiento del proceso son las que determinan cuanto desgaste se produce una vez rebasado dicho espesor de capa. Si la capa es frágil, se puede asumir que en cualquier lugar de la superficie se desprenderá de una vez la totalidad de la misma.

En aquellos casos donde la capa de productos de reacción sea dúctil y más suave que la superficie en la cual se forma, hay una alta probabilidad de que cuando ocurra el desgaste sólo se desprenda una parte de la capa. Se puede asegurar que en este caso la cantidad de desgaste será mucho menor que en el caso anterior, asumiendo que la velocidad de formación de los productos de reacción y la probabilidad de su desprendimiento sean las mismas.

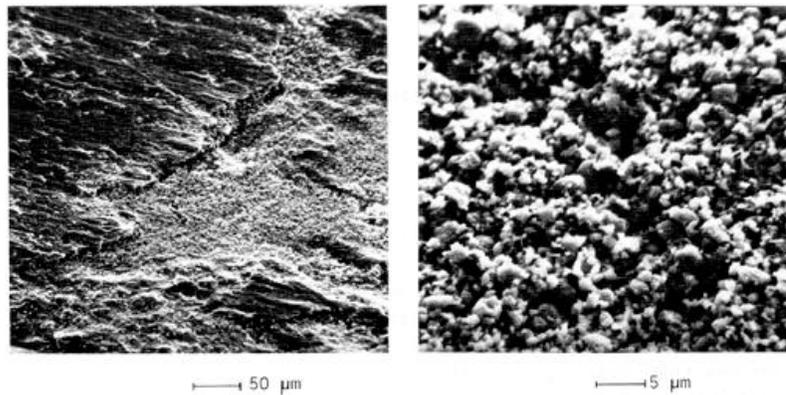


Figura 10. Apariencia de partículas de desgaste corrosivo.

Un proceso corrosivo muy frecuente es la formación de óxidos, fenómeno que depende de la temperatura (la velocidad de las reacciones químicas aumenta con la temperatura), del grado de humedad, salinidad, etc.

La presencia de todos estos factores en el mecanismo de desgaste forma un sistema triboquímico, en el que la variación de algunos de sus parámetros reduciría el desgaste, tal es el caso de:

- a. Bajar la temperatura para disminuir la velocidad de reacción.
- b. Conocer el tipo de reacción corrosiva; por ejemplo, si es formada por ácidos, nieblas, azufre libre en los lubricantes, etc., para así poder eliminar dichas sustancias.
- c. Cambiar el material de las superficies que sea susceptible al ataque.
- d. Modificar cuando sea posible parámetro de diseño como: carga, velocidad, presión, lubricante, etc.

El estudio de la interrelación entre el efecto de la corrosión y las funciones del desgaste se puede esquematizar como se indica en la Fig. 11. La tasa de desgaste en una superficie afectada por la corrosión es generalmente más

alta que en la no afectada, aunque en ausencia de deslizamiento podría formarse una película superficial que tendería a retardar o incluso a detener la corrosión.



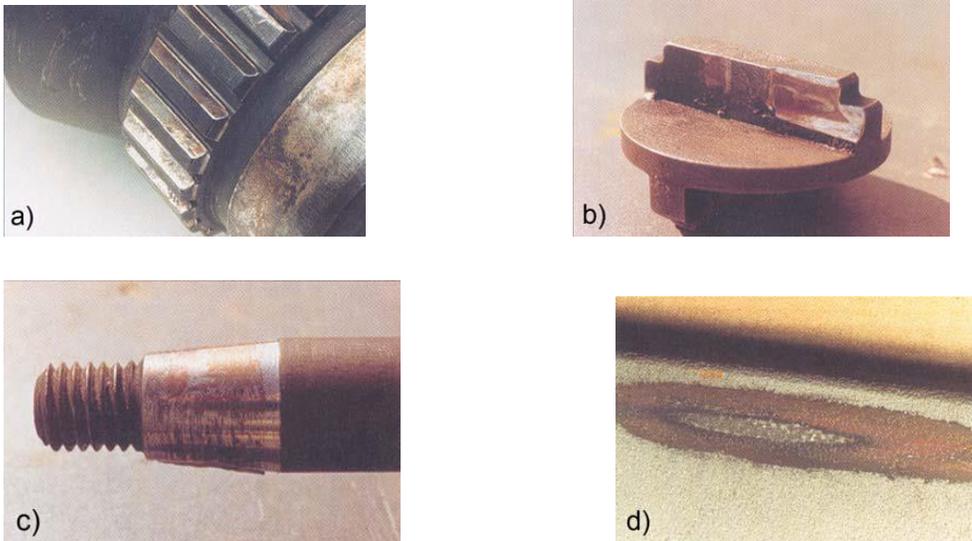
Figura 11. Relación entre corrosión y desgaste.

Los lubricantes limitan este tipo de desgaste, pudiendo reforzar su acción anticorrosiva mediante la adición de ciertos productos químicos llamados aditivos. Estos tienen además una misión desactivante, neutralizando la acción catalítica de los metales de las superficies o de los que se encuentran en suspensión coloidal en los aceites usados. Los inhibidores de la corrosión más comunes son compuestos de fósforo o bismuto.

En algunos casos, la capa superficial creada por el ataque químico es de tal naturaleza (menor coeficiente de fricción y mayor dureza), que aún en los movimientos de deslizamiento o rodadura, reduce la tasa de desgaste en forma muy considerable. Este efecto lo producen ciertos aditivos con compuestos orgánicos u organometálicos que contienen elementos tales como el azufre, el fósforo o el cloro, combinados debidamente en una molécula. Cuando por la fuerte fricción reinante bajo condiciones severas de trabajo se generan temperaturas elevadas con peligro de soldaduras, estos

aditivos, llamados de alta temperatura o EP (Extrema Presión) e inertes a temperaturas normales, reaccionan formando compuestos sulfurados, fosforados y clorados. Estos compuestos en forma de jabones metálicos hacen el efecto de lubricantes sólidos interpuestos entre las superficies, rebajando el coeficiente de fricción.

Dentro del desgaste corrosivo se considera también la corrosión por vibración o fretting (Fig. 12). La misma tiene lugar entre dos superficies metálicas muy próximas, sometidas a vibraciones de pequeña amplitud, entre las que aparece un óxido en forma de polvo rojo muy fino que produce pérdidas de material. Las partículas liberadas permanecerán entre las dos superficies provocando un incremento del desgaste por abrasión.



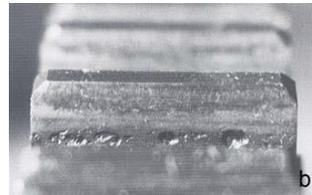
a) Fretting en el cubo del acoplamiento. Desgaste por pérdida de dimensión en el diente (con efecto de desalineamiento). b) Desgaste por fretting en un acoplamiento. c) Fretting en una unión cónica. d) Consecuencia de la fricción en una suspensión de resorte de hojas. Diferentes grados de oxidación: negro (Fe_3O_4) y rojo (Fe_2O_3).

Figura 12. Desgaste por fretting. Ejemplos de manifestaciones

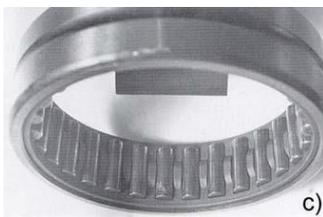
2.3.4 Desgaste por fatiga

Cuando las piezas de una máquina están sometidas a movimientos de deslizamiento, impacto o sobre todo de rodadura, repetidos cíclicamente, se producen esfuerzos de compresión y descompresión de forma alternativa que originan fisuras superficiales y subsuperficiales que se propagan y se unen, dando lugar al picado (pitting), fenómeno que deja material libre en forma de cáscaras que permanecerán entre las superficies o pasarán al lubricante interpuesto [Shigley y Mitchell, 1986; Zum, 1987]. En la Fig. 13 se muestran algunas manifestaciones del desgaste por fatiga.

Este fenómeno no es inmediato, sino que aparece pasado un número crítico de ciclos, generalmente después de un período relativamente largo en el que las partículas desprendidas producirán desgaste abrasivo y finalmente el deterioro total de las superficies.



a) Varilla de la leva de un motor de combustión interna; acero templado carburado. b) Engranaje; acero templado carburado.



c) Cojinete de rodillo; acero 100 Cr6. d) Anillo del rodillo del variador de velocidad.

Figura 13. Desgaste por fatiga superficial. Ejemplos de manifestaciones.

Este tipo de fenómeno es típico de aplicaciones donde haya rodadura (engranajes o cojinetes de elementos rodantes) y constituye el principal modo de fallo. Comparando la fatiga superficial de los contactos de rodadura con la fatiga ordinaria del volumen de material, se encuentran dos diferencias notables. Primero, las fluctuaciones en el tiempo de fallo son mucho más severas en los contactos de rodadura. Segundo, el importante fenómeno de la existencia de cierta carga límite por debajo de la cual el material posee vida infinita a fatiga (ensayos volumétricos), no se ha detectado en el caso de la fatiga superficial.

El fenómeno de fatiga se caracteriza generalmente por:

- Grandes partículas de desgaste, hasta de 1000 μm .
- La vida a fatiga del material aumenta empleando lubricantes con baja aditivación y viceversa.
- La vida del elemento sometido a fatiga es inversamente proporcional al cubo de la carga.
- La vida a fatiga está sujeta a una gran dispersión experimental, que obliga a un tratamiento probabilístico de los datos.

La fatiga, como consecuencia del proceso de nucleación de fisuras, está íntimamente relacionada con los acabados de mecanización y la falta de homogeneidad en la dureza entre los puntos de la superficie metálica, lo que genera desigualdades en el reparto de las cargas y tensiones muy elevadas en puntos localizados del material, repetidas en cada ciclo y que sobrepasan los límites de elasticidad.

Las principales investigaciones experimentales de desgaste por fatiga superficial han consistido en dispositivos de contactos de rodadura, en los cuales teniendo en cuenta la variabilidad de los resultados se hace necesario

repetir los ensayos adecuadamente. Estos resultados se representan en un diagrama de papel probabilístico de Weibull. En la mayoría de los casos, los puntos sobre dicho diagrama se ajustan a una línea recta, pudiendo deducirse los tiempos para los cuales fallan el 10 y el 50% de los elementos según las condiciones de ensayos utilizadas.

2.4 Lubricación

Los lubricantes son materiales colocados o agregados en medio de partes en movimiento con el propósito de brindar enfriamiento (transferencia de calor), reducir la fricción, limpiar los componentes, sellar el espacio entre los componentes, aislar contaminantes y mejorar la eficiencia de operación. Por ejemplo, los lubricantes desempeñan también la función de selladores ya que todas las superficies metálicas son irregulares y el lubricante "llena" los espacios irregulares de la superficie del metal para hacerlo liso, además sellando así la potencia transferida entre los componentes. Si el aceite es muy ligero (baja viscosidad), no va a tener suficiente resistencia y la potencia va a disminuir, si el aceite es muy pesado o grueso (alta viscosidad), la potencia se va a perder en fricción excesiva (y calor). Si el aceite se ensucia, actuará como abrasivo entre los componentes, desgastando los mismos.

Los lubricantes también trabajan como limpiadores ya que ayudan a quitar y limpiar los depósitos producidos por derivados de la combustión (una especie de carbón que es una mezcla de combustible quemado, agua y productos de la descomposición del lubricante mismo). Si el aceite es muy ligero, no va a poder limpiar lo suficiente y no proveerá aislamiento de este desecho; si es muy pesado se va a mover muy despacio y no va a poder entrar en los lugares más ajustados.

2.4.1 Lubricantes líquidos y sus propiedades

Un aceite lubricante óptimo debe conseguir un nivel requerido de fricción y una velocidad de desgaste adecuada, además debe mantener estos niveles a pesar de la degradación continua que experimenta. Para ello, se formula a partir de un aceite base y una serie de aditivos con uno o varios objetivos, siendo la concentración de aditivos normalmente inferior al 10%. Puesto que el aceite base es el componente mayoritario, éste aportará las propiedades físicas características propias del lubricante y en la mayoría de los casos es químicamente inerte.

Existen tres fuentes de aceites base: biológico, mineral y sintético. Los aceites fabricados de dichas fuentes exhiben propiedades diferentes y son apropiados para diferentes aplicaciones:

- Los aceites minerales son los lubricantes más comúnmente usados en la industria. Se obtienen del petróleo y se usan en aplicaciones donde los requerimientos de temperatura son moderados. Las aplicaciones típicas de los aceites minerales son engranajes, cojinetes, motores, turbinas, etc.
- Los aceites sintéticos son sustitutos artificiales de los aceites minerales, pero con propiedades superiores a estos. Son más resistentes a la temperatura y se usan en máquinas de alto rendimiento que operan a temperaturas elevadas. También existen aceites sintéticos para aplicaciones de muy baja temperatura.
- Los aceites biológicos son apropiados en aplicaciones donde el riesgo de contaminación se debe reducir al mínimo, por ejemplo, en la industria alimenticia o farmacéutica. Son normalmente aplicados para lubricar hornos de panaderías, etc. Este tipo de aceite pueden tener dos orígenes: vegetal y animal. Los ejemplos de aceites vegetal son: el aceite de ricino, de palma y

de colza, mientras los ejemplos de aceite animal son: aceite de esperma, de pescado, etc.

2.4.2 Aceites minerales

Los aceites minerales obtenidos a partir del petróleo son los lubricantes más comúnmente utilizados. Existen ciertas ventajas y desventajas en la aplicación de un aceite mineral para lubricar mecanismos específicos, y éstas se deben considerar cuidadosamente cuando se selecciona un lubricante y se diseña un sistema de lubricación. El coste de los aceites minerales es bajo y aún con el rápido desarrollo de los aceites sintéticos, los lubricantes sólidos y los polímeros resistentes al desgaste, parece seguro su uso continuado en muchas industrias.

2.4.2.1 Fabricación de aceites minerales

El petróleo exhibe una estructura compleja, separándose en un gran número de fracciones mediante un proceso de destilación fraccionada en torre de platos. El petróleo se calienta y los vapores ascienden por la columna, en cada bandeja condensará la fracción de vapor cuyo punto de ebullición corresponde a la temperatura de la misma. Esta destilación tiene lugar a presión atmosférica y se obtienen las siguientes fracciones de petróleo destiladas en orden ascendente del punto de ebullición: gas, gasolina, queroseno, nafta, aceite diesel, aceite lubricante y residuos.

Después de la destilación, las fracciones de aceite lubricantes se someten a varias etapas de refinamiento y tratamientos, resultando una gran variedad de aceites médicos, cosméticos, industriales, de automoción y lubricantes. El proceso de refinación además involucra la destilación de aceites lubricantes impuros y la suspensión con disolventes orgánicos para la separación

preferencial de las impurezas. El propósito de la refinación es eliminar las ceras de alto peso molecular, los hidrocarburos aromáticos y los compuestos que contienen azufre y nitrógeno. Las ceras provocan que el aceite solidifique o se torne casi sólido a altas temperaturas, los compuestos aromáticos acentúan la disminución de la viscosidad del aceite con la temperatura, y los compuestos de azufre o nitrógeno pueden causar la corrosión de la superficie desgastada, provocando un desgaste acelerado. Estas impurezas también pueden generar algunos otros problemas, tales como la corrosión de los sellos. El objetivo del proceso de refinación no es producir un producto puro, sino un producto con características específicas que sean deseables para una aplicación particular.

De igual forma es posible sobre-refinar un aceite lubricante, lo cual no pasa muy a menudo en la práctica. De hecho, la mayoría de los aceites lubricantes tienen trazas de compuestos dejados deliberadamente dentro de ellos. Muchas trazas de compuestos aromáticos son antioxidantes, de ahí que un aceite sobrefinado es propenso a una oxidación rápida. Sin embargo, las trazas de compuestos son usualmente una fuente de sedimentos y depósitos sobre las superficies en contacto, de manera que es necesario un equilibrio u optimización en el proceso de refinamiento.

2.4.3 Tipos de aceites minerales

Los aceites minerales difieren unos de otros en dependencia del origen del aceite crudo y del proceso de refinación. Las diferencias fundamentales de los aceites minerales se basan en:

- La composición química.
- El contenido en azufre.

- La viscosidad.

De acuerdo a la composición química existen tres tipos de aceites minerales en función del componente mayoritario: los aceites parafínicos, los nafténicos y los aromáticos. Los parafínicos son una cadena lineal de hidrocarburos, mientras que los nafténicos están compuestos por moléculas carbonadas cíclicas con enlaces no saturados y los aceites aromáticos contienen compuestos de tipo benceno.

El contenido en azufre en los aceites minerales varía dependiendo del origen del aceite crudo y del proceso de refinación. Para dar una buena lubricación y propiedades de oxidación, es deseable pequeñas cantidades de azufre en el aceite. Se ha demostrado, por ejemplo, que un contenido en azufre entre 0,1- 1% asegura una reducción en el desgaste. Por otro lado, demasiado azufre es perjudicial para el rendimiento del equipo, dado que esto puede acelerar la corrosión de los sellos. El exceso de azufre se puede eliminar del aceite por un proceso de refinación, pero puede ser costoso.

Los aceites minerales también se pueden clasificar de acuerdo a su viscosidad, la cual depende del grado de refinación. Para aceites minerales usados comúnmente, la viscosidad varía entre 5 y 700 cSt.

2.4.4 Aceites sintéticos

El desarrollo de los lubricantes sintéticos se ha debido principalmente a que cada día la maquinaria se hace más sofisticada y los mecanismos trabajan bajo condiciones de operación más críticas, resultando ineficaces, los lubricantes minerales. A esto se suma la necesidad de formular y fabricar lubricantes de larga duración. Un lubricante sintético se puede definir como un producto elaborado a partir de una reacción química entre varios materiales de bajo peso molecular, para obtener otro de alto peso molecular

con ciertas propiedades específicas superiores a los lubricantes derivados directamente del petróleo.

Se justifica el empleo de lubricantes sintéticos cuando se quieren ampliar la frecuencia entre relubricaciones, reducir el consumo de potencia, disminuir la reposición de partes (repuestos) y alcanzar la máxima capacidad productiva de la maquinaria. Antes de utilizar estos lubricantes, es necesario analizar minuciosamente la conveniencia de su empleo, puesto que son más costosos que los derivados del petróleo. Si son bien utilizados, sin embargo, su coste real representa sólo una mínima diferencia respecto al valor inicial de adquisición. El mayor coste se debe a la serie de procesos químicos adicionales a los cuales es necesario someter la base primaria para obtener el lubricante sintético deseado. Su utilización se recomienda en lugares de difícil acceso o en equipos que deberán funcionar con intervalos prolongados de cambio de aceite. Una aplicación adecuada de los mismos minimiza la diferencia respecto al coste de un lubricante común.

Los aceites lubricantes sintéticos presentan una serie de ventajas frente a los de origen mineral, como por ejemplo: elevado índice de viscosidad (>120), elevada estabilidad térmica, buena resistencia a la oxidación, elevada conductividad térmica, bajo coeficiente de tracción, etc. Sin embargo, el elevado coste de los mismos limita su aplicación en procesos industriales en los cuales sean necesarias grandes cantidades de lubricante. Siendo para estos casos los aceites minerales los más utilizados.

En base a las características que presentan estos compuestos es muy importante justificar la elección de un aceite de este tipo, así como asegurar un uso adecuado del mismo en la máquina lubricada. Por tanto, los principales aspectos que deben tenerse en cuenta a la hora de seleccionar un lubricante pueden resumirse en:

- Verificar la compatibilidad de los sellos con el aceite.
- Debido a la alta detergencia natural de los aceites sintéticos, el equipo donde se vaya a implementar el aceite debe estar completamente limpio.
- Se debe controlar periódicamente el nivel de aceite ya que algunos se evaporan con relativa facilidad.
- Nunca se debe rellenar con un aceite diferente al que se esté usando y menos si es de base mineral.

En la actualidad se usan tres tipos básicos de lubricantes sintéticos: hidrocarburos sintéticos, silanos o hidrocarburos de silicio y organohalógenos.

- Los hidrocarburos sintéticos proporcionan un lubricante con precio similar al del aceite mineral, pero con un rendimiento superior.
- Las siliconas son resistentes a temperaturas extremas y al vacío, pero no proporcionan una buena adsorción o lubricación a extrema presión y son notablemente más costosos que los minerales.
- Los organohalógenos pueden ofrecer una lubricación efectiva por adsorción y mecanismos de lubricación de extrema presión y resistir temperaturas extremas o ataques químicos, pero también son notablemente más costosos que los minerales.

2.4.4.1 Fabricación de aceites sintéticos

En la mayoría de los casos los lubricantes sintéticos se producen a partir de hidrocarburos de bajo peso molecular derivados del petróleo. Los lubricantes halogenados también son fabricados a gran escala; los hay apropiados para bajas temperaturas o donde hay un riesgo extremo de fuego. Esos lubricantes están hechos de compuestos de etileno y halógeno en un

proceso simultáneo de halogenación y polimerización dentro de un disolvente. No todos los lubricantes sintéticos se producen por polimerización. Algunos monómeros, por ejemplo ésteres de ácidos dibásicos, también son útiles para muchas aplicaciones.

Existen una variedad casi infinita de hidrocarburos que se pueden utilizar como lubricantes. Sin embargo, la economía de la producción restringe severamente ese rango. Los aceites sintéticos que se pueden englobar en este tipo son: las polialfaolefinas, ésteres, ciclo-alifáticos y poliglicoles. Esta lista es incompleta y se puede extender mediante avances futuros en el refinado y la síntesis.

2.4.5 Aditivos y Formulación de lubricantes

Los lubricantes no formulados (aceites minerales o sintéticos) no poseen las propiedades necesarias para cumplir las demandas existentes hoy día en el campo de la lubricación. Para cumplir las funciones antes mencionadas los fluidos base necesitan de aditivos químicos. Los aditivos mejoran la capacidad lubricante de los aceites base mediante el fortalecimiento de propiedades ya existentes en el mismo o con la adición de nuevas propiedades. La calidad y cantidad de aditivos depende de la calidad del fluido base y el uso que se le vaya a dar al lubricante.

Los aditivos son compuestos muy variados que se presentan frecuentemente en estado líquido y que son añadidos a los aceites base en distintas proporciones, desde partes por millón hasta el 20% en peso en algunos aceites de motor. Cada aditivo tiene una o varias misiones que cumplir, clasificándose al respecto.

Los aditivos añadidos al aceite base persiguen, fundamentalmente, alguno de los siguientes objetivos:

- Mejorar las características de desgaste y fricción.
- Mejorar la resistencia a la oxidación y controlar la corrosión.
- Controlar la contaminación por productos de reacción, partículas antidesgaste y otros residuos.
- Reducir la disminución de la viscosidad del lubricante a altas temperaturas.
- Reducir el punto de congelación, evitar la formación de espumas, etc

Los aditivos lubricantes se pueden clasificar como: químicamente activos o inertes. Los aditivos químicamente activos, tales como los dispersantes, los detergentes, los antidesgaste, y de extrema presión, y los inhibidores de la corrosión, poseen la capacidad de interactuar químicamente con los materiales para formar una película protectora. Los aditivos químicamente inertes, como los emulsionadores, demulsionadores, depresores del punto de congelación, inhibidores de espuma y los mejoradores de viscosidad, mejoran las propiedades físicas que son críticas para el funcionamiento efectivo del lubricante.

La mayoría de los aditivos, excepto quizás algunos mejoradores del índice de viscosidad y depresores del punto de congelación, consisten en una molécula con un grupo no polar (una cadena de hidrocarburo) y otro polar (contiene oxígeno, nitrógeno, azufre o fósforo). El grupo de hidrocarburo es de una longitud de carbono suficientemente larga para brindar las características deseadas de solubilidad al aditivo. Los aditivos que requieren la mayor solubilidad en el aceite (dispersantes, detergentes y mejoradores del índice de viscosidad) usualmente contienen grandes grupos de hidrocarburo. Un balance apropiado de las características polares y no polares es crítico para la actuación de los aditivos.

Debido a la actividad química de los aditivos, los mismos pueden interactuar entre sí sinérgica o antagónicamente. El trabajo del formulador es hallar el rendimiento buscado mediante la minimización de los efectos antagónicos y la maximización de los efectos sinérgicos de los aditivos a través de un balance cuidadoso.

2.4.5.1 Aditivos de Adsorción o Modificadores de Fricción

Los aditivos conocidos como modificadores de fricción los conforman determinados ácidos grasos, así como ésteres y aminas de los mismos; están formados generalmente por un grupo polar (-OH) en uno de los extremos de la molécula, el cual reacciona con la superficie de contacto adheriéndose a la misma. La película formada reduce la fricción y el desgaste, pero sólo es efectiva a temperaturas y cargas relativamente bajas.

Una característica de este tipo de aditivos es la capacidad de formar una cadena de átomos de carbono con longitud suficiente para garantizar la creación de una película duradera y estable. Entre estos aditivos se pueden citar los derivados de ácidos grasos de azufre, el ácido fosfónico, la N-acil sarcosina y los derivados del ácido esteárico como los estearatos de metilo y etilo.

Los aditivos de adsorción y modificadores de fricción son muy sensibles a los cambios de temperatura ya que pierden su efectividad a temperaturas comprendidas entre los 80 y los 150°C dependiendo del aditivo utilizado, aunque es posible modificar esta temperatura mediante el cambio de la concentración de aditivo. Por ejemplo, aumentando la concentración podemos aumentar la temperatura crítica aunque esto lleva consigo también un aumento en el coste.

2.4.5.2 Aditivos Antioxidantes

Los aceites minerales inevitablemente se oxidan durante su uso, produciendo incrementos significativos en fricción y desgaste que afectan el comportamiento de las máquinas. El principal efecto de la oxidación es un gradual aumento en la viscosidad y de la acidez del aceite. Los porcentajes de oxidación de un aceite se ven afectados por los metales en contacto con el aceite, la cantidad de agua y oxígeno en el aceite, la presencia de radiación ionizada y, principalmente, por la temperatura (un aumento de temperatura de 10°C puede provocar el triple de oxidación).

Los aditivos antioxidantes más comúnmente utilizados son el zinc dialquilditiofosfato, los desactivadores metálicos, los hidrocarburos simples (derivados del fenol, aminas y fosfatos orgánicos) y el azufre y el fósforo, que en forma elemental o incorporados en moléculas son también efectivos como aditivos antioxidantes y antidesgaste. Estos dos últimos cayeron en desuso ya que ocasionaban problemas de corrosión o podían precipitar y hacer perder efectividad al lubricante. Los aditivos antioxidantes normalmente se agregan a los aceites en pequeños porcentajes que rondan el 1% en peso.

Los aditivos antioxidantes se pueden clasificar en tres grupos:

Desactivadores metálicos: estos aditivos inhiben la oxidación del aceite por la introducción de un metal como el hierro y el cobre mediante complejación. Los principales aditivos de este tipo son derivados del ácido salicílico, la lecitina, y de los ácidos fosfórico, acético y cítrico, un ejemplo de éstos es el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA). Estos aditivos son añadidos al aceite en cantidades de entre 5 y 30 mg/kg.

Inhibidores de radicales (o inhibidores de propagación): estos aditivos funcionan neutralizando los radicales de peróxido. Ejemplos son las diarilaminas, las dihidroquinolinas y los fenoles estéricamente impedidos. Se

caracterizan por su baja volatilidad (marca los porcentajes de utilización entre el 0.05 y 1% en peso) y un tiempo de vida largo.

Aditivos que descomponen los peróxidos: estos aditivos actúan neutralizando los hidroperóxidos que podrían acelerar el proceso de oxidación. Un ejemplo para este tipo de aditivos es el zinc dialquilditiofosfato (ZnDDP). Este aditivo se añade normalmente en aceites para motores en pequeñas cantidades entre el 1 y el 2% en peso. La descomposición de los peróxidos causa una degradación gradual del ZnDDP en el aceite disminuyendo su eficacia como aditivo. La combinación de aditivos antioxidantes como hidrocarburos simples y organometálicos es, normalmente, más efectiva que la actuación de cada aditivo por separado. El ZnDDP no actúa como un verdadero antioxidante, simplemente descompone los peróxidos que son precursores de la oxidación de los polímeros.

2.4.5.3 Aditivos Controladores de la Corrosión

Son aditivos cuya función es disminuir o evitar la corrosión del metal por parte del fluido lubricante. Existen dos grupos diferenciados: inhibidores de la corrosión e inhibidores de la oxidación.

Inhibidores de la corrosión: estos aditivos son usados para proteger las superficies de metales no ferrosos (cobre, aluminio, estaño, cadmio, etc.) de rodamientos, cierres, etc., contra el ataque corrosivo de elementos reactivos como fósforo, azufre, yodo, cloro y productos de la oxidación. Algunos de estos productos de la oxidación son muy ácidos y deben ser neutralizados antes de que causen algún daño en las partes operativas de la máquina. Los más usados dentro de este tipo de aditivos son: el benzotriazol, los azoles sustituidos, el zinc dietilditiofosfato (una de las variantes del ZDDP en la que el término alquil se refiere a grupos etilo), el zinc dietilditiocarbamato (ZDEC) y los fosfitos de trialquilo.

Inhibidores de la oxidación: estos aditivos son usados para proteger los componentes ferrosos contra la corrosión. Los principales factores que contribuyen a acelerar el ataque corrosivo de estos componentes son el oxígeno disuelto en el aceite y el agua, pudiendo causar un ataque electroquímico acelerado con el incremento de temperatura. Los principales aditivos que forman este grupo son los sulfonatos metálicos (por ejemplo de calcio o de bario), los succinatos de amina y otros ácidos polares orgánicos. Los sulfonatos de calcio y de bario son más recomendables en condiciones de corrosión severas que el resto.

2.4.5.4 Aditivos de Control de Contaminación

Han sido desarrollados varios aditivos para controlar la acidez de los productos de la combustión sulfurosa o del fuel sucio y prevenir la acumulación de hollín de combustión y partículas de desgaste, tan destructivo para los motores. Los aditivos diseñados para prevenir estos efectos se conocen con el nombre de detergentes o dispersantes. Las principales funciones de estos aditivos son:

- Neutralizar algunos ácidos formados durante la combustión del fuel.
- Prevenir la formación de laca y barniz en las partes operativas del motor.
- Prevenir la fluctuación y aglomeración de partículas y depósitos de carbón que pueden obstruir los conductos del aceite.

Existen dos tipos de dispersantes:

Dispersantes suaves: son aditivos formados por hidrocarburos simples o compuestos sin ceniza (no quedan óxidos tras su combustión) como por ejemplo polímeros de bajo peso molecular (ésteres de metacrilato), largas

cadenas de alcoholes o compuestos vinílicos. Estos dispersan los hollines de carbón y las partículas de desgaste.

Dispersantes básicos: como pueden ser las sales de calcio, bario o zinc de los ácidos sulfónico, fenólico y salicílico. El término básico hace referencia a que son preparados en presencia de un exceso de álcali. El aditivo está presente en el aceite mineral como un coloide y sirven para neutralizar acumulaciones de algún ácido en el aceite durante el servicio y su principal desventaja es que aceleran la oxidación del aceite, necesitando por tanto de la adición de un aditivo antioxidante.

2.4.5.5 Aditivos Mejoradores de la Viscosidad

Los aditivos que detienen la pérdida de la viscosidad del aceite con la temperatura se conocen como mejoradores del índice de viscosidad. Este grupo de aditivos está formado por polímeros de elevado peso molecular disueltos en el aceite, que pueden cambiar de forma esférica a lineal con el incremento de la temperatura debido a la enorme solubilidad del polímero en el aceite. Las moléculas lineales o desarrolladas causan un gran incremento en la viscosidad en comparación con las moléculas esféricas. Aditivos típicos mejoradores de viscosidad son los polimetacrilatos con un peso molecular entre 10.000 y 100.000 Dalton, se usan en pequeñas concentraciones de un tanto por ciento en peso bajo en el aceite.

El principal problema de estos aditivos es que son fácilmente degradables por la oxidación y las excesivas velocidades de deformación que pueden provocar pérdidas permanentes o temporales de viscosidad. Los aditivos mejoradores de la viscosidad no afectan significativamente al coeficiente de presión-viscosidad. En general, estos aditivos son inertes y no interfieren con otros aditivos, aunque algunos de ellos pueden llegar a afectar a los porcentajes de desgaste.

2.4.5.6 Aditivos Depresores del Punto de Congelación

Estos aditivos son básicamente los mismos compuestos que los aditivos mejoradores de viscosidad. Previenen la formación de cristales de cera a bajas temperaturas, deslocalizando la estructura de la misma. Se aplican principalmente en operaciones a baja temperatura cuando el aceite base es parafínico. En los casos en los que se conoce con antelación que la temperatura de operación no va a descender por debajo de cero grados, no se utilizan en la formulación de aceites.

2.4.5.7 Aditivos Inhibidores de Espumas

Los inhibidores de espumas sirven para desestabilizar la espuma generada durante el funcionamiento de la máquina. Normalmente son largas cadenas de polímeros de silicona que se utilizan en porcentajes del 0.05 a 0.5% en peso.

2.4.5.8 Aditivos Antidesgaste (AW)

Los aditivos antidesgaste reaccionan con la superficie de metal mediante un mecanismo de quimisorción, creando una película protectora que resulta mucho más duradera que la creada por los aditivos de adsorción o modificadores de fricción. Los principales aditivos pertenecientes a este grupo son el dialquilditiofosfato de zinc (ZnDDP), el tricresilfosfato, el lauril fosfato, el dietil fosfato, el dibutil fosfato, el tributil fosfato y el triparacresilfosfato, empleados en concentraciones entre el 1% y el 3% en peso. A continuación se detalla cada uno de ellos.

Dialquilditiofosfato de Zinc (ZnDDP): aunque en un principio fue desarrollado como aditivo antioxidante y detergente, posteriormente se descubrieron sus

propiedades como aditivo antidesgaste y de extrema presión suave. Aunque muchos autores reconocen sus características como aditivo de extrema presión, normalmente es clasificado dentro del grupo de aditivos antidesgaste. Su uso más extendido es en formulaciones de aceites de motor. El mecanismo de lubricación del ZnDDP es bastante complejo ya que existen varios elementos activos como son el zinc, el fósforo, el azufre, el oxígeno y el agua que intervienen en la formación de la película protectora.

Tricresilfosfato (TCP): ha sido usado como aditivo antidesgaste durante más de cincuenta años y su mecanismo de funcionamiento es similar al ZnDDP, es decir, formando una película protectora quimisorbida. Este aditivo destaca porque es efectivo en la reducción del desgaste hasta temperaturas próximas a los 200°C. Por encima de esta temperatura, la película será menos efectiva y más frágil, limitando la capacidad de carga.

El dilauril fosfato, el dibutil fosfato, el dietil fosfato, el tributil fosfato y el triparacresilfosfato tiene la misma función que los dos aditivos antidesgaste anteriores, forman una película protectora quimisorbida que protege contra el desgaste a las superficies en contacto. Algunos de estos aditivos (dietil fosfato) pueden poseer propiedades destacables como aditivos de extrema presión.

2.4.5.9 Aditivos de Extrema Presión (EP)

Los aditivos de extrema presión tienen como objetivo reaccionar con la superficie del metal bajo cargas y/o velocidades extremas, ya que bajo estas condiciones se alcanzan temperaturas muy elevadas y la superficie del metal se calienta. Los aditivos de extrema presión (EP) contienen al menos un elemento no metálico (azufre, antimonio, yodo, cloro) que puede atacar la superficie del metal y crear una cubierta protectora sobre éste que reduce la fricción y el desgaste. Esta reacción se asemeja a una ligera corrosión, por lo que la concentración del aditivo es un factor crítico. Si ésta es elevada puede producirse una corrosión excesiva mientras que si es demasiado baja las superficies podrían no estar protegidas y darse el fallo.

Existen diferentes tipos de aditivos de extrema presión comúnmente usados entre los cuales destacan el disulfuro de dibencilo, el Isobuteno con sustituyentes de fósforo y azufre, el triclorocetano y las parafinas cloradas, los aceites de esperma sulfurados y clorados, los derivados sulfurados de ácidos grasos y aceites de esperma, el cloruro de cetilo, el mercaptobenzotriazol, las ceras cloradas, los naftenatos de plomo, los aceites parafínicos clorados y el disulfuro de molibdeno. También existen otros compuestos organoclorados basados en estaño, pero no son muy populares debido a problemas de toxicidad y de estabilidad.

Disulfuro de dibencilo: es un aditivo de extrema presión en el que el azufre aparece posicionado en el centro de la molécula, entre dos radicales orgánicos. Ejemplos destacables de este tipo de aditivos son el disulfuro de butilfenol y el disulfuro de difenilo en los que el radical de hidrocarburo presente en la molécula, por ejemplo el difenilo, proporciona un control útil para minimizar la corrosión.

Triclorocetano y parafinas cloradas: son aditivos de extrema presión muy potentes, pero también muy corrosivos, particularmente cuando están

contaminados con agua. Sólo se aplican cuando existen problemas de lubricación severa.

Aceites minerales parafínicos y ceras: pueden ser clorados para producir aditivos de extrema presión, aunque no son muy utilizados puesto que los aceites minerales son bastante variables en su composición y no se obtienen resultados destacables. Además pueden tóxicos y corrosivos.

Aceites de esmeralda sulfurados y clorados: son aditivos de extrema presión, efectivos, pero resultan ya algo obsoletos aunque se siguen utilizando en ejes de camiones pesados.

Derivados sulfurados de ácidos grasos y aceites de esmeralda: son aditivos que proporcionan propiedades de extrema presión junto con propiedades de lubricación por adsorción. Un ejemplo de ellos es el naftenato de plomo sulfurado que ha sido usado como aditivo en engranajes del tipo hipoide (cónicos) de los coches. Aunque en general este tipo de aditivos no son tóxicos, éste en particular es venenoso y por esta razón ha ido cayendo poco a poco en desuso. Estos aditivos todavía pueden encontrarse en aceites de motor y fluidos de corte en operaciones de mecanizado.

Disulfuro de molibdeno: este aditivo proporciona lubricación en contactos de elevada presión creando una película de lubricante sólido. No es corrosivo, pero es muy sensible a la contaminación por agua ya que causa su descomposición.

2.4.6 Diagrama de Stribeck

Las condiciones de fricción o lubricación se expresan de forma gráfica mediante el denominado diagrama de Stribeck o “Gumbel-Hersey”,

desarrollado en el siglo XIX y que muestra la variación del coeficiente de fricción con el número adimensional de Hersey (Fig. 4.43).

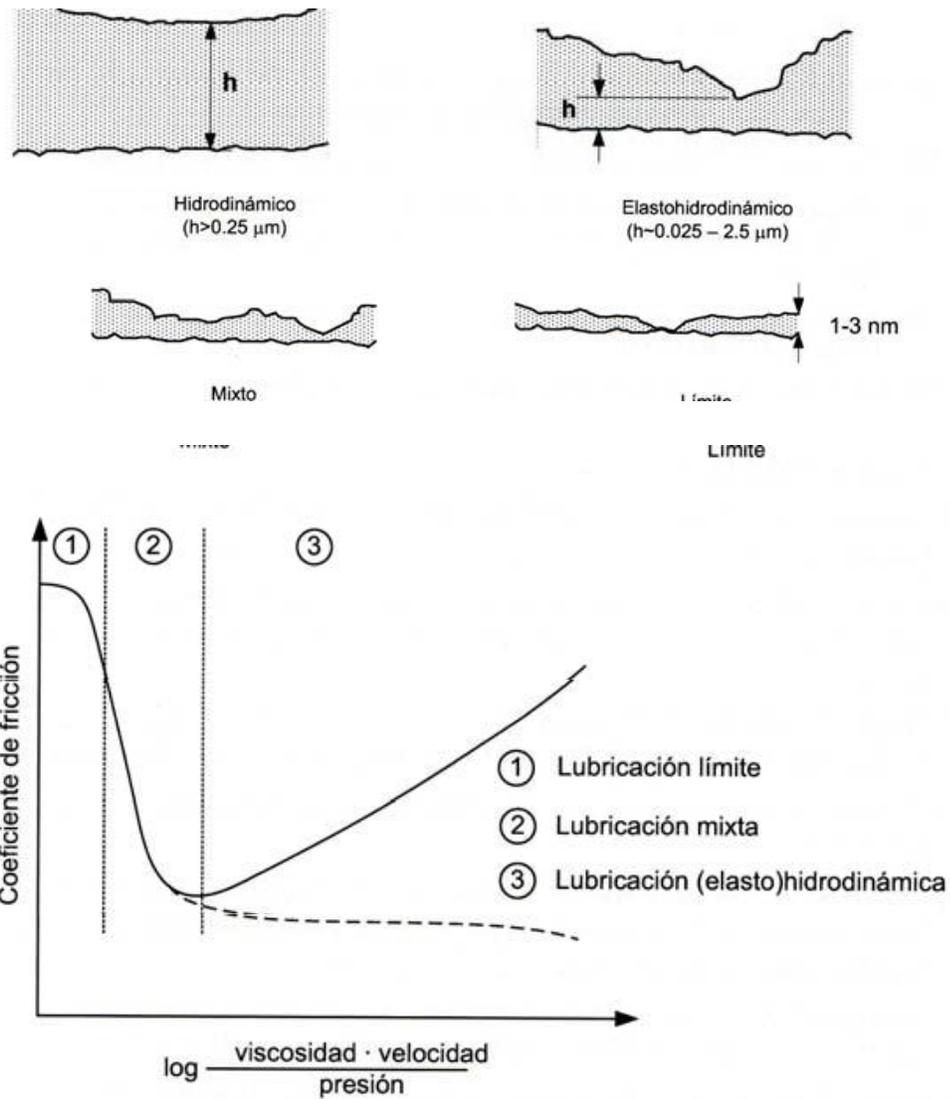


Figura 14. Diagrama de Stribeck

Considerando (para una determinada viscosidad y presión) un régimen de lubricación límite, con un elevado coeficiente de fricción debido al rozamiento entre las asperezas de las superficies en contacto, al aumentar la velocidad,

el régimen sería mixto debido al crecimiento del espesor de película lubricante inducida por el movimiento y por tanto el coeficiente de fricción se reduce. Si la velocidad sigue aumentando se alcanzará el régimen hidrodinámico, el coeficiente de fricción vuelve a aumentar, no como consecuencia de la fricción entre las superficies, sino debido a la fricción entre las capas de lubricante. Por lo tanto, cuando la película no es suficientemente gruesa para proporcionar una separación completa entre las asperezas existentes en la zona de contacto, existirá alto desgaste por los altos esfuerzos cortantes que resultan del contacto directo entre metales.

Se define de esta manera, “el parámetro de película” o “coeficiente lambda” en la ecuación 1, y se describirá su rango de valores para los tres regímenes de lubricación. La relación entre el parámetro de película adimensional λ y el espesor mínimo de película (h_0), es:

$$\lambda = \frac{h_0}{(ra^2 + rb^2)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{Ecuación 1. Parámetro de película}$$

donde:

ra = Rugosidad superficial de la superficie del cuerpo A.

rb = Rugosidad superficial de la superficie del cuerpo B.

El parámetro de película sirve para definir los cuatro regímenes de lubricación principales. El rango para estos cuatro regímenes es:

- a. Lubricación hidrodinámica, $5 \leq \lambda \leq 100$
- b. Lubricación elastohidrodinámica $3 \leq \lambda \leq 100$
- c. Lubricación mixta, $1 \leq \lambda \leq 5$
- d. Lubricación límite, $\lambda \leq 1$

2.4.7 Lubricantes con películas delgadas

Son lubricantes que tienen una película que no son lo suficientemente gruesa como para mantener una separación total entre las superficies en todo momento. También llamadas lubricación a películas mixtas o límite. Cuando no es práctico o posible el suministro de suficiente cantidad de lubricante, las superficies se mueven bajo condiciones de película lubricante muy finas. Sin embargo, aún, en estos casos, existe suficiente aceite de forma que parte de la carga alcanza a ser soportada por la película lubricante y parte por el contacto metal-metal entre las superficies.

2.4.8 Lubricantes con películas solidas

Son lubricantes cuyas películas permanecen adheridas a las superficies en movimiento casi permanentemente. La forma más simple de película lubricante ocurre cuando se aplica un lubricante sólido de baja fricción a un agente, grasa o aceite y se aplica en forma más o menos parecida a un lubricante fluido normal. El lubricante sólido actúa cuando su agente ha sido desplazado o evaporado como en el caso de solventes, permaneciendo en la zona de contacto y realizando su trabajo de lubricación. También se aplican lubricantes sólidos en forma directa, mezclados con resinas o se combinan con algunos elementos de los equipos, conocidos como elementos sectorizados.

2.4.9 Densidad del lubricante y gravedad específica

La densidad del lubricante es importante en cálculos ingenieriles y algunas veces ofrece una forma simple de identificar los lubricantes. Tanto la densidad del lubricante como la gravedad específica (o densidad relativa) se

usan a menudo para caracterizar el petróleo. Esto da una idea aproximada de la cantidad de gasolina y queroseno que están presentes en el petróleo. Sin embargo, la densidad del aceite es confundida a menudo con la densidad relativa (o gravedad específica). Esta última es definida como la relación entre la masa de un volumen dado de aceite a temperatura T_1 y la masa de un volumen igual de agua pura a temperatura T_2 , generalmente $T_2 = 4^\circ\text{C}$.

Por otro lado, la densidad es la masa de un volumen dado de aceite [kg/m^3], siendo esta para un aceite mineral típico de unos $850 \text{ kg}/\text{m}^3$ y, ya que la densidad del agua a una temperatura $T_2 = 4^\circ\text{C}$ es de $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$, la gravedad específica de aceites minerales es típicamente 0.85.

2.4.10 Propiedades térmicas de los lubricantes

Las propiedades térmicas más importantes de los lubricantes son el calor específico y la conductividad y difusividad térmica. Esos tres parámetros son importantes en la evaluación del efecto de calentamiento en la lubricación, es decir, las propiedades de enfriamiento del aceite, la temperatura de operación de las superficies, etc. También son importantes en el diseño de cojinetes.

- Calor específico

El calor específico varía linealmente con la temperatura y se eleva incrementando la polaridad o el hidrógeno enlazado de las moléculas. Normalmente para un aceite es la mitad del calor específico del agua. Para lubricantes basados en hidrocarburos minerales y sintéticos, el calor específico se encuentra en el rango de $1800 \text{ J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ a 0°C a $3300 \text{ J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ a 400°C . Se puede utilizar la ecuación [2] para una estimación aproximada.

$$C_p = (1.63 + 0.0034T) / S^{0.5} \quad [2]$$

Donde:

C_p – calor específico [J/kg·K].

T – temperatura de interés [°C].

S – densidad relativa o gravedad específica a 15.6°C.

- Conductividad térmica

La conductividad térmica también varía linealmente con la temperatura y se ve afectada por la polaridad y el hidrógeno enlazado de las moléculas. En la mayoría de los lubricantes basados en hidrocarburos minerales y sintéticos está en el rango entre 0.14 W/m·K a 0°C a 0.11 W/m·K a 400°C. Se puede usar la ecuación [3] para una estimación aproximada.

$$K = (0.12 / S) \times (1 - 1.667 \times 10^{-4} T) \quad [3]$$

Donde:

K – conductividad térmica [W/m·K].

T – temperatura de interés [°C].

S – gravedad específica a 15.6°C.

- Difusividad térmica

La difusividad térmica es un parámetro que describe la temperatura propagándose dentro del sólido y se define como:

$$\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p} \quad [4]$$

Donde:

α – difusividad térmica [m²/s].

K – conductividad térmica [W/m·K].

ρ – densidad [kg/m³].

C_p – calor específico [J/kg·K].

2.4.11 Características de la temperatura de los lubricantes

Las características de la temperatura son importantes en la selección de un lubricante para una aplicación específica. Además, el intervalo de temperatura sobre el cual el lubricante puede ser usado es de extrema importancia. Los aceites a altas temperaturas se descomponen o degradan, mientras que a bajas temperaturas se pueden convertir en sólidos e incluso congelarse. Se pueden degradar por descomposición térmica y oxidación. Durante el servicio, los aceites pueden liberar depósitos y lacas sobre las superficies en contacto, formarse emulsiones con agua, o producirse una espuma cuando son vigorosamente agitadas. Esos efectos son indeseables y han sido tema de intensa investigación. La degradación del aceite no sólo afecta al mismo, sino que en gran medida lleva a daños del equipamiento lubricado.

Un ejemplo de daños secundarios es la corrosión causada por la acidez del aceite oxidado. Las propiedades térmicas más importantes de un lubricante son su punto de congelación, temperatura de inflamación, volatilidad, estabilidad a la oxidación y estabilidad térmica, tensión superficial, etc.

- Punto de congelación y punto de niebla

El punto de congelación de un aceite es la temperatura más baja a la cual el aceite apenas fluirá cuando éste es enfriado. Para determinar el punto de congelación el aceite es calentado primeramente para asegurar la solución de todos los ingredientes y la eliminación de cualquier influencia de

tratamientos térmicos anteriores. Cuando el aceite es enfriado a una velocidad específica y, a intervalos de 3°C, el recipiente está inclinado para verificar cualquier movimiento. La temperatura de 3°C por encima del punto al cual el aceite para su movimiento es llamado punto de congelación. Esta propiedad del aceite es importante en la lubricación de muchos sistemas expuestos a bajas temperaturas, tales como máquinas automotrices, máquinas de la construcción, aplicaciones militares y espaciales. Cuando el aceite cesa de fluir indica que ha ocurrido suficiente cristalización de la cera o que el aceite ha alcanzado un estado altamente viscoso.

En este punto la cera o la parafina de alto peso molecular precipita desde el aceite. Éste es un punto crítico puesto que la operación exitosa de una máquina depende del suministro continuo de aceite a las partes en movimiento. La viscosidad del aceite en el punto de congelación es usualmente muy grande, es decir, varios cientos de [Pa·s]. El valor exacto es de bajo significado práctico, lo que es importante es la temperatura mínima a la cual el aceite puede ser usado.

El punto de niebla es la temperatura a la cual la cera parafínica y otros materiales comienzan a precipitar. El comienzo de la precipitación de la cera causa una oscuridad diferente o neblina visible en el fondo del frasco. Esta ocurrencia tiene algunas aplicaciones prácticas en capilares o sistemas de alimentación de mechas donde la cera formada puede obstruir el flujo de aceite. Esto se limita solamente a los fluidos transparentes puesto que la medición se basa puramente en la observación.

- Punto de inflamación y punto de fuego

La temperatura de inflamación del lubricante es la temperatura a la cual su vapor encenderá. Para determinar esta temperatura, se calienta el aceite a una presión estándar hasta una temperatura bastante alta para producir suficiente vapor y formar una suspensión inflamable con el aire. El punto de

fuego del aceite es la temperatura a la cual se produce suficiente vapor para mantenerse quemando después del encendido. Los puntos de inflamación y de fuego son muy importantes desde el punto de vista de la seguridad puesto que solamente ellos constituyen los factores que definen el riesgo de fuego de un lubricante. En general, los puntos de inflamación y de fuego se incrementan con el aumento del peso molecular. Para aceites lubricantes típicos el punto de inflamación es 210°C mientras que el punto de fuego es 230°C.

2.5 Viscosidad

La viscosidad del aceite es un parámetro que juega un rol fundamental en la lubricación. Además, la misma cambia con la temperatura, el índice de cizallamiento y la presión, y el espesor de la película de aceite generada es usualmente proporcional a ésta.

2.6 Nano materiales y Nanopartículas

Los nano materiales son una nueva clase de materiales (sean cerámicos, metales, semiconductores, polímeros, o bien, una combinación de estos), en donde por lo menos una de sus dimensiones se encuentra entre 1 y 100 nm. Éstos representan una transición entre moléculas y átomos, y un material con dimensiones de sólido volumétrico (“bulk”). Mientras que un material en el orden micrométrico aun cuando presenta propiedades similares a las de un sólido volumétrico, en los nanomateriales, debido a su tamaño reducido a unos cuantos nanómetros; se modifican sus propiedades que finalmente difieren del mismo material con dimensiones de sólido volumétrico, de las moléculas y los átomos

Los avances más recientes se centran en una nueva generación de materiales compuestos, en particular para recubrimientos, basados en nanopartículas inorgánicas de tipo fullereno (forma alotrópica del carbono que no existe en la naturaleza y cuya molécula C₆₀, tiene la estructura de un balón de fútbol). Las nanopartículas se incorporarían a recubrimientos, superficies de los materiales y lubricantes líquidos, para reducir significativamente la fricción y el desgaste en los contactos tribológicos.

2.6.1 Uso de Nanopartículas como aditivos AW y EP

Los aditivos tradicionales frecuentemente son compuestos que contienen cloro, azufre y fósforo, y están diseñados para reaccionar químicamente con las superficies metálicas formando capas de cloruros, sulfuros o fosfuros, con una baja resistencia al cizallamiento. En la actualidad, como una medida de protección medioambiental se ha restringido el uso de estos compuestos, por lo que el desarrollo de nuevos aditivos menos contaminantes se ha convertido en un objetivo para los investigadores.

Durante 40 años se le ha prestado mucha atención a los aditivos orgánicos basados en boratos, debido a que los mismos poseen una buena combinación de propiedades, tales como: resistencia al desgaste, reductores de la fricción, inhibidores de la oxidación, y compatibilidad con los pares friccionales. En los últimos años se han desarrollado complejos Mo-S como una nueva clase de aditivos de extrema presión, y se ha llegado a la conclusión de que las propiedades de extrema presión de algunos aditivos inorgánicos son superiores a las de algunos orgánicos.

Desafortunadamente, la insolubilidad y la dificultad de obtener dispersiones estables de polvos inorgánicos restringe su aplicación en aceites lubricantes. En la última década, se han conseguido sintetizar numerosas nanopartículas

inorgánicas que se han utilizado como aditivos lubricantes, comprobándose que la estabilidad de la dispersión de nanopartículas en aceites base es superior a la de partículas micrométricas. La estabilidad de la suspensión de nanopartículas en aceite base se puede incrementar mediante la modificación superficial o recubrimiento de las nanopartículas con compuestos tales como: carbono, dialquilditiofosfato (DDP) o ácido tetrafluorobenzoico.

Otras ventajas de la utilización de nanopartículas como aditivos en aceites lubricantes es el hecho de que al ser la rugosidad de las superficies deslizantes del orden de los micrómetros, las nanopartículas pueden depositarse en las irregularidades superficiales y formar una capa resistente al desgaste. Asimismo, la reducción del tamaño de partícula hasta escala nanométrica pone de manifiesto varias propiedades especiales tales como efectos de tamaño cuántico, una mayor área superficial y una temperatura de sinterización menor. Esta última propiedad facilita la creación de una película protectora muy fina, la cual contribuye a la disminución de la fricción y el desgaste. Adicionalmente este tipo de partículas de tamaño nanométrico no quedan retenidas en los filtros. No obstante, se ha encontrado que partículas nanométricas de cierta dureza pueden actuar bajo ciertas condiciones como agentes abrasivos.

Como puede verse las nuevas tendencias para la mejora tribológica de materiales son muy diversas. Al igual que otros muchos ámbitos científicos, los esfuerzos se centran en una nanoestructuración de la materia en busca de una ordenación más íntima de los granos que componen el material. Como consecuencia, se produce una mejora de la resistencia a la fricción y el desgaste de los materiales.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En esta parte del trabajo, se describen los materiales y métodos experimentales utilizados para el desarrollo del estudio. En primer lugar se indican los lubricantes a utilizar y sus principales propiedades. Seguidamente se describen los diferentes aditivos a usar y las concentraciones correspondientes a cada experimento. De igual forma se detalla la metodología a seguir en la caracterización de las muestras de acero.

El objetivo del trabajo consistió, en la evaluación tribológica de dos lubricantes. El primero de ellos fue un lubricante base aceite sin aditivos químicos, y el otro, un lubricante, el cual contenía en su composición un tipo de aditivo desconocido. A ambos lubricantes se les adicionó diferentes concentraciones de nanopartículas de óxido de circonio (ZrO_2) al (0,5 y 2) % respectivamente.

La efectividad de estos lubricantes se determinaron mediante ensayos bajo la configuración bloque sobre anillo con medición del coeficiente de fricción a cargas moderadas, utilizando un Tribómetro TE53SLIM, las muestras del bloque son de acero AISI 1045 y los anillos de ST-52-DIN 2391-BK. Se utilizó una velocidad de giro de 300 rpm, una carga de 165 N (0.1 GPa), a temperatura inicial de 25°C y con una distancia deslizada de 1442 m.

Los resultados obtenidos incluyen la determinación del volumen desgastado en los bloques de acero AISI 1045 realizados mediante imágenes de microscopía confocal (Leica DCM 3D).

Por su parte los mecanismos de desgaste se estudiaron mediante el análisis de la morfología superficial de las huellas de desgaste a través de la técnica

de microscopía electrónica de barrido (MEB) en un equipo JEOL 5600 y el microanálisis químico se llevó a cabo por medio de la técnica de espectroscopía de rayos X por energía dispersiva (ERED).

Por su parte la caracterización de las muestras de acero AISI 1045 previo a los ensayos se realizó, a través de la medición de rugosidad superficial y la determinación de la dureza.

3.1 Materiales utilizados

Aceites Base

Se seleccionaron tres tipos de aceite base: 32, 46, 68 Centistocks y tres tipos de aceites formulados Telex: 32, 46, 68 Centistocks todos comercializados por Repsol YPF. Estos lubricantes fueron escogidos por su baja toxicidad y por su moderado precio.

Aceites Telex

Son aceites especialmente diseñados para su utilización en circuitos hidráulicos que requieran lubricantes con marcadas propiedades antidesgaste. Elaborados con bases cuidadosamente seleccionadas a las que se incorporan aditivos específicos (desconocidos) para mejorar notablemente sus propiedades.

Usos recomendados:

Están especialmente indicados para circuitos hidráulicos y maquinaria de obras públicas equipados con cualquier tipo de bombas, especialmente cuando trabajan a presiones elevadas y, en general, para todo tipo de mecanismos que requieren aceites estables, y en los que se precise alcanzar, y aún superar, los máximos niveles antidesgaste exigidos por las normas internacionales

Propiedades:

- Gran resistencia a la oxidación y formación de lodos.
- Gran capacidad de desaireación.
- Alto índice de viscosidad.
- Muy buenas cualidades antiespumantes y antiherrumbre
- Excelente demulsividad.
- Excelente filtrabilidad
- Muy Buena compatibilidad con juntas y retenes.
- Máximo nivel antidesgaste.
- Excelente capacidad de carga.
- Elevada estabilidad térmica e hidrolítica.

3.1.2 Nanopartículas

Se seleccionaron partículas de escala nanométricas de ZrO_2 , de morfología esférica y de tamaños entre 15 y 20 nanómetros.

Tabla 1. Propiedades morfológicas de las nanopartículas utilizadas.

Materiales	Propiedades				
Nanopartículas	Morfología	Pureza (%)	Tamaño (nm)	Sistema Cristalino	Densidad Real / Aparente (g/cm ³)
ZrO ₂	Esférica	99.9	15-20	Monoclínico	5.89 / 0.25



Figura 15. Nanopartículas de ZrO₂

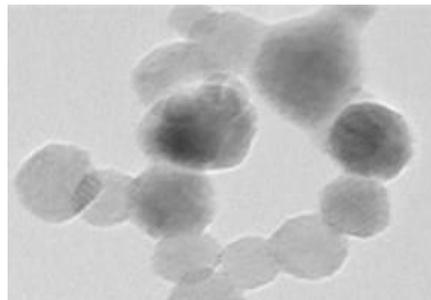


Figura 16 Nanopartículas de ZrO₂

3.1.3 Probetas

Las probetas utilizadas han sido las propias para cada tipo de ensayo realizado, en el caso de los ensayos de desgaste a cargas media, la máquina utilizada fue un tribómetro TE53SLIM con una configuración bloque-anillo. Los anillos empleados tienen un diámetro de 60 mm, y valores medios de

dureza de 280 HV500g y rugosidad superficial de $Ra = 0.27 \mu\text{m}$. Las dimensiones de los bloques son de $12.7 \times 12.7 \times 14 \text{ mm}$, con valores medios de dureza de 266 HV500g y rugosidad superficial de $Ra = 0.35 \mu\text{m}$

Tabla 2. Propiedades de las probetas.

Materiales	Propiedades
Probetas	Composición química
Bloques – AISI 1045	0.40-0.50%C, 0.15-0.40%Si, 0.50-0.80%Mn, <0.035%P, <0.035%S, Fe
Anillos – ST-52-DIN 2391-BK	0.16–0.21%C, 0.15–0.45%Si, 1.30 – 1.60%Mn, <0.045%P, <0.045%S

3.2 Preparación de las suspensiones

Se prepararon suspensiones a partir de seis tipos de aceites, tres aceites bases a diferentes viscosidades e igualmente tres aceites formulados a diferentes viscosidades, en cada caso se aditaron con nanopartículas de ZrO_2 a dos tipos de concentraciones 0,5% y 2% en peso. De igual manera se realizaron ensayos a las mismas suspensiones sin aditarlas con nanopartículas.

En primer lugar mediante una balanza de precisión Explorer pro con capacidad para 210 g se pesaron las nanopartículas correspondientes a un tipo de concentración y se añadieron a 30 ml del respectivo aceite. Para conseguir suspensiones con un grado de desagregación correcta de las nanopartículas la mezcla obtenida fue agitada en una sonda por ultrasonidos.

Debido a que se dificultaba para poder disolver altos porcentajes de nanopartículas mientras se aumentaba el índice de viscosidad se estudiaron posibles parámetros de tiempo para la agitación ultrasónica los cuales fueron: 15, 22 y 32 min a la vez que aumentaba la viscosidad del aceite respectivamente 32, 46, 68 centistocks, a una amplitud del 63%. En este proceso se produjo un aumento de la temperatura de las muestras, lo cual favorece a la destrucción de las aglomeraciones de nanopartículas.



Figura 17. Agitador por ultrasonidos



Figura 18. Balanza de precisión

3.3 Evaluación Tribológica

3.3.1 Procedimiento experimental

Se evaluó la influencia de la aditivación con nanopartículas de óxidos de zirconio, sobre el comportamiento tribológico a cargas medias de los aceites bases y aceites formulados mencionados anteriormente, para ser utilizados como aditivos antidesgaste y minimizadores de la fricción.

Por otra parte se evaluó la influencia de la concentración de las nanopartículas, en el comportamiento tribológico a cargas medias de las suspensiones, tomando en cuenta que se utilizaron dos tipos de concentraciones 0,5% y 2% en peso de nanopartículas.

Para garantizar la repetitividad de los resultados los ensayos han sido realizados justo después de haberse preparado la suspensión mecánicamente de tal manera de no que no exista una posible precipitación y/o aglomeración de las partículas. Para cada tipo de mezcla se realizaron dos réplicas.

El equipo utilizado en los ensayos de fricción y desgaste a cargas medias fue un tribómetro TE53SLIM con una configuración bloque-anillo, Fig. La velocidad de giro fue de 300 rpm, una carga de 165 N y una distancia total deslizada de 1442 m. Los anillos empleados tienen un diámetro externo de 60 mm, y valores medios de dureza de 280 HV500g y rugosidad superficial de $R_a = 0,27 \mu\text{m}$. Las dimensiones de los bloques eran de 12,7x12, 7x14 mm, con valores medios de dureza de 266 Hv500g y rugosidad superficial de $R_a = 0,35 \mu\text{m}$.

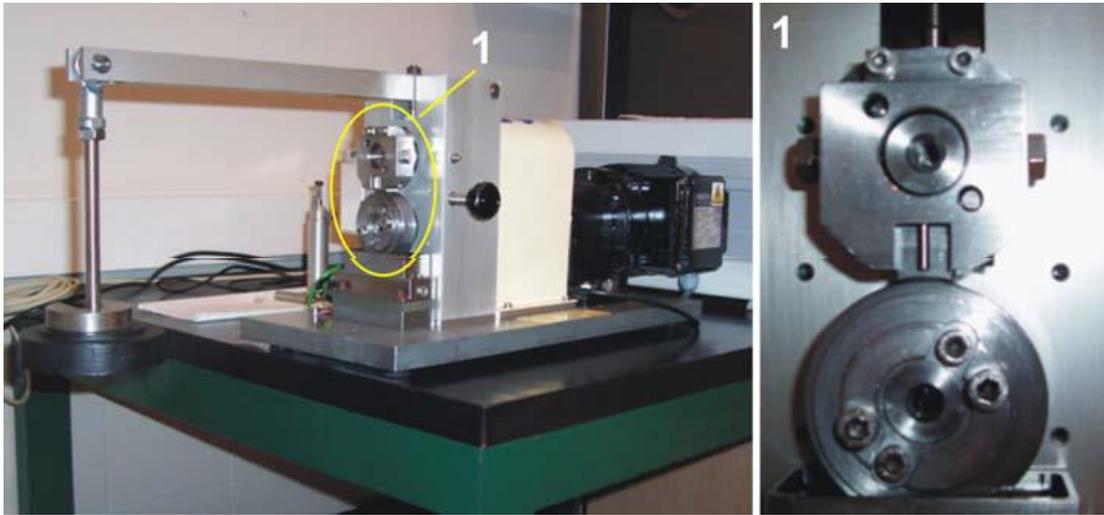


Figura 19. Tribómetro TE53SLIM.

El tribómetro, tal y como se muestra en la figura 19, consta de un eje que gira a velocidad controlada mediante un ordenador conectado a la máquina y con el software proporcionado por el fabricante. Este eje, es accionado mediante un motor eléctrico y a él se acopla de forma solidaria el anillo, el cual gira con el eje y es bañado por el lubricante estudiado que se encuentra en el cárter situado en la parte inferior.

En la parte superior y en contacto con el anillo, se introduce el bloque en el portaprobetas, y mediante un brazo al que se le acoplan pesos se puede variar la carga en el contacto.

El coeficiente de fricción fue medido de forma continua, mediante un transductor situado en el tribómetro y que envía señales al ordenador, las cuales son interpretadas por el software correspondiente proporcionado por el fabricante, lo que nos permite representar los resultados. Tras cada ensayo se limpia el cárter y resto de partes en contacto con las probetas con heptano.

3.3.2 Volumen de Desgaste

Para el cálculo del volumen desgastado las probetas fueron analizadas mediante el Microscopio Leica DCM 3D con un rango de aumento de 5, 10, 20, 50 y 100X confocal en el cual se obtuvo valores de volumen desgastado en el bloque e imágenes 3D de la superficie desgastada, de igual manera las muestras fueron limpiadas con heptano previo a el estudio. El microscopio Leica es un instrumento el cual realiza análisis a micro y nano estructuras mediante un procedimiento rápido y no invasivo.

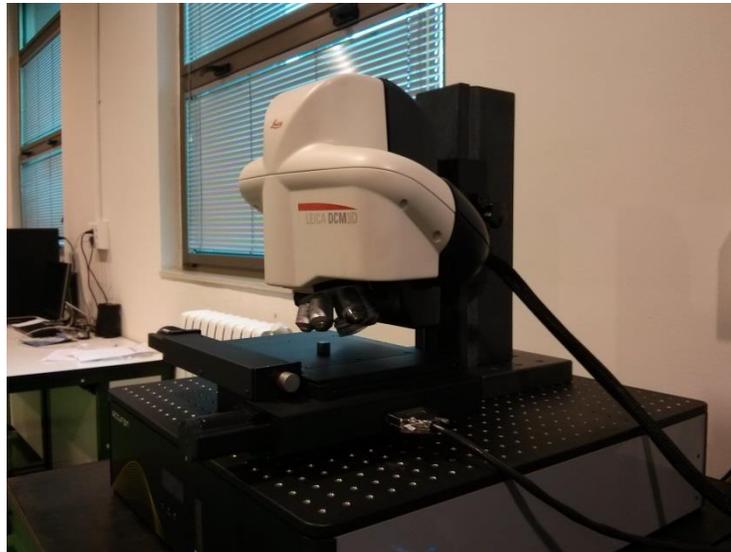


Figura 20. Microscopio confocal LEICA 3D

3.3.3 Microscopio

Para la observación y medición de las probetas se empleó un microscopio metalográfico de reflexión Nikon, con los siguientes aumentos: 50, 100, 200, 400 y 1000X. Se dispuso además de un microscopio estereoscópico o lupa Nikon, modelo SZT-2T, con un rango continuo de aumentos de 10 a 63X. Su utilidad reside en que dispone de mayor profundidad de campo que el microscopio metalográfico, para observar el estado superficial de las muestras sin ningún tipo de preparación previa. Fue utilizado para observar a

primera vista la huella desgastada. Además se contó con una cámara fotográfica para la obtención de fotografías, tanto en el microscopio como en la lupa, por medio de un software instalado en un ordenador.



Figura 21. Microscopio metalográfico

3.3.4 Microscopio SEM – EDS

Para obtener información sobre posible presencia de nanopartículas de ZrO_2 depositadas en la superficie desgastada se analizó la muestra en el Microscopio SEM – EDS



Figura 22. Microscopio electrónico de barrido

CAPITULO IV

PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación son presentados y discutidos los resultados obtenidos en la presente investigación, con la finalidad de alcanzar los objetivos propuestos. Este capítulo se divide en tres secciones, las cuales corresponden en primer lugar a la evaluación tribológica (coeficiente de fricción y volumen de desgaste) de los aceites utilizados (base y formulado) a diferentes viscosidades, sin agregar aditivos de nanopartículas. En segundo lugar la evaluación tribológica de los mismos aceites pero agregándoles diferentes concentraciones de nanopartículas de ZrO_2 (0,5 y 2%); finalmente los resultados obtenidos del análisis de la superficie de desgaste del bloque de acero (huellas de desgaste, concentración de nanopartículas depositadas en la superficie).

4.2 Ensayos tribológicos bloque-anillo de aceites bases y formulados con viscosidades ISO 32, 46 y 68

4.2.1 Coeficiente de fricción aceite base y aceite formulado (Telex)

Los resultados obtenidos del coeficiente de fricción entre los aceites bases y los aceites formulados (Telex) (Fig. 23 y Fig. 24), indican que el coeficiente de fricción del aceite base de viscosidad ISO 32 presenta un coeficiente de 0,1537; el cual es menor al correspondiente para el aceite formulado (Telex), determinado en 0,1649. Sin embargo para las viscosidades 46 y 68 se presenta un comportamiento distinto, en donde el coeficiente de fricción del aceite formulado está comprendido entre 0,1167 y 0,0938 y es menor al presentado por el aceite base el cual está entre 0,1361 – 0,1204.

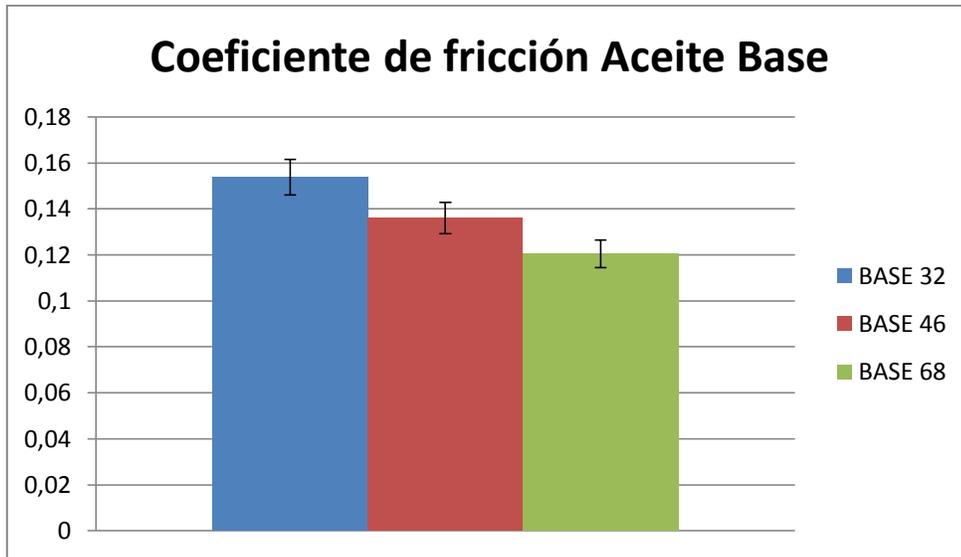


Figura 23. Coeficiente de fricción aceite base a distintas viscosidades

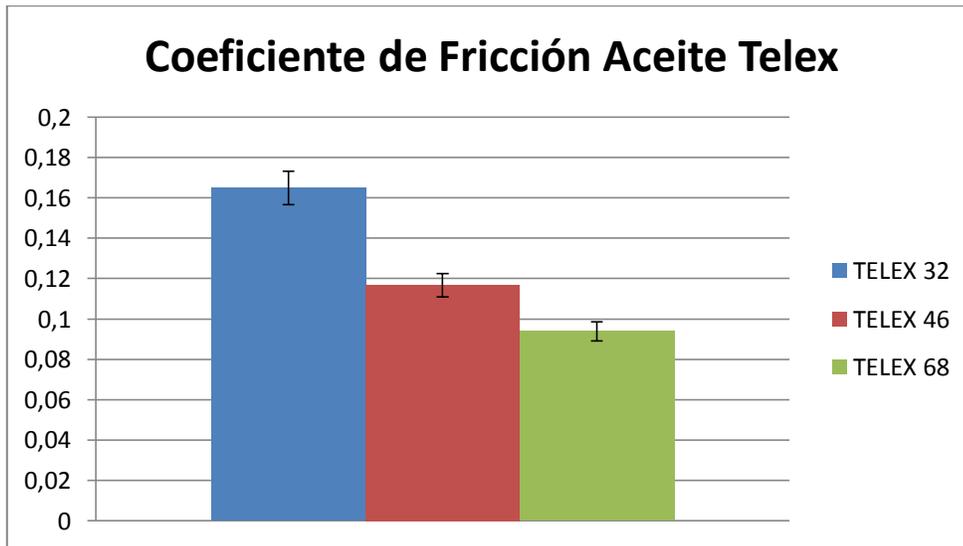


Figura 24. Coeficiente de fricción aceite telex a distintas viscosidades

Los resultados muestran para ambos ensayos, que la tendencia del coeficiente de fricción es a disminuir con el aumento de la viscosidad. Esto es interpretado debido a la incorporación de aditivos mejoradores del coeficiente de fricción, los cuales ayudan en la mejora de esta propiedad de los aceites (Cho 1997; Jackson 2003). La discrepancia con respecto a la viscosidad ISO 32 confirma que para una mejor comparación entre la efectividad de estos aceites se debe utilizar otro parámetro como el volumen de desgaste de la pieza.

4.2.2 Volumen de desgaste aceite base y formulado

En cuanto al volumen de desgaste en función de la viscosidad (Fig.25), los resultados obtenidos indican que, en el caso de los aceites base no hubo un cambio significativo del volumen desgastado entre la viscosidad ISO 32 y la ISO 46; los cuales tienen valores de $0,0461 \text{ mm}^3$ y $0,0472 \text{ mm}^3$ respectivamente, esto puede ser atribuido a que el espesor de película generado no fue suficiente para cambiar de régimen de lubricación dando como resultado un mismo volumen de desgaste, a diferencia del aceite base de viscosidad ISO 68 en el cual disminuye considerablemente el volumen de desgaste ($0,0136 \text{ mm}^3$). Por su parte en los aceites formulados al aumentar la viscosidad se encuentra una disminución del volumen de desgaste, presentando valores de $0,0301 \text{ mm}^3$, $0,0170 \text{ mm}^3$ y $0,0052 \text{ mm}^3$ para la viscosidad ISO 32, 46 y 68 respectivamente, puede decirse que debido a que estos aceites contienen aditivos de antifricción y antidesgaste es lógico esperar que favorezcan la disminución del volumen de desgaste (Fig. 26).

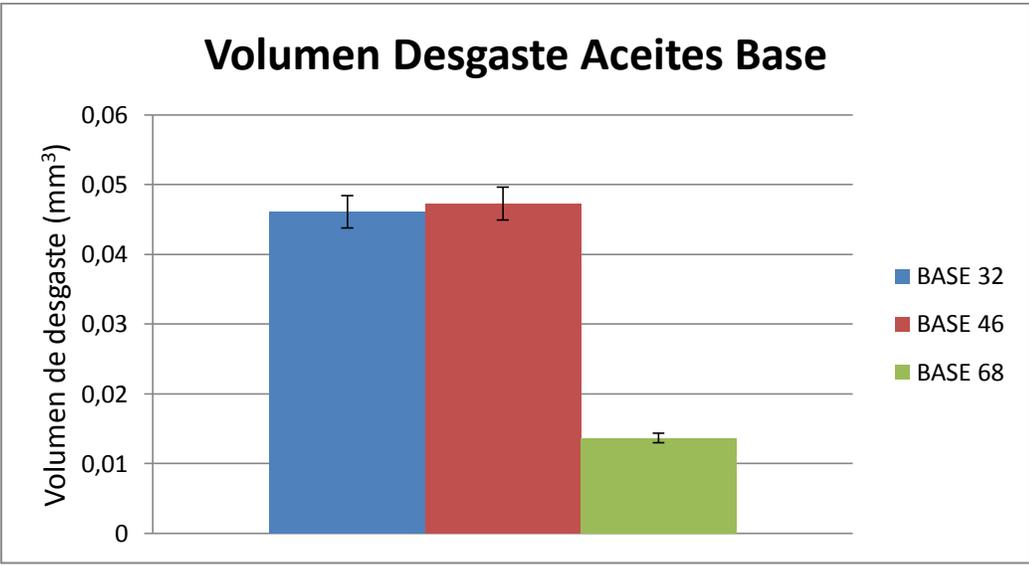


Figura 25. Volumen de desgaste aceite base a distintas viscosidades

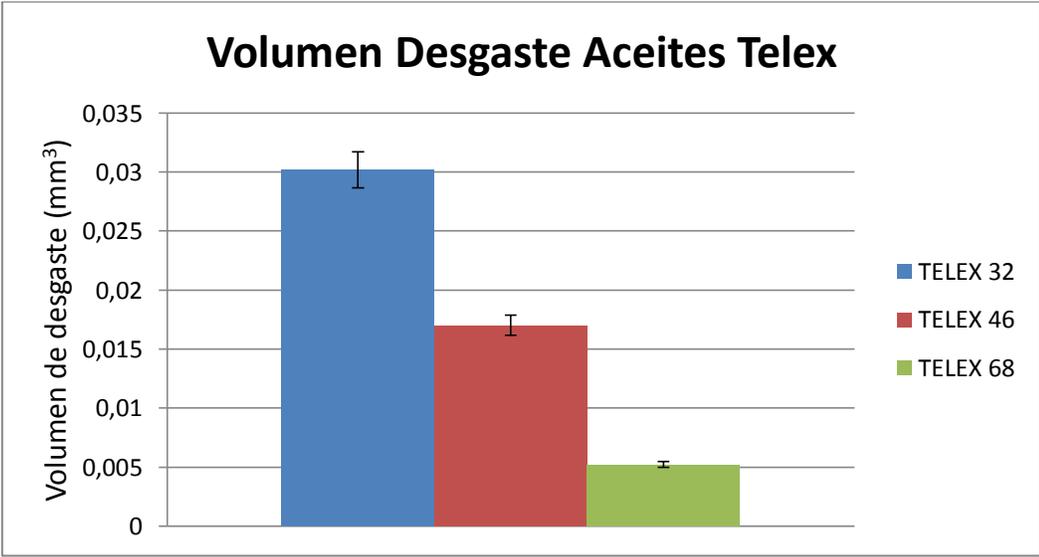


Figura 26. Volumen de desgaste aceite telex a distintas viscosidades

4.3 Ensayos tribológicos bloque-anillo de aceites base y formulados con nanopartículas de ZrO_2 a una viscosidad ISO 32

4.3.1 Coeficiente de fricción aceite base y formulado de viscosidad ISO 32

Los resultados obtenidos del coeficiente de fricción del aceite base y viscosidad ISO 32, al cual se le agregó diferentes concentraciones de nanopartículas de ZrO_2 , indican un valor de 0,1537 para el aceite base sin ZrO_2 y un valor de 0,1578 para el aceite base con 0,5 % de ZrO_2 como aditivo (Fig. 27 y 28). Este resultado es similar al obtenido en el ensayo de aceites puros sin aditivos discutido anteriormente (Fig. 23 y 24), y es atribuido a lo explicado en esa sección, debido a una dispersión del coeficiente de fricción en ensayos tribológicos. Sin embargo para el aceite base con 2% en peso de nanopartículas de ZrO_2 , se aprecia una reducción considerable del coeficiente de fricción (0,1056). Por otra parte en los aceites formulados con distintos porcentajes de nanopartículas (0,5 y 2%,) se observa una reducción de hasta el 18% del coeficiente de fricción en comparación al aceite formulado en estado puro (Fig. 29). Estos resultados indican que la adición de nanopartículas genera un comportamiento positivo para este tipo de aceite (Hernández 2008), alargando la vida útil de una pieza o un componente y obteniendo lubricantes limpios para el ambiente.

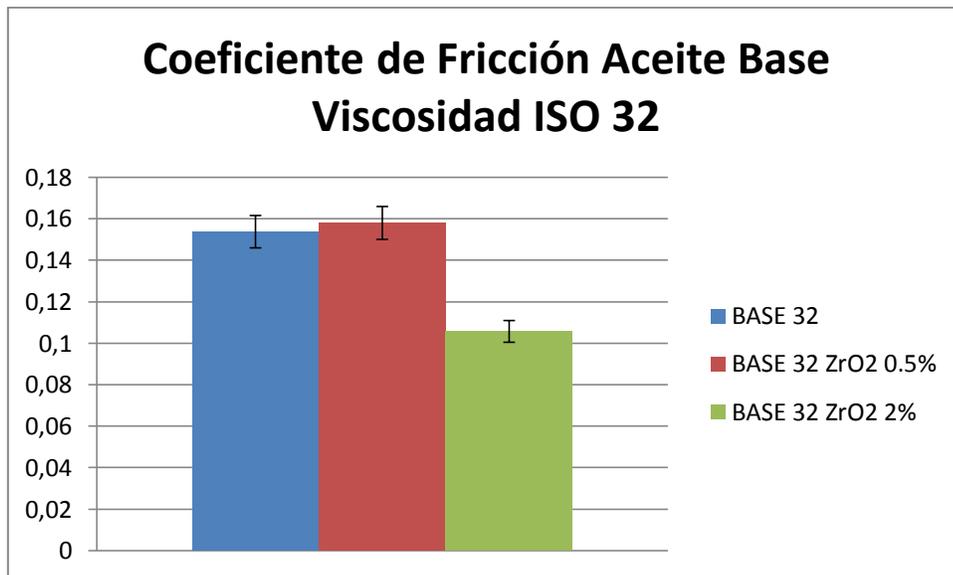


Figura 27. Coeficiente de fricción aceite base ISO 32 con nanopartículas de ZrO2 al 0,5% y al 2,0%

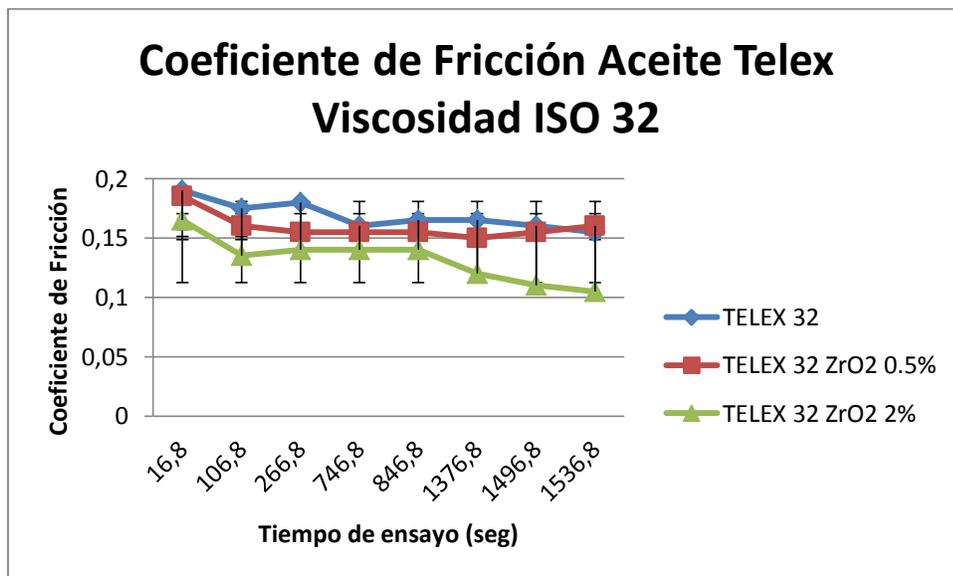


Figura 28. Coeficiente de fricción aceite telex ISO 32 con nanopartículas de ZrO2 al 0,5% y al 2,0%

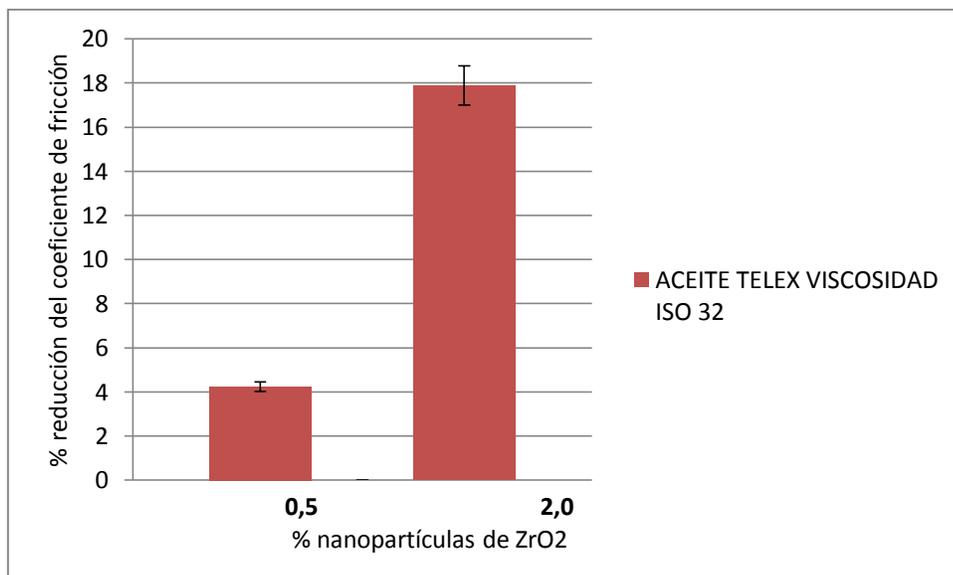


Figura 29. Reducción del coeficiente de fricción al aditar el aceite telex ISO 32 con nanopartículas de ZrO₂ al 0,5% y al 2,0%

4.3.2 Volumen de desgaste aceite base y formulado de viscosidad ISO 32

Los resultados obtenidos para el volumen de desgaste en función del porcentaje de nanopartículas como aditivo en el aceite base (Fig. 30 y 31), muestran una clara reducción del volumen desgastado de hasta un 50% para el caso del aceite con 0,5% de nanopartículas y de hasta el 80% de reducción del desgaste para el aceite base con 2% de nanopartículas, siendo esta última la que presentó el mejor comportamiento tribológico. En el caso del volumen de desgaste de los aceites formulados, a los cuales se le agregaron nanopartículas de ZrO₂, se encuentra una reducción del volumen desgastado, para ambas concentraciones 0,5 y 2%, sin embargo entre el aceite formulado con 0,5% de ZrO₂ (0,0220 mm³) y el aceite con 2% de aditivo (0,0216 mm³), se observa que no existe una reducción apreciable, debido a que al ser formulados tienen incluidos aditivos antifricción y antidesgaste, los cuales de por sí, ya contribuyen a obtener una reducción

del volumen desgaste (Fig. 32 y 33). Esto reafirma la importancia de este último parámetro a diferencia del coeficiente de fricción, en los ensayos tribológicos (Chou 2010).

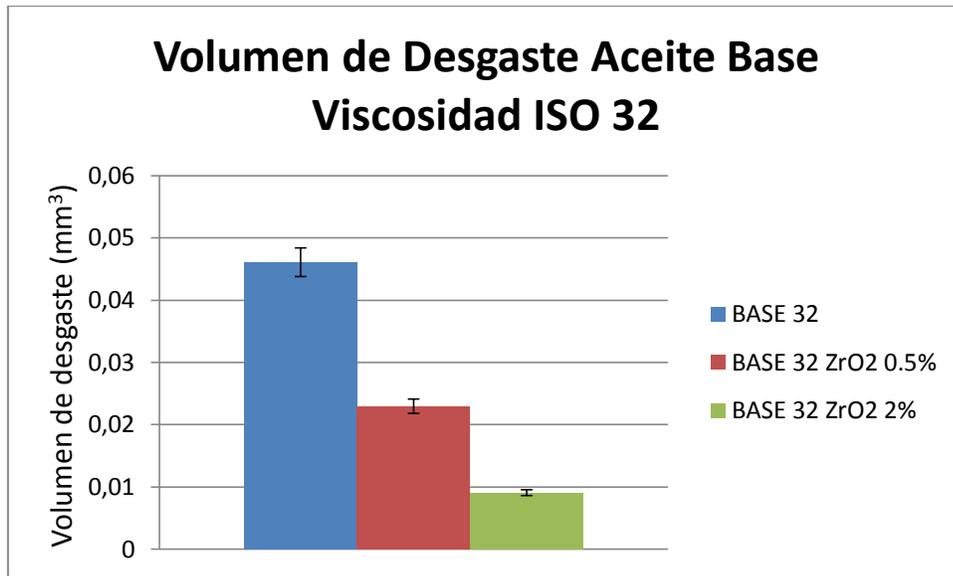


Figura 30. Volumen de desgaste aceite base ISO 32 con nanopartículas de ZrO₂ al 0,5% y al 2,0%

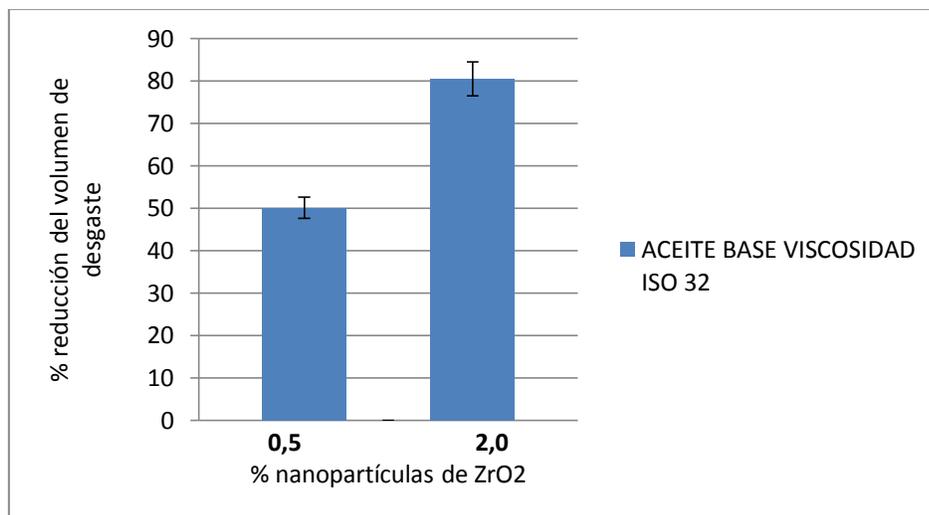


Figura 31. Reducción del volumen de desgaste al aditar el aceite base ISO 32 con nanopartículas de ZrO₂ al 0,5% y al 2,0%

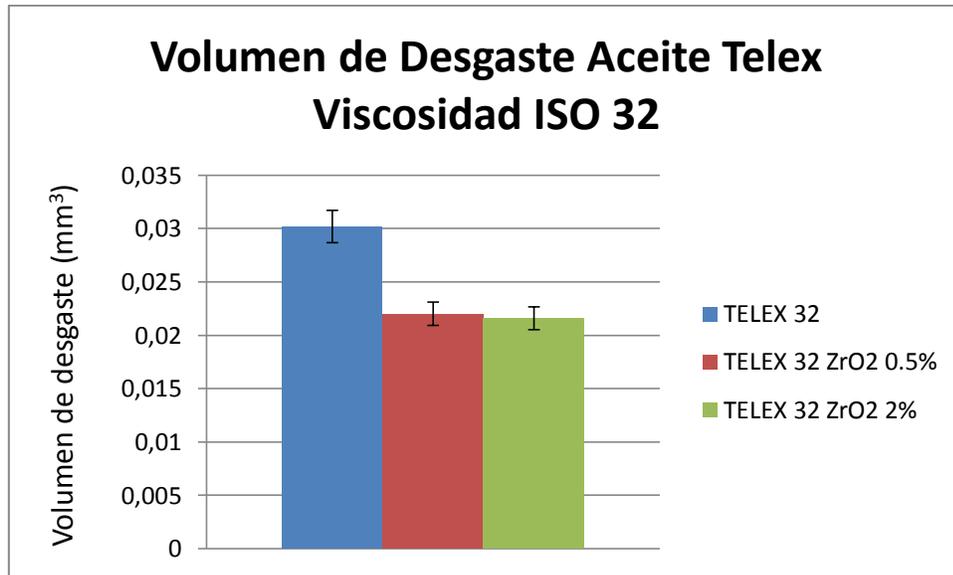


Figura 32. Volumen de desgaste aceite telex ISO 32 con nanopartículas de ZrO₂ al 0,5% y al 2,0%

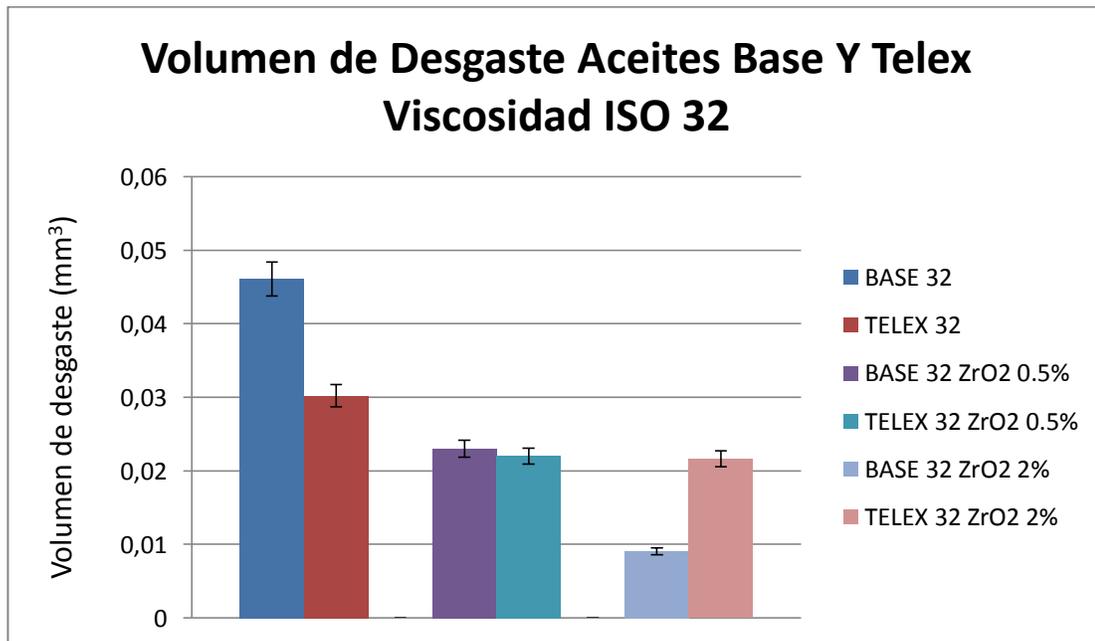


Figura 33. Comparación del volumen de desgaste aceite base ISO 32 y aceites telex ISO 32 con nanopartículas de ZrO₂ al 0,5% y al 2,0%

4.4 Ensayos tribológicos bloque-anillo de aceite base y formulados con nanopartículas de ZrO_2 a una viscosidad ISO 46

4.4.1 Coeficiente de fricción aceite base y formulado a ISO 46

Las figuras 34 y 35 representan el coeficiente de fricción para el aceite base de viscosidad ISO 46 con porcentajes de 0,5 y 2% de nanopartículas de ZrO_2 como aditivo, allí se observan valores de fricción de 0,1184 para 0,5% de ZrO_2 y 0,0798 para 2%, los cuales se encuentran por debajo de los resultados obtenidos con el aceite base puro (0,1361). Este comportamiento de las nanopartículas de ZrO_2 lo respalda la publicación de Viesca et al. (2011) en donde una de sus conclusiones más importantes destaca que, las nanopartículas trabajan como especie de nano-cojinetes lo cual no permite un desgaste considerable en la superficie de menor dureza.

En el caso de los aceites formulados con aditivos de 0,5 y 2% de nanopartículas de ZrO_2 se aprecia una reducción del 30% para la concentración del 2% de nanopartículas, este porcentaje está por encima del reportado por (Viesca 2011) el cual le da un porcentaje de reducción menor (10%) al aditivar el aceite con 2% de nanopartículas de ZrO_2 , siendo esta última nuevamente la que mejor comportamiento tribológico presentó, pudiendo decirse que 2% parece ser la concentración ideal de nanopartículas para este tipo de aceites (Fig. 36 y 37).

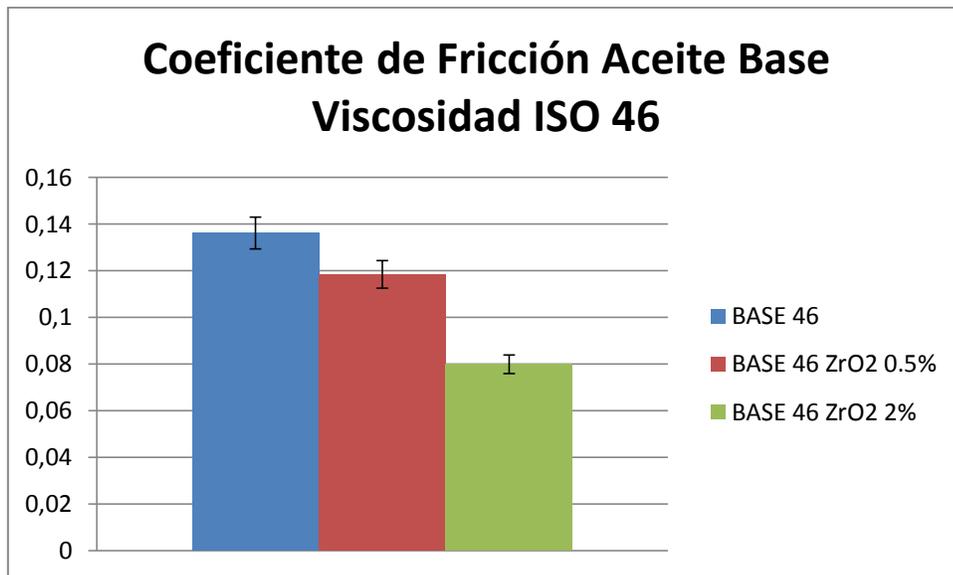


Figura 34. Coeficiente de fricción aceite base ISO 46 con nanopartículas de ZrO₂ al 0,5% y al 2,0%

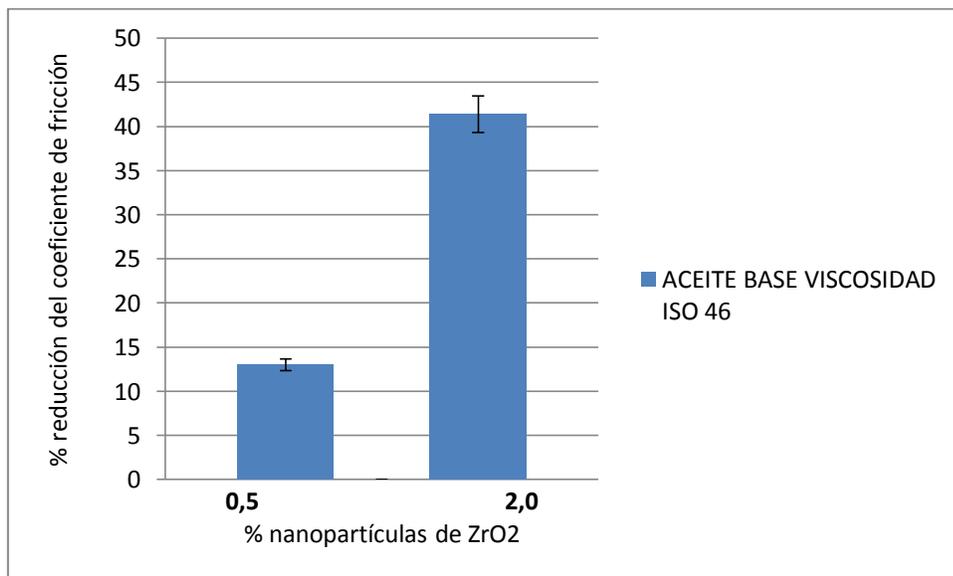


Figura 35. Reducción del coeficiente de fricción al aditar el aceite base ISO 46 con nanopartículas de ZrO₂ al 0,5% y al 2,0%

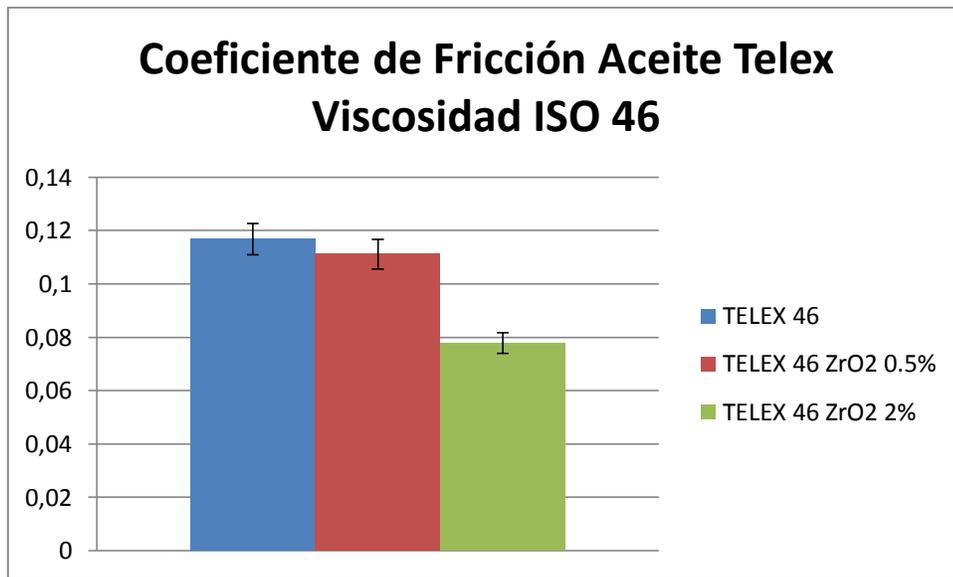


Figura 36. Coeficiente de fricción aceite telex ISO 46 con nanopartículas de ZrO₂ al 0,5% y al 2,0%

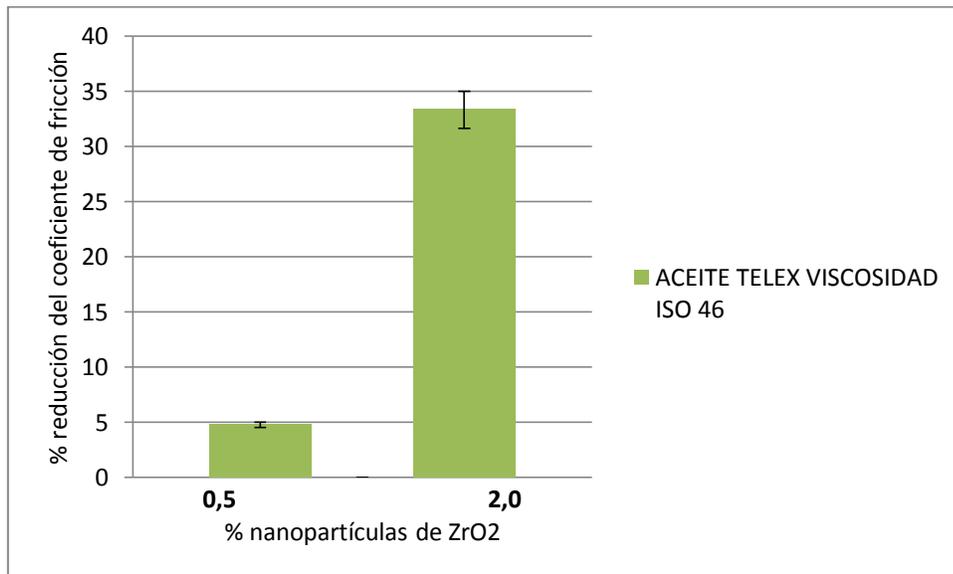


Figura 37. Reducción del coeficiente de fricción al aditar el aceite telex ISO 46 con nanopartículas de ZrO₂ al 0,5% y al 2,0%

4.4.2 Volumen de desgaste aceite base y formulado viscosidad ISO 46

Los datos obtenidos para este ensayo indican que, para los porcentajes de nanopartículas 0,5 y 2% de ZrO_2 existe una reducción del volumen de desgaste de manera apreciable, presentando valores de $0,0095 \text{ mm}^3$ y $0,0147 \text{ mm}^3$ para el caso de los aceites base (Fig. 38 y 39) y de $0,0064 \text{ mm}^3$ y $0,0071 \text{ mm}^3$ para el caso del aceite formulado (Fig. 40 y 41). Las pequeñas diferencias entre las dos concentraciones (0.5 y 2%) tanto en el aceite base como en el aceite formulado (Telex), pueden estar referidas a errores de la técnica de agitación, la cual de no ser suficiente, conlleva a una posible aglomeración de nanopartículas, ocasionando una suspensión poco estable y generando un mayor desgaste en la superficie. Sin embargo se obtiene una reducción del coeficiente de fricción y del volumen de desgaste con respecto a los aceites en su estado puro como se muestra en las figuras 38 y 40.

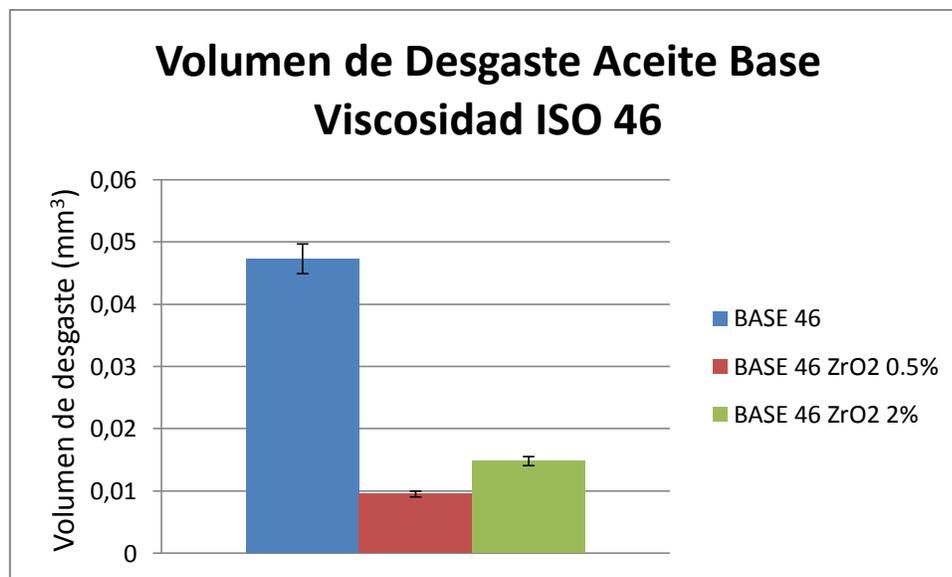


Figura 38. Volumen de desgaste aceite base ISO 46 con nanopartículas de ZrO_2 al 0,5% y al 2,0%

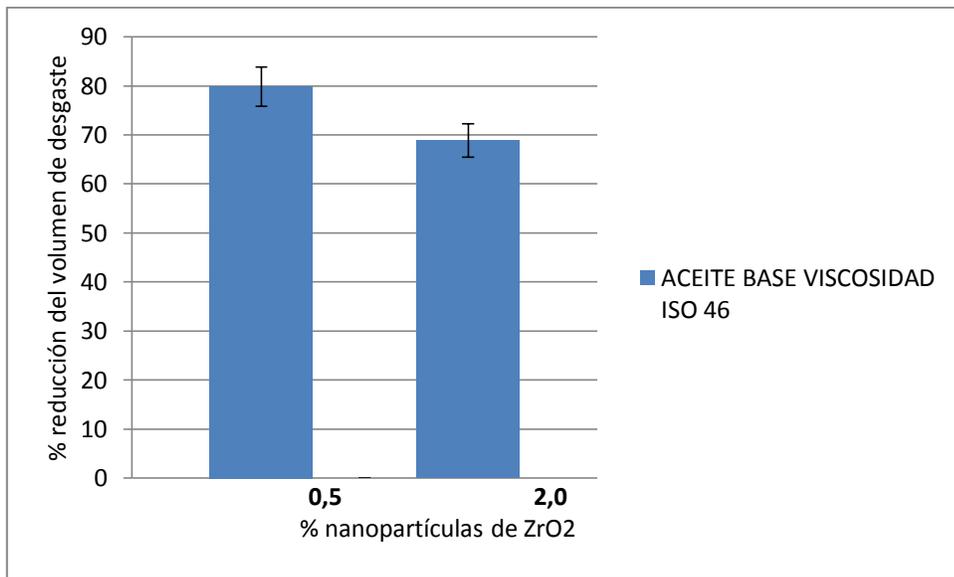


Figura 39. Reducción del volumen de desgaste al aditar el aceite base ISO 46 con nanopartículas de ZrO2 al 0,5% y al 2,0%

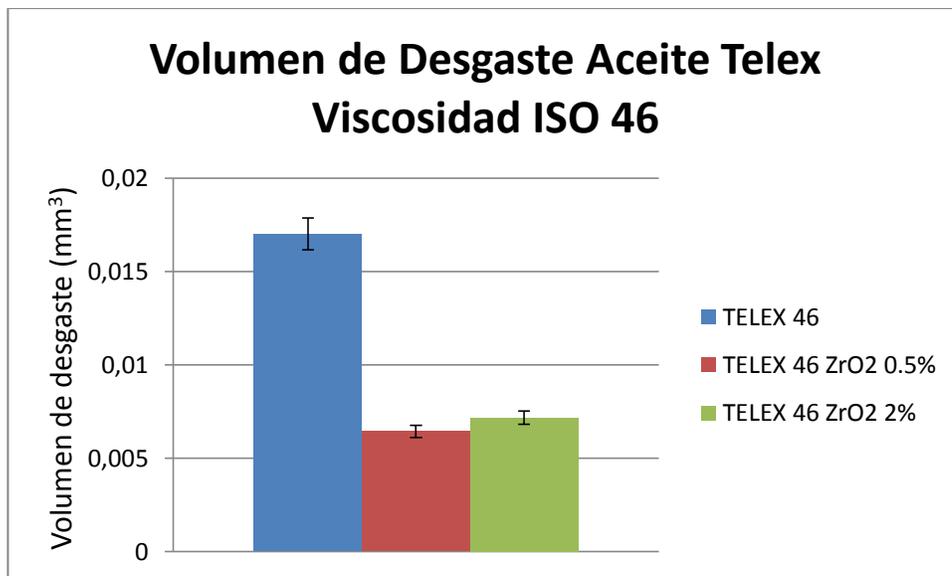


Figura 40. Volumen de desgaste aceite telex ISO 46 con nanopartículas de ZrO2 al 0,5% y al 2,0%

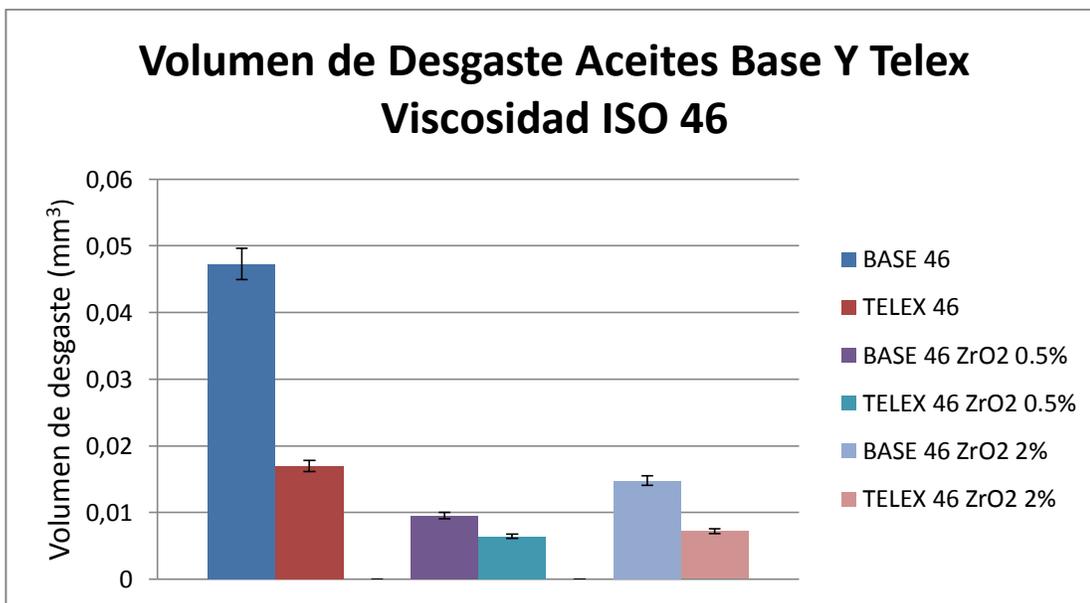


Figura 41. Comparación del volumen de desgaste aceite base ISO 46 y aceites telex ISO 46 con nanopartículas de ZrO₂ al 0,5% y al 2,0%

4.5 Ensayos tribológicos bloque-anillo de aceite base y formulados con nanopartículas de ZrO₂ a una viscosidad ISO 68

4.5.1 Coeficiente de fricción aceite base y formulado viscosidad ISO 68

En las figuras 42 y 43 se observa una tendencia similar a las referidas anteriormente, con una disminución del coeficiente de fricción al agregar nanopartículas de ZrO₂ al aceite base; de un 15% para el caso de 0,5% de nanopartículas y de un 45% de reducción en el caso del aceite base con 2% de nanopartículas como aditivo.

Por otro lado en el aceite formulado (Telex), se obtienen valores de 0,0938 para el aceite puro y 0,1078 con 0,5% de ZrO₂; en el cual se observa que no existe una disminución al ser aditivado el aceite, sin embargo para 2% de nanopartículas como aditivo se obtuvo un valor del coeficiente de fricción de 0,0594 lo que si representa una disminución apreciable (Fig. 44 y 45). De

acuerdo a estos resultados se confirma lo reportado por (Hernández 2008), demostrando la importancia del uso de las nanopartículas de ZrO_2 como aditivo, en la mejora del coeficiente de fricción de estos aceites.

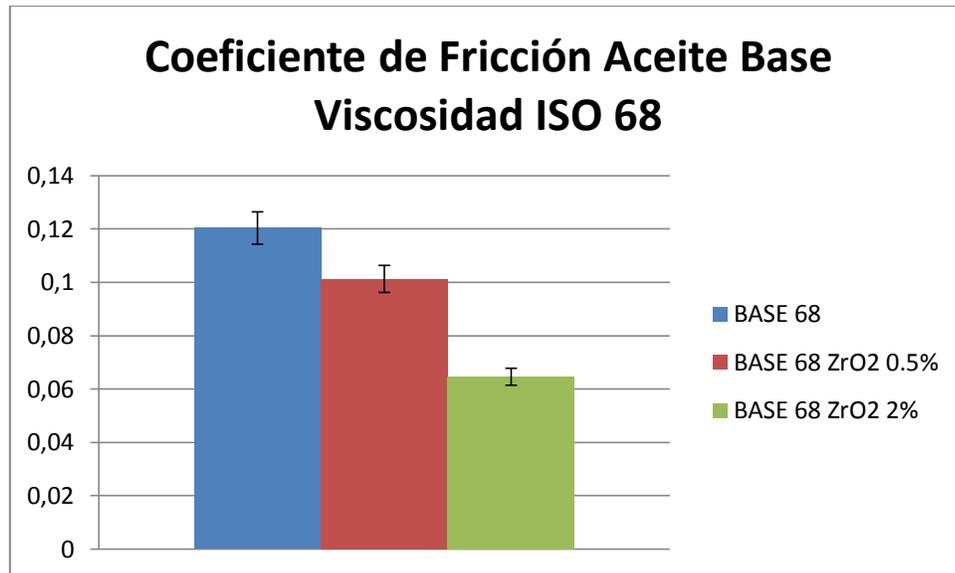


Figura 42. Coeficiente de fricción aceite base ISO 68 con nanopartículas de ZrO_2 al 0,5% y al 2,0%

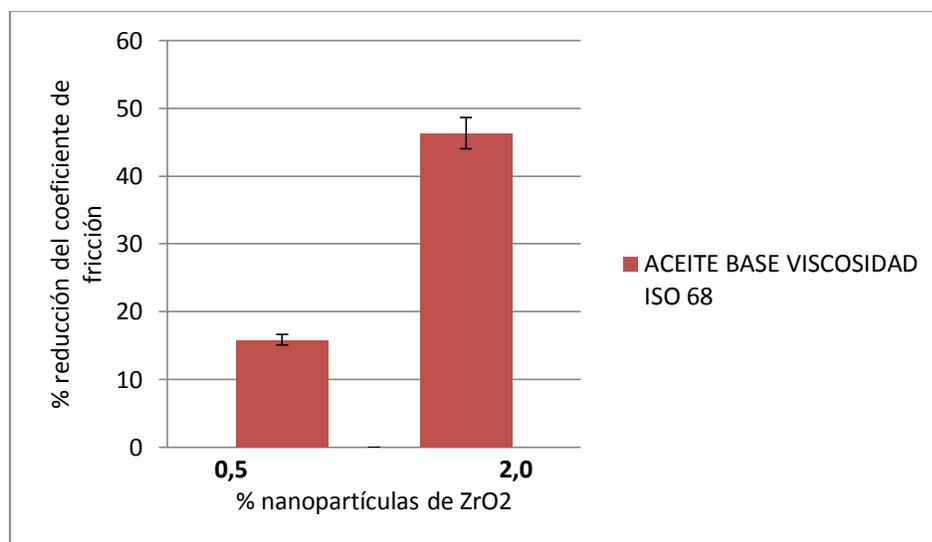


Figura 43. Reducción del coeficiente de fricción al aditar el aceite base ISO 68 con nanopartículas de ZrO_2 al 0,5% y al 2,0%

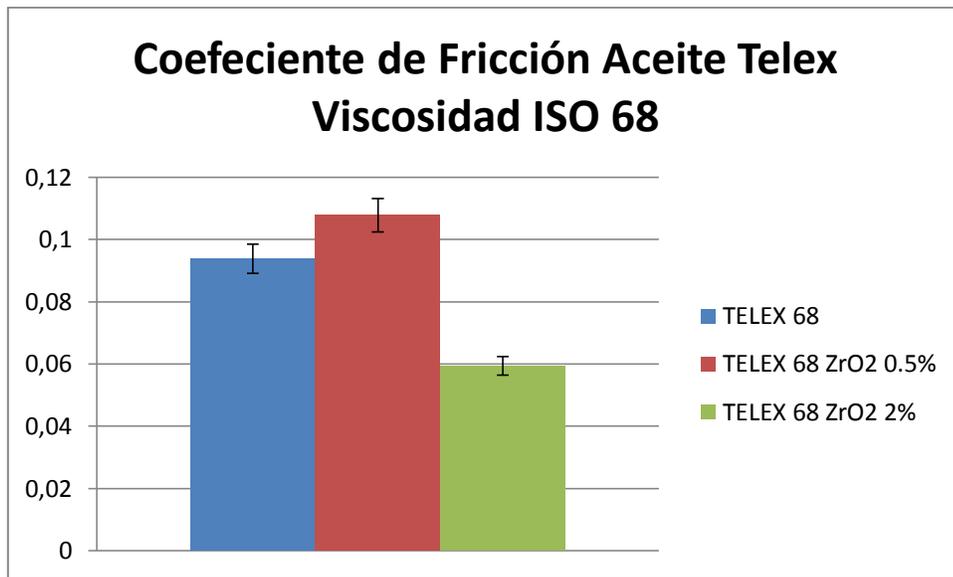


Figura 44. Coeficiente de fricción aceite telex ISO 68 con nanopartículas de ZrO₂ al 0,5% y al 2,0%

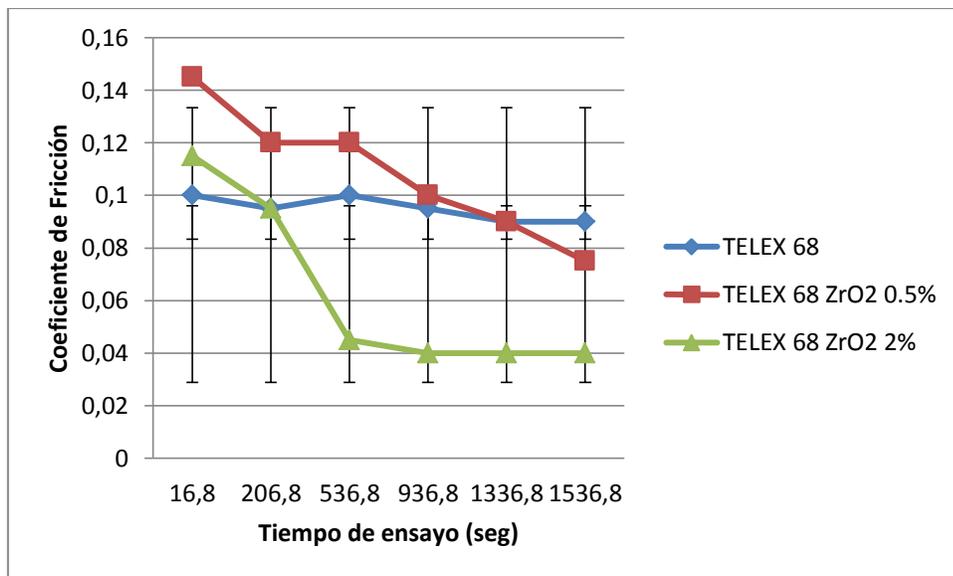


Figura 45. Coeficiente de fricción aceite telex ISO 68 con nanopartículas de ZrO₂ al 0,5% y al 2,0%

4.5.2 Volumen de desgaste aceite base y formulado viscosidad ISO 68

A continuación en la figura 46 puede observarse un comportamiento de mejora del volumen de desgaste en el aceite base, al aumentar los porcentajes de nanopartículas agregadas (0,5 y 2 %). Esto ratifica una vez más el excelente comportamiento de las nanopartículas como aditivos en aceites lubricantes. Lo anterior puede ser interpretado debido a que las nanopartículas se depositan en las huellas de desgastes, creando una especie de capa protectora para la superficie de menor dureza. (Hernández 2008).

Sin embargo en el caso de utilizar aceites formulados (Telex), de viscosidad ISO 68 (Fig. 47) se encontraron resultados totalmente diferentes a los reportados anteriormente, en donde se observa un aumento del volumen de desgaste al incorporar mayor concentración de nanopartículas al aceite. Este comportamiento adverso podría estar asociado a una posible aglomeración de nanopartículas, por efecto de una mezcla no homogénea al ser agregada una mayor concentración del aditivo (ZrO_2), o también debido a una agitación ultrasónica excesiva, lo cual pudiera generar cambios en las propiedades del lubricante por un aumento de la temperatura, en la cual el lubricante pierde fuerza de soporte de carga o pierde índice de viscosidad. Por lo cual, a partir de esta premisa se recomendaría ampliar las variables tanto de tiempo como de refrigeración de la mezcla; al momento de aplicar la técnica de agitación por ultrasonido.

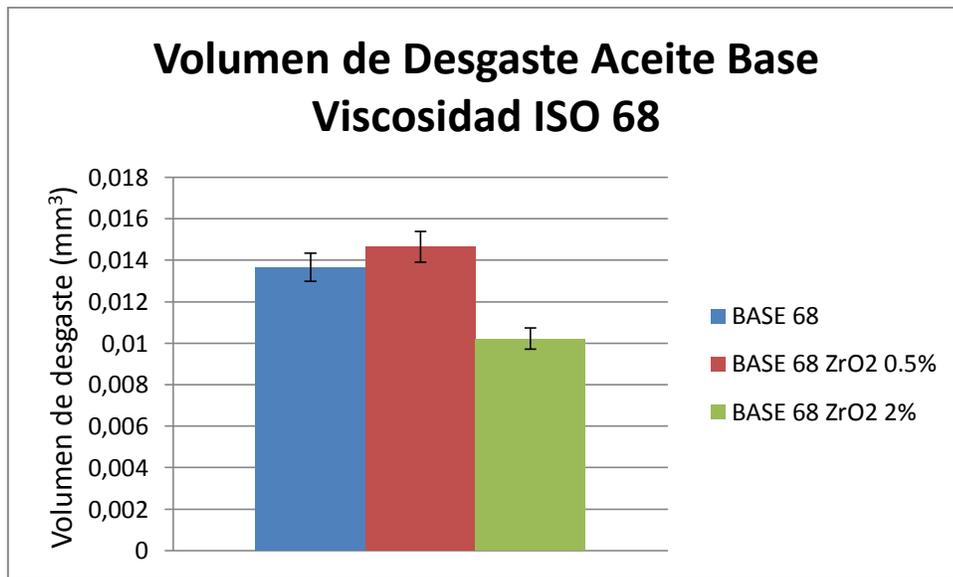


Figura 46. Volumen de desgaste aceite base ISO 68 con nanopartículas de ZrO₂ al 0,5% y al 2,0%

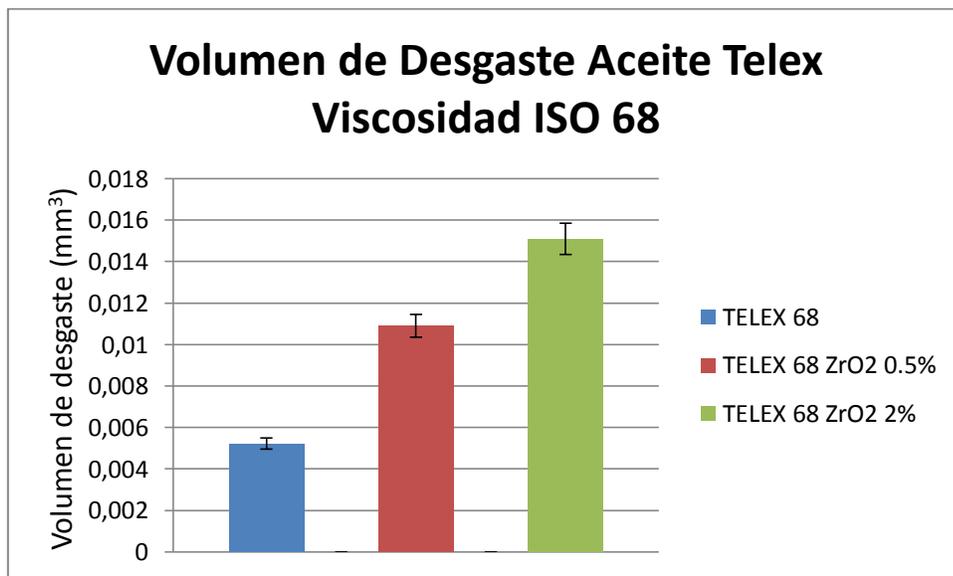


Figura 47. Volumen de desgaste aceite telex ISO 68 con nanopartículas de ZrO₂ al 0,5% y al 2,0%

4.6 Análisis superficial

A continuación se realizará un análisis detallado de las superficies desgastadas, con el fin de constatar la presencia, y la concentración de nanopartículas de ZrO_2 en el contacto lubricado. De esta forma pueden analizarse los distintos mecanismo de actuación como aditivos antidesgaste y reductores del coeficiente de fricción. La zona desgastada fue analizada mediante un microscopio electrónico de barrido y se realizaron microanálisis superficiales por espectrometría de energía dispersiva.

4.6.1 Huellas de desgaste para Aceite Base y Aceite Telex

En la figura 48 se observa las huellas de desgaste obtenidas sobre un bloque de acero, utilizando como lubricante un aceite base de viscosidad ISO 32 y un aceite formulado Telex de viscosidad ISO 32. Allí puede notarse que la superficie desgastada con el aceite Telex es de menor tamaño que la correspondiente al aceite base. Esto puede ser debido al trabajo realizado por los aditivos usados en la formulación, los cuales cumplen la función de mejorar la fricción durante el trabajo mecánico.

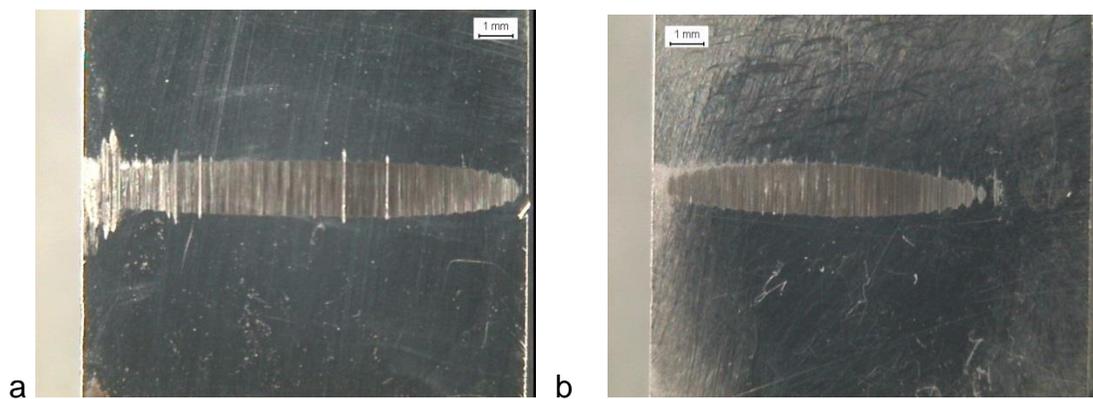


Figura 48. a) Huella de desgaste aceite base 32 b) Huella de desgaste aceite telex 32

En la figura 49 se muestra la diferencia entre la huella de desgaste de un aceite base de viscosidad ISO 46 y un aceite Telex de la misma viscosidad. Puede observarse una huella de mayor tamaño en el aceite base, lo cual se asocia a que los aditivos en el aceite cumplen su función de antidesgaste protegiendo a la superficie del bloque, el cual es el objeto de estudio de menor dureza.

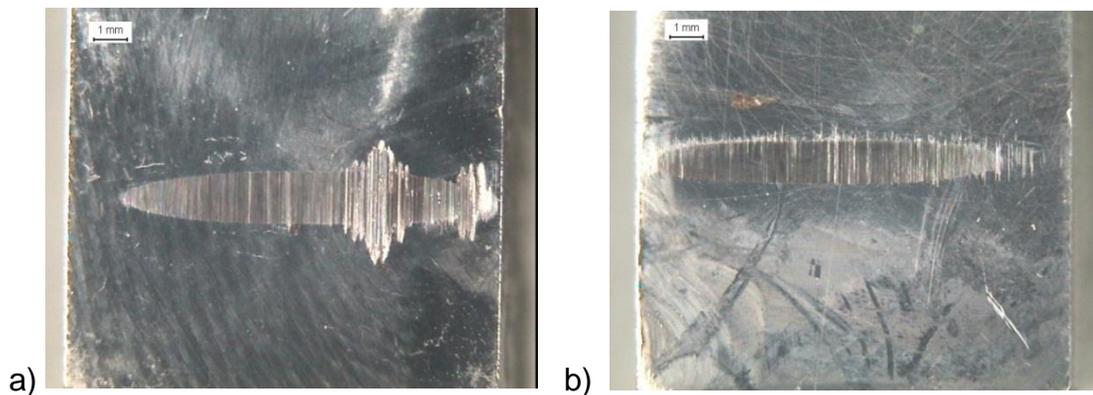


Figura 49. a) Huella de desgaste aceite base 46 b) Huella de desgaste aceite telex 46

Por último se obtuvo la huella de desgaste para los aceites base y formulado (Telex) con viscosidad ISO 68 (Fig. 50), en donde se observa que el tamaño de la huella de desgaste usando el aceite base es más marcada que al utilizar el aceite formulado. Esto puede ser debido al trabajo realizado por los aditivos, los cuales cumplen una función de mejora en la fricción durante el trabajo mecánico, tal como fue explicado anteriormente.

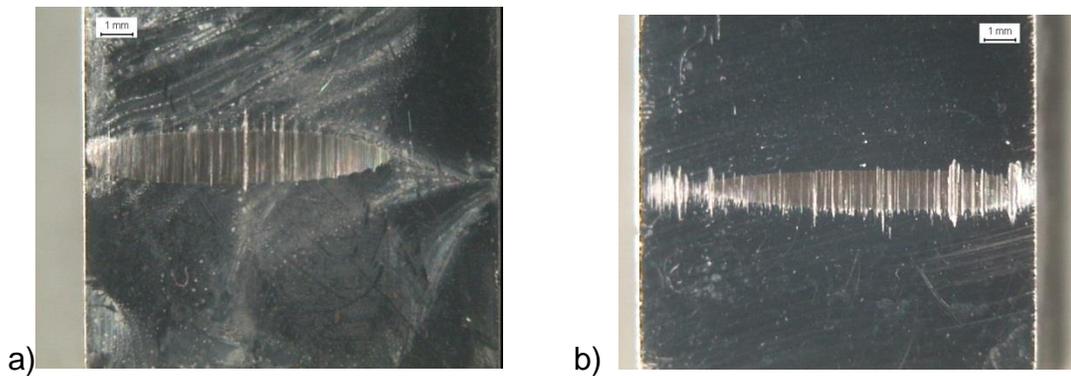


Figura 50. a) Huella de desgaste aceite base 68 b) Huella de desgaste aceite telex 68

4.6.2 Composición del Aceite Formulado utilizado en los ensayos.

Hasta ahora se establecido la importancia de los aditivos en los aceites formulados, y su comportamiento al ser mezclados con nanopartículas de óxidos metálicos (Viesca 2011). Sin embargo no se ha definido cuál es esta composición y su permanencia en la superficie de desgaste.

Con el fin de conocer los componentes del Aceite Formulado Telex, se procedió a realizar un estudio por la técnica de espectrometría de rayos X de energía dispersiva y microscopía electrónica de barrido (Fig. 51). Los resultados obtenidos indican que los elementos químicos fosforo y azufre (P y S), los cuales son de uso común en diversas formulaciones, aparecen sobre la superficie de desgaste, actuando de manera efectiva como mejoradores en la reducción del volumen de desgaste.

4.6.3 Superficies desgastadas usando aceite base y Telex de viscosidad ISO 32 con nanopartículas de ZrO_2

A continuación se comparan las superficies desgastadas en un ensayo tribológico con el aceite Telex viscosidad ISO 32 con 0,5% de nanopartículas de ZrO_2 con respecto al mismo aceite con 2% de nanopartículas como

aditivos (Fig.52 y 53). En éstas, se aprecia un gran número de nanopartículas depositadas en la superficie de desgaste. Esto confirma lo encontrado por Viesca, 2008, quien indica que estas nanopartículas se encuentran depositadas en los espacios generados por la superficie desgastada.

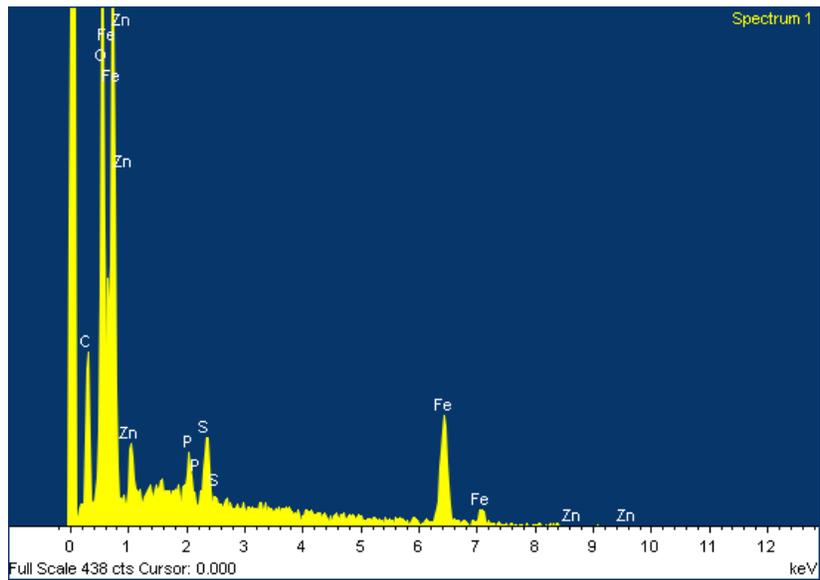
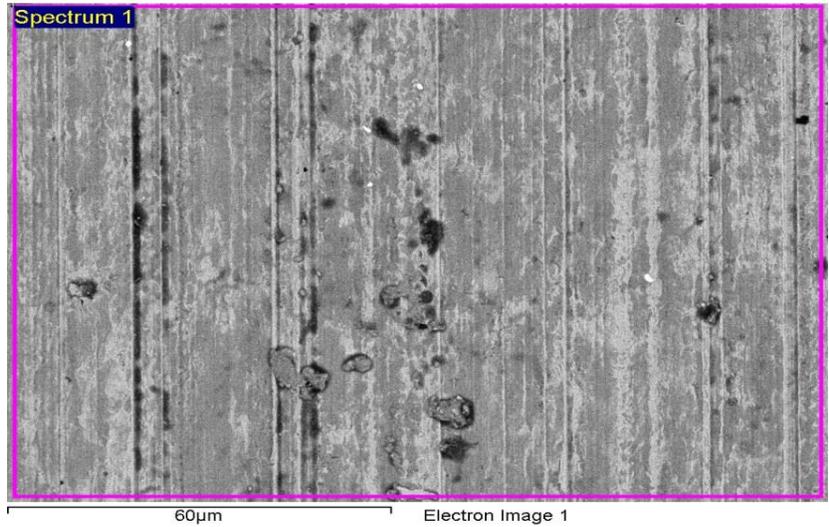


Figura 51. Micrografía y Microanálisis de la huella de desgaste utilizando como lubricante Telex 32

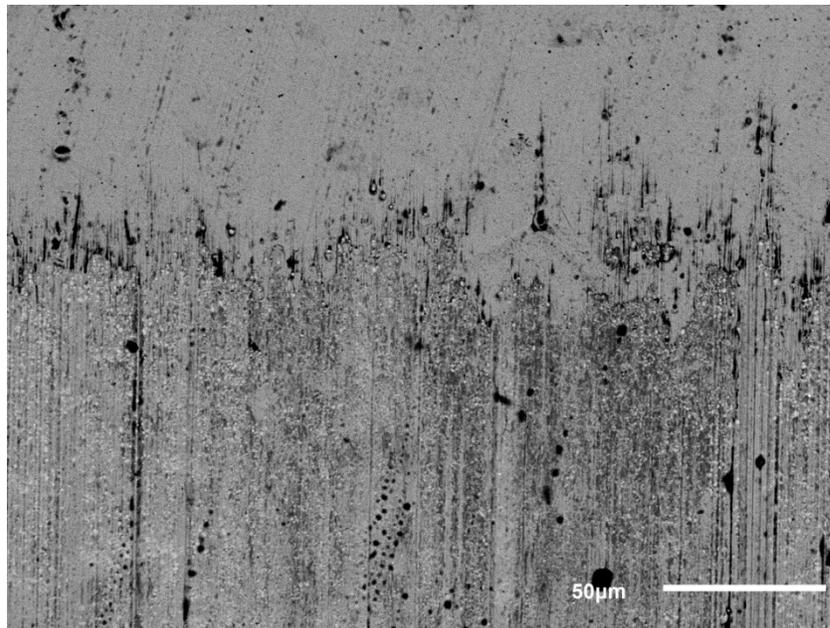


Figura 52. Huella de desgaste aceite telex 32 + 0,5% de ZrO₂

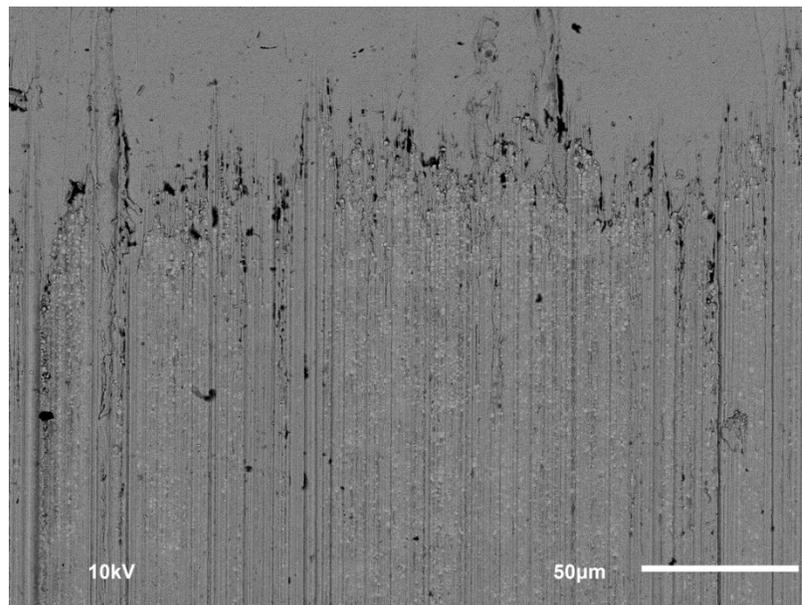


Figura 53. Huella de desgaste aceite telex 32 + 2% de ZrO₂

En la siguiente Figura 54 se muestra la diferencia entre dos zonas de la superficie del bloque de acero, con el objeto de verificar que las partículas circulares que se observan en la imagen son nanopartículas de ZrO₂ depositadas en la huella de desgaste, mostrándose en su contra parte una

zona la cual no posee nanopartículas. Con esto se confirma lo discutido anteriormente, en donde se afirma que las esferas señaladas en las Figuras 52 y 53 son efectivamente nanopartículas de ZrO_2 .

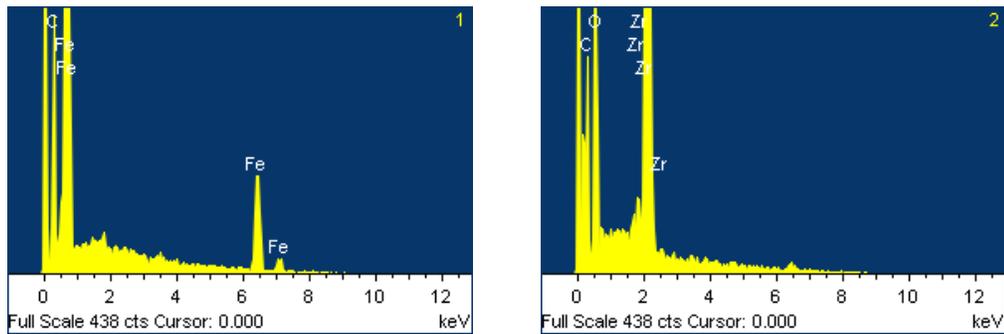
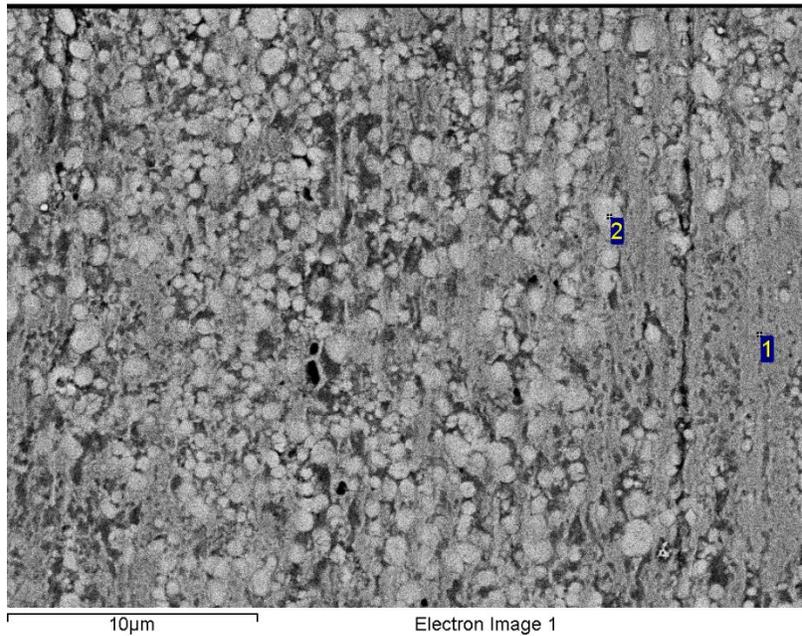


Figura 54. Micrografía y Microanálisis de la huella de desgaste utilizando como lubricante Telex 32 + 0,5% ZrO_2

4.6.4 Aglomeración de nanopartículas usando aceite base viscosidad ISO 32 con nanopartículas de ZrO_2

La figura 55 muestra detalladamente el efecto de aglomeración de nanopartículas en la entrada del contacto, reduciendo su eficiencia al momento de actuar como un factor antidesgaste. De igual forma se puede observar que la distribución de las nanopartículas se encuentra mayormente en la parte superior de la huella y disminuye su porcentaje de concentración en la parte inferior de la misma.

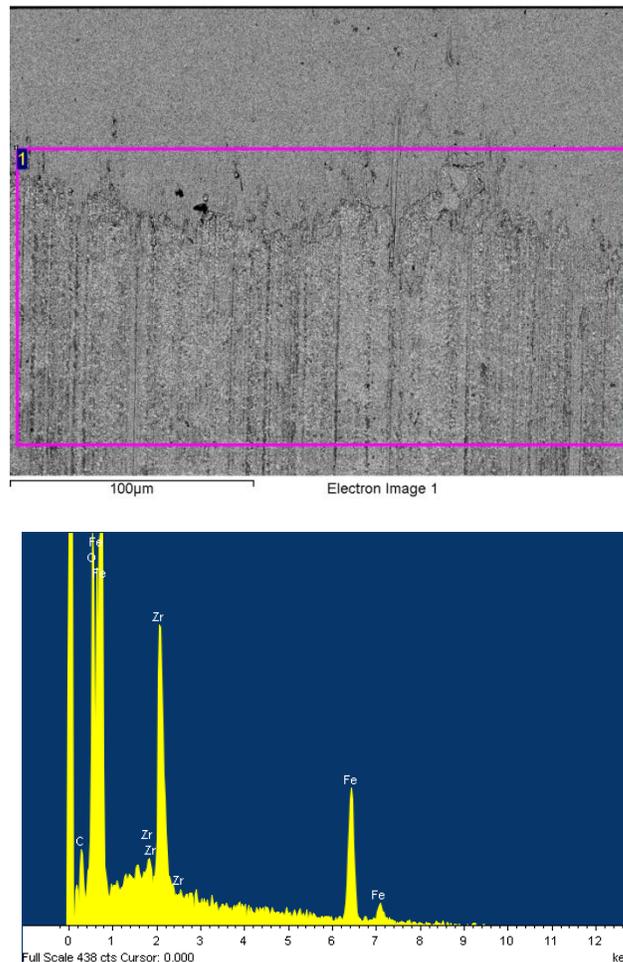


Figura 55. Microanálisis de la huella de desgaste utilizando como lubricante Telex 32 + 0,5% ZrO_2

4.6.5 Superficies desgastadas aceite base y Telex viscosidad ISO 46

En cuanto al comportamiento de reducción del volumen de desgaste cuando se formula el aceite de viscosidad ISO 46 con nanopartículas de ZrO_2 , el mismo muestra un aumento del volumen de desgaste al aumentar la concentración de nanopartículas de ZrO_2 (Figuras 56 y 57). Este comportamiento puede interpretarse debido a que en la muestra con 0,5% de nanopartículas, se encontró un mayor porcentaje de nanopartículas en la superficie desgastada lo que favorece la generación de una capa protectora en la huella de desgaste (Tabla 3); caso contrario sucede en la muestra con 2% de nanopartículas de ZrO_2 (Figuras 58 y 59). A pesar de esto no se pudo realizar el estudio del aceite formulado a la viscosidad ISO 46, por lo que se sugiere realizar este estudio en futuros trabajos.

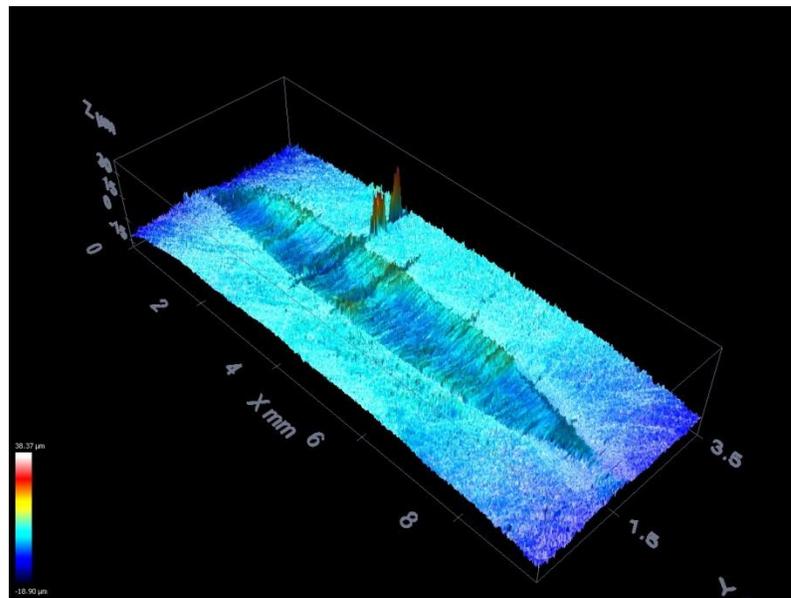


Figura 56. Huella de desgaste aceite base 46 + 0,5% ZrO_2

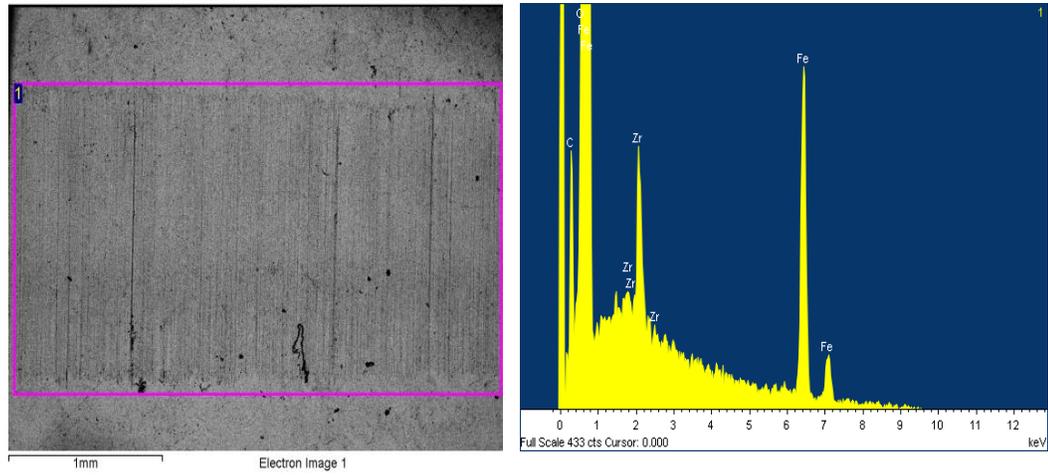


Figura 57. Micrografía y microanálisis de la huella de desgaste utilizando como lubricante Base 46 + 0,5% ZrO₂

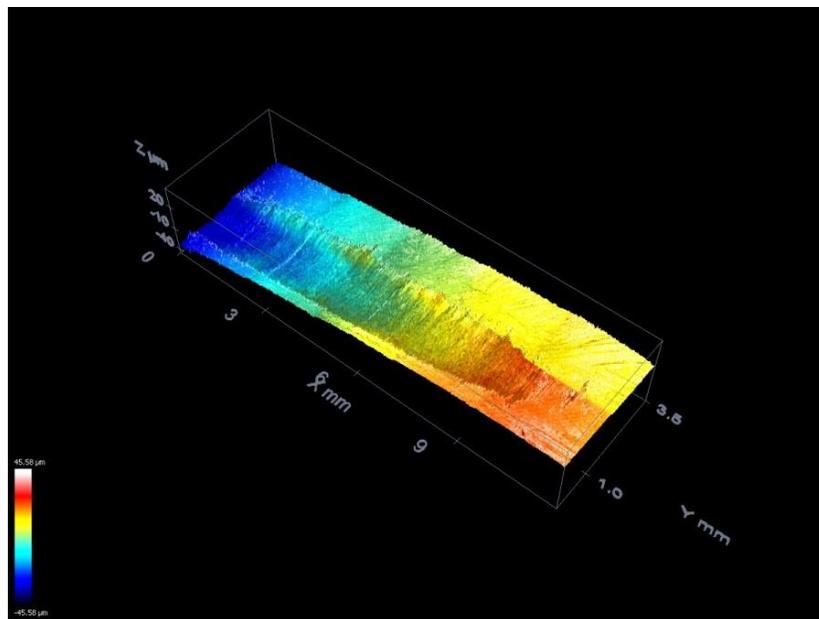


Figura 58. Huella de desgaste aceite base 46 + 2% ZrO₂

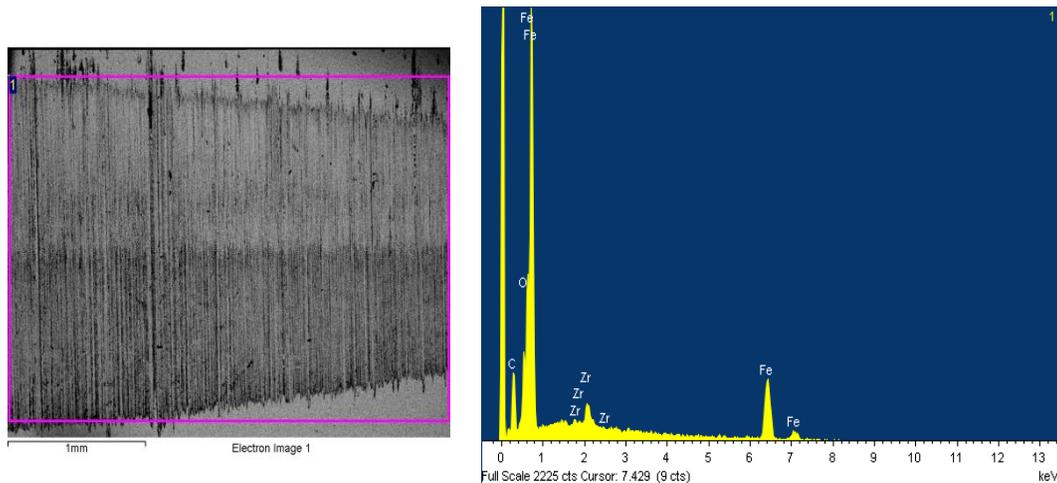


Figura 59. Micrografía y microanálisis de la huella de desgaste utilizando como lubricante Base 46 + 2% ZrO₂

Tabla 3. Concentración superficial de nanopartículas de ZrO₂

Suspensión	Elemento	Concentración superficial (%)
Aceite base 46 + 0,5% ZrO ₂	Circonio	4,41
Aceite base 46 + 2% ZrO ₂	Circonio	3,23

4.6.6 Superficies desgastadas con aceite base y telex viscosidad ISO 68

En esta sección se obtiene un resultado contrario a lo reportado anteriormente, donde se observa un aumento del volumen de desgaste tanto al aditivar el aceite de viscosidad ISO 68 con 0,5% como con 2% de nanopartículas de ZrO₂ (Fig. 60, Fig. 61 y 62). Uno de los principales problemas en estos ensayos, fue el encontrar un parámetro de agitación por ultrasonido óptimo, para realizar la mezcla, debido a que al incrementar el tiempo de sonicado el aceite pierde viscosidad, mientras que la disminución del tiempo, conduce a la formación de aglomerados.

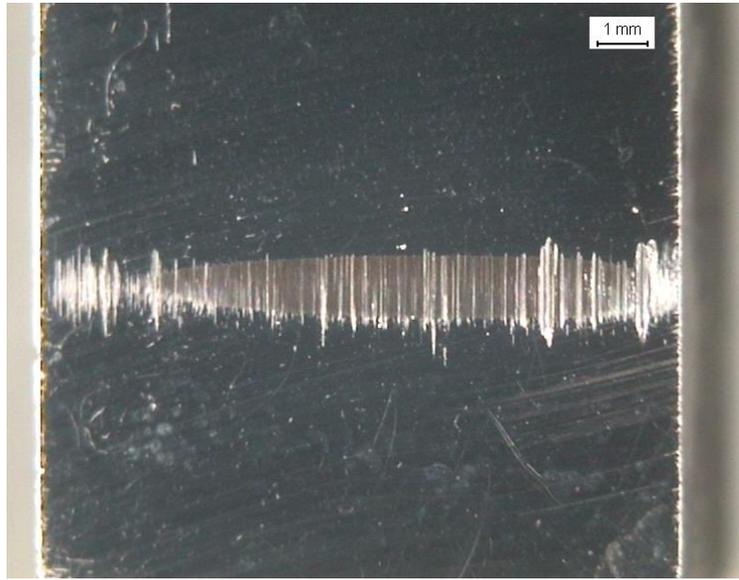


Figura 60. Huella de desgaste aceite telex 68



Figura 61. Huella de desgaste aceite telex 68 + 0,5% ZrO₂

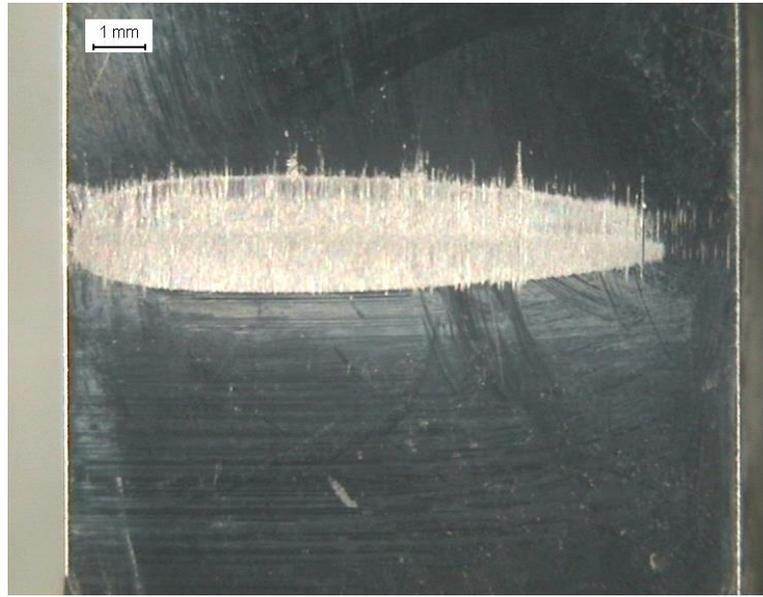


Figura 62. Huella de desgaste aceite telex 68 + 2% ZrO₂

Se confirma una vez más la aglomeración de nanopartículas en la entrada del contacto como podemos ver en la Figura 63; donde se observa que disminuye el porcentaje de las nanopartículas en la parte inferior de la superficie desgastada (Tabla 4).

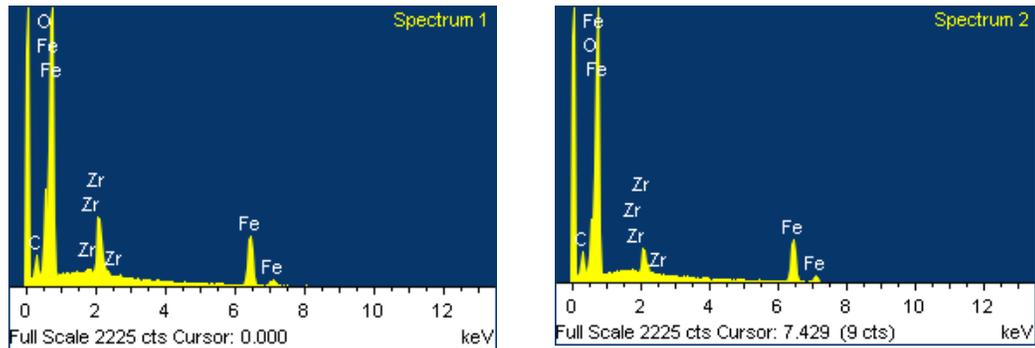
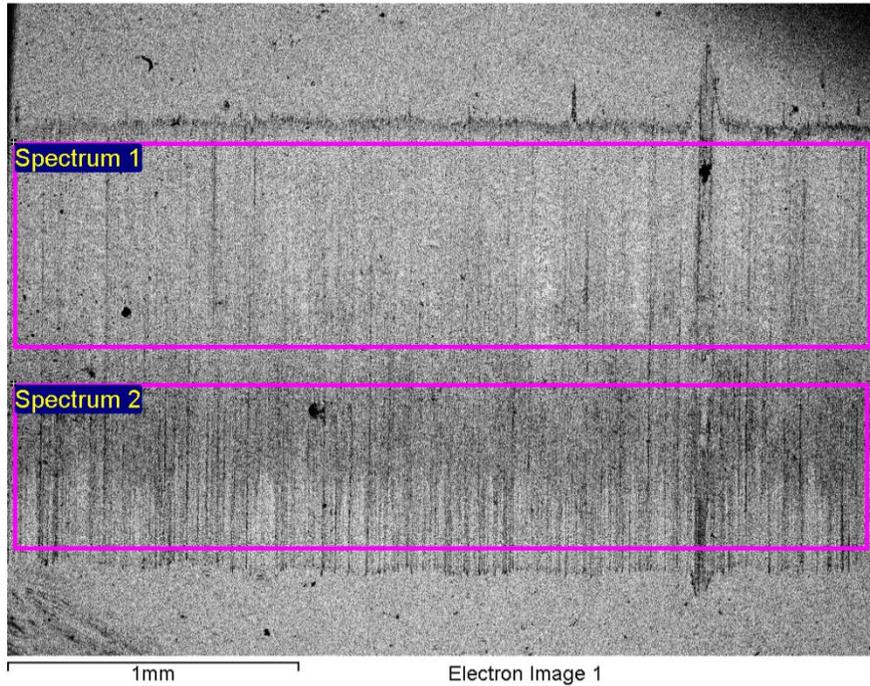


Figura 63. Micrografía y microanálisis de la huella de desgaste utilizando como lubricante Telex 68 + 0,5% ZrO₂

Tabla 4. Concentración superficial de ZrO₂

Espectro	Elemento	Concentración superficial (%)
Espectro 1	Circonio	10,16
Espectro 2	Circonio	5,24

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El coeficiente de fricción se reduce en promedio 35%, al agregar nanopartículas de óxido de circonio al 2% como aditivo sólido en el aceite base a tres diferentes viscosidades ISO 32, 46 y 68, respecto al aceite base sin aditivar.
- Al añadir nanopartículas de óxido de circonio como aditivo sólido al aceite formulado (Telex) a las tres viscosidades ISO, a una concentración de 2% en peso, se observó una mejora del 20% en el coeficiente de fricción, respecto al aceite base sin aditivar.
- Para los aceites base y formulados a viscosidades ISO 32 y 46, se encontró una reducción de hasta el 80% del volumen desgastado, con respecto a los aceites en su estado puro.
- En el aceite formulado (Telex) a la viscosidad ISO 68, se aprecia un aumento del 30% del volumen desgastado al incrementar la concentración de nanopartículas en el aceite.

Los estudios presentados en esta tesis dejan abiertas distintas líneas de investigación que pueden permitir caracterizar de forma más completa la actuación de las nanopartículas investigadas como aditivo, así como acercar los resultados aquí obtenidos a aplicaciones prácticas.

- Ampliar el intervalo de concentración de las nanopartículas en el aceite, tanto por debajo de 0,5% como por encima de 2% de nanopartículas de ZrO_2
- Realizar un estudio más amplio de los tiempos de agitación por ultrasonido de la mezcla, variando el rango entre 12 min y 32 min, dependiendo de la viscosidad del aceite.
- Tomar en cuenta otros factores tales como: refrigeración y modo de sonicación para la condición de agitación por ultrasonidos.
- Utilizar nanopartículas de otros compuestos metálicos para ser incorporados en los aceites empleados en este trabajo.

CAPITULO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D4172 medición en tiempo real de coeficiente de fricción en el tribómetro UMT-3 en configuración de 4 bolas.
- A. Hernández Battez, R. González, J.L. Viesca, J.E. Fernández, J.M. Díaz Fernández, A. Machado, R. Chou, J. Riba. ***CuO, ZrO₂ and ZnO nanoparticles as antiwear additive in oil lubricants.*** Wear 265 (2008) 422–428
- Da Jiao, Shaohua Zheng, Yingzi Wang, Ruifang Guan, Bingqiang Cao. ***The tribology properties of alumina/silice composite nanoparticles as lubricant additives.*** Applied Surface Science 257 (2011) 5720–5725
- GLAESER W. 1992, *Materials for Tribology.* Tribology Series 20. Elsevier.
- Guanghong Zhou, Yufu Zhu, Xiangming Wang, Mujian Xia, Yue Zhang, Hongyan. Sliding tribological properties of 0.45% carbon steel lubricated with Fe₃O₄ magnetic nano-particle additives in base oil. Wear 301(2013)753–757
- J.L. Viesca, A. Hernández Battez, R. González, R. Chou, J.J. Cabello. ***Antiwear properties of carbon-coated copper nanoparticles used as an Additive to a polyalphaolefin.*** Tribology International 44 (2011) 829–833

- LUDEMA, K.C., 1996, Friction, Wear, Lubrication. CRC Press.
- M. Kalin, J. Kogovsek, M. Remskar, Universidad de Ljubljana. Nanopartículas como un novedoso aditivo en lubricantes basado en tecnología verde de recubrimiento de tipo DLC. Wear 303 (2013) 480–485
- R. Chou, A. Hernández Battez, J.J. Cabello, J.L. Viesca, A. Osorio, A. Sagastum. ***Tribological behavior of polyalphaolefin with the addition of nickel nanoparticles.*** Tribology International 43(2010)2327–2332
- Stachowiak, G. Batchelor, A. Engineering Tribology Butterworth Heinemann Chapter 1.
- S.M. Alves, B.S. Barros, M.F. Trajano, K.S.B. Ribeiro, E. Moura. Comportamiento tribológico de lubricantes de base vegetal utilizando nanopartículas de óxidos en condiciones límites o extremas de lubricación. Tribology International 65 (2013) 28-36.
- Xiaoyun Song, Shaohua Zheng, Jun Zhang, Wei Li, Qiang Chen. Síntesis de nanopartículas monodispersadas de $ZnAl_2O_4$ y sus propiedades tribológicas como aditivo de aceites lubricantes. Materials Research Bulletin 47 (2012) 4305–4310
- YU He-long, XU Yi, XU Bin.shi. Propiedades Tribológicas y Mecanismos de Lubricación de las nanopartículas de cobre (Cu) en lubricantes. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 18 (2008) 636-641