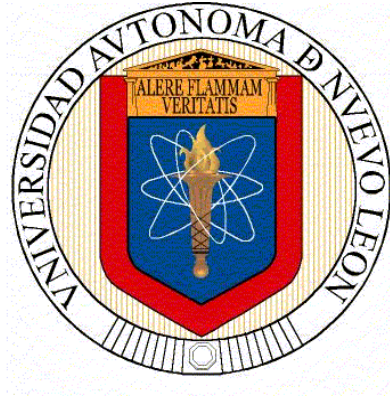


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS**



**TESIS**

**APLICACIÓN DE ESTRUCTURAS DE CARBONO EN LUBRICANTES  
PARA EL ANÁLISIS DE PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS**

**PRESENTADA POR  
ANGIE MINEY FIGUEROA TEJADA**

**PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA FÍSICA INDUSTRIAL**

**SEPTIEMBRE 2024**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS**



**TESIS**

**APLICACIÓN DE ESTRUCTURAS DE CARBONO EN  
LUBRICANTES PARA EL ANÁLISIS DE PROPIEDADES  
TRIBOLÓGICAS**

**POR**

**ANGIE MINEY FIGUEROA TEJADA**

**SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN,**

**SEPTIEMBRE 2024**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS**  
**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS**



**TESIS**

**APLICACIÓN DE ESTRUCTURAS DE CARBONO EN  
LUBRICANTES PARA EL ANÁLISIS DE  
PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS**

**POR**

**ANGIE MINEY FIGUEROA TEJADA**

**SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN,      SEPTIEMBRE 2024**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS**  
**CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS**

Los miembros del comité recomendamos que la tesis titulada “APLICACIÓN DE ESTRUCTURAS DE CARBONO EN LUBRICANTES PARA EL ANÁLISIS DE PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS” realizada por Angie Miney Figueroa Tejada, sea admitida para su defensa como opción para la obtención del grado de Maestro en Ingeniería Física Industrial.

El comité de tesis

---

**Asesor**  
**Dra. Oxana Vasilievna Kharissova**

---

**Co-asesor**  
**Dr. Demófilo Maldonado Cortés**

---

**Revisor**  
**Dr. Romeo Selvas Aguilar**

---

**Revisor**  
**Dr. Edgar Martínez Guerra**

---

**Subdirector de Estudios de Posgrado**  
**Vo. Bo. Dr. Álvaro Eduardo Cordero Franco**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi directora de tesis, la Dra. Oxana Vasilievna, por su guía y apoyo, al compartir sus conocimientos y herramientas para la realización de esta tesis.

Al Dr. Demófilo Maldonado, por su tiempo en capacitarme y permitirme el acceso a la máquina T02U para la caracterización tribológica.

A los miembros del comité de tesis Dr. Edgar Martínez, Dr. Romeo Selvas y Dr. Demófilo Maldonado por sus comentarios y sugerencias en la realización de esta tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, por la beca de financiamiento otorgada durante mis estudios de maestría.

A mi mamá Elsa, mi papá Raúl, a mi esposo Saúl y a mi madrina Ricarda por su apoyo moral y económico que permitieron que pudiera continuar mis estudios en México.

## DEDICATORIA

A mis padres, por su confianza y apoyo en mi decisión de viajar a México

A mi esposo por su incondicional apoyo intelectual y moral

A mi madrina Ricarda Gomez, por darme un hogar en México

A mis hermanos Ronnie, Liz y Edward por velar siempre por mí

# ÍNDICE

|   |      |
|---|------|
| AGRADECIMIENTOS.....                          | ii   |
| DEDICATORIA .....                             | iii  |
| LISTA DE TABLAS .....                         | vii  |
| LISTA DE FIGURAS .....                        | viii |
| LISTA DE ABREVIATURAS .....                   | x    |
| RESUMEN.....                                  | 1    |
| CAPITULO 1. FUNDAMENTOS DE INVESTIGACIÓN..... | 2    |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....           | 2    |
| 1.2 JUSTIFICACIÓN .....                       | 3    |
| 1.3 HIPÓTESIS .....                           | 5    |
| 1.4 OBJETIVOS .....                           | 5    |
| 1.4.1 General.....                            | 5    |
| 1.4.2 Específicos .....                       | 5    |
| CAPITULO 2. INTRODUCCIÓN .....                | 6    |
| 2.1 ANTECEDENTES.....                         | 7    |
| 2.2 TRIBOLOGÍA.....                           | 9    |
| 2.3 FRICCIÓN .....                            | 10   |
| 2.3.1 Fricción entre cuerpos .....            | 11   |
| 2.3.2 Leyes de fricción.....                  | 12   |
| 2.3.3 Fuerza de fricción estática.....        | 12   |
| 2.3.4 Fuerza de fricción cinética .....       | 13   |
| 2.3.5 Factores y efectos .....                | 14   |
| 2.4 DESGASTE .....                            | 15   |

|  |   |    |
|--|---|----|
| 2.4.1  | Mecanismos de desgaste .....                                    | 16 |
| 2.4.2  | Parámetros de desgaste .....                                    | 19 |
| 2.5  | LUBRICACIÓN .....   | 21 |
| 2.5.1  | Funciones de los lubricantes .....                              | 21 |
| 2.6  | Nanoestructuras .....   | 23 |
| 2.7  | Nanotubos de carbono multicapa (MWCNT) .....                    | 24 |
| 2.7.1  | Propiedades de los MWCNT .....                                  | 24 |
| 2.7.2  | MWCNT funcionalizados .....                                     | 25 |
| 2.8  | NANOADITIVOS EN LUBRICANTES.....                                | 27 |
| 2.9  | NANOLUBRICANTES .....   | 27 |
| 2.9.1  | Nanopartículas como aditivos .....                              | 29 |
| 2.9.2  | Parámetros de nanopartículas en rendimiento de lubricantes..... | 30 |
| CAPITULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....                             |   | 32 |
| 3.1  | MÉTODO .....  | 32 |
| 3.1.1  | Preparación de nanoestructuras.....                             | 33 |
| 3.1.2  | Preparación de nanolubricantes .....                            | 34 |
| 3.1.3  | Pruebas tribológicas .....                                      | 35 |
| CAPITULO 4. METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN<br>TRIBOLÓGICA |   | 36 |
| 4.1  | PRUEBA DE LAS 4 BOLAS .....                                     | 36 |
| 4.2  | PERFILOMETRÍA ÓPTICA .....                                      | 38 |
| 4.3  | ESPECTROSCOPIA INFRARROJA (IR).....                             | 40 |
| CAPITULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....                                |   | 43 |
| 5.1  | Comparación del lubricante a lo largo del Tiempo.....           | 43 |
| 5.2  | Capacidad de carga en muestras sin dilución .....               | 45 |



|                               |  |    |
|-------------------------------|--|----|
| 5.3                           | Capacidad de carga en muestras con dilución 1:5 .....  | 47 |
| 5.4                           | Capacidad de carga en muestras con dilución 1:10 .....   | 49 |
| 5.5                           | Impacto general en la capacidad de carga según la nanoestructura, concentración y dilución ..... | 52 |
| 5.6                           | DISCUSIÓN.....   | 64 |
| CAPITULO 6. CONCLUSIONES..... |  | 66 |
| REFERENCIAS .....             |  | 68 |

## LISTA DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 2.1 Lista de nanoestructuras utilizadas como aditivos en lubricantes y su efecto en la mejora de capacidad de carga y cicatriz de desgaste .....   | 30 |
| Tabla 3.1 Resumen de los componentes del proyecto .....  | 35 |
| Tabla 5.1 Capacidad de carga de las muestras bases 2022 y 2023 con distinta dilución, y porcentaje de comparación entre ellas .....  | 43 |
| Tabla 5.2 Capacidad de carga máxima en las muestras que utilizan la base 2023 con distintas nanoestructuras y diluciones.....  | 45 |
| Tabla 5.3 Muestras sin dilución: Capacidades de carga y comparación en porcentaje con las bases sin dilución de 2022 y 2023 .....  | 46 |
| Tabla 5.4 Muestras con dilución 1:5: Capacidades de carga y comparación en porcentaje con las bases con dilución 1:5 de 2022 y 2023.....   | 48 |
| Tabla 5.5 Muestras con dilución 1:10: Capacidades de carga y comparación en porcentaje con las bases con dilución 1:10 de 2022 y 2023.....   | 50 |
| Tabla 5.6 Lista de las 10 primeras muestras lubricantes con los mejores valores de capacidad de carga y su porcentaje de comparación respecto a los lubricantes base sin dilución 2022 y 2023..... | 55 |
| Tabla 5.7 Datos de rugosidad e imágenes por perfilómetro de las cicatrices de desgaste formadas en balines de acero después de la prueba de 4 bolas .....  | 56 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1 Descripción general de un tribosistema .....   | 9  |
| Figura 2.2 Esquema de fuerzas entre dos superficies con vistas a escala macro y microscópica .....  | 11 |
| Figura 2.3 Gráfica de regiones de fricción estática y cinética .....  | 13 |
| Figura 2.4 Coeficiente de fricción cinético en un sistema de deslizamiento .....  | 14 |
| Figura 2.5 Mecanismos en la transformación de energía por fricción.....   | 15 |
| Figura 2.6 Desgaste por mecanismo adhesivo .....  | 16 |
| Figura 2.7 Tipos de desgaste abrasivo .....   | 17 |
| Figura 2.8 Diferentes formas de ataque por corrosión.....   | 18 |
| Figura 2.9 Mecanismos de desgaste. ....   | 19 |
| Figura 2.10 Obtención de nanolubricantes. ....  | 28 |
| Figura 2.11 Efectos de mejora de NPs. ....  | 29 |
| Figura 3.1 Representación de nanoestructuras de carbono utilizadas: a) Nanotubo de carbono multicapa. b) Nanotubo de carbono con grupos COOH. c) Nanotubo de carbono con grupo OH. d) Nanotoroide de carbono..... | 32 |
| Figura 3.2 Esquema del proceso de experimentación .....   | 32 |
| Figura 3.3 Muestras de lubricante Sigralub adicionado con nanoestructuras ...   | 33 |
| Figura 3.4 Preparación de nanotoroides de carbono .....   | 34 |
| Figura 3.5 Máquina de Prueba 4 bolas T-02 UVM.....  | 36 |
| Figura 4.1 Diagrama esquemático del tribómetro de 4 bolas.....  | 38 |
| Figura 4.2 Perfilómetro Alicona.....  | 39 |
| Figura 4.3 Región del infrarrojo.....   | 40 |
| Figura 4.4 Vibraciones moleculares.....   | 41 |
| Figura 4.5 Funcionamiento de una maquina IFTR.....  | 42 |
| Figura 5.1 Lubricante base en 2022 y 2023. Comparación de la capacidad de carga BASE 2022 y BASE 2023 según la dilución en agua.....  | 44 |
| Figura 5.2 Capacidad de carga por muestra sin dilución .....  | 46 |
| Figura 5.3 Capacidad de carga por muestra con dilución 1:5 .....  | 48 |
| Figura 5.4 Capacidad de carga por muestra con dilución 1:10 .....   | 49 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 5.5 Capacidad de carga en todas las muestras .....                                     | 51 |
| Figura 5.6 Capacidad de carga promedio por muestra lubricante .....                           | 53 |
| Figura 5.7 Capacidad de carga promedio por concentración. ....                                | 54 |
| Figura 5.8 Capacidad de carga promedio por dilución.....                                      | 55 |
| Figura 5.9 Espectro IR del nanolubricante con 0.1 wt% MWCNT-OH en diluciones de agua.....     | 62 |
| Figura 5.10 Espectro IR del nanolubricante con 0.1 wt% NANOTORI en diluciones de agua .....   | 62 |
| Figura 5.11 Espectro IR del nanolubricante con 0.1 wt% MWCNT-COOH en diluciones de agua ..... | 62 |
| Figura 5.12 Espectro IR del nanolubricante con 0.1 wt% MWCNT en diluciones de agua.....       | 63 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

|                |  |
|----------------|--|
| <i>CNT's</i>   | <i>Nanotubo de carbono</i>                 |
| <i>MWCNT's</i> | <i>Nanotubos de carbón multicapa</i>       |
| <i>SWCNT</i>   | <i>Nanotubo de carbón de una capa</i>      |
| <i>NP's</i>    | <i>Nanopartículas</i>                      |
| <i>nm</i>      | <i>Nanómetro</i>                           |
| <i>XRD</i>     | <i>Difracción de rayos x</i>               |
| <i>COEF</i>    | <i>Coefficiente de fricción</i>            |
| <i>wt%</i>     | <i>Porcentaje en peso</i>                  |
| <i>WSD</i>     | <i>El diámetro de cicatriz de desgaste</i> |
| <i>Poz</i>     | <i>Presión en el punto de quiebre</i>      |
| <i>poz</i>     | <i>Capacidad de carga máxima</i>           |
| <i>-OH</i>     | <i>Grupo funcional hidroxilo</i>           |
| <i>-COOH</i>   | <i>Grupo funcional carboxilo</i>           |

## RESUMEN

### “APLICACIÓN DE ESTRUCTURAS DE CARBONO EN LUBRICANTES PARA EL ANÁLISIS DE PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS”

Este estudio resalta el potencial de las nanoestructuras y las diluciones para mejorar el rendimiento y la capacidad de carga del lubricante. Se investigó el impacto de la adición de nanoestructuras, específicamente de los nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT) con grupos funcionales COOH y OH, y nanotoroides, en el desempeño tribológico del lubricante industrial semi sintético Sigralub M-40 empleado en el sector industrial de la zona metropolitana de Monterrey-México para procesos de moldeo y perforación de metales y aceros.

Las pruebas incluyeron variaciones en la concentración de nanoestructuras (0.1%wt y 0.3%wt) y diluciones en agua destilada (1:5,1:10, sin dilución) bajo condiciones de desgaste y extrema presión.

Los resultados revelaron que la introducción de nanoestructuras y diluciones contrarrestan significativamente el deterioro del lubricante base, reflejado en la pérdida de capacidad de carga, experimentado durante el almacenamiento a lo largo del tiempo. Las muestras que contenían nanoestructuras MWCNT-OH demostraron la capacidad de carga más alta, destacando la efectividad de estas nanoestructuras para mejorar el rendimiento del lubricante. Aunque aumentar la concentración no siempre favorecía el rendimiento, se obtuvieron mejores resultados con la concentración de 0.1%wt. Además, las muestras diluidas a una proporción de 1:10 con agua destilada se destacaron como una elección eficiente, conservando la capacidad de carga y utilizando menos lubricante, lo que apunta a una estrategia prometedora para reducir la toxicidad sin sacrificar el rendimiento.

# CAPITULO 1. FUNDAMENTOS DE INVESTIGACIÓN

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La expansión de las industrias aumentó la cantidad de procesos mecánicos que emplean, dependiendo el tipo de elaboración de materias primas y de acuerdo con el sector económico de interés; para ello las maquinarias permanecen en constante funcionamiento, provocando el desgaste de los componentes, terminando su vida útil y requiriendo ser desechadas y reemplazadas continuamente. Para alargar su funcionamiento es imprescindible el uso de lubricantes eficientes ante las condiciones extremas de desgaste. En la última década, el desarrollo de la nanotecnología y su aplicación en la industria nos puede brindar una opción para mejorar sus propiedades.

A nivel global, de acuerdo con las cifras del 2021, el banco mundial reportó que la industria experimentó un crecimiento anual es del 7.2% a comparación del -1.9% al 2020 <sup>[1]</sup> y su aporte al producto bruto interno actual fue del 17% a comparación del 16% anterior <sup>[2]</sup>. Este aumento de productividad industrial podría tener una relación con el índice de crecimiento poblacional reportado a 2021 del 0.9% <sup>[3]</sup>.

A nivel nacional, en julio de 2022, la producción industrial de México acumula un crecimiento del 0.4 % a tasa mensual <sup>[4]</sup> y del 1.9 anual% <sup>[5]</sup> con un crecimiento poblacional del 1% <sup>[6]</sup>.

En Monterrey, 24% del PIB es industrial, representando el 11.1% de las manufacturas del país, actualmente continúa con un ciclo de expansión de proyectos industriales con un crecimiento del 7.4% al I Trimestre 2022<sup>[7]</sup> contando con 135 482 establecimientos <sup>[8]</sup>.

Con las cifras presentadas, se visualiza el reciente crecimiento industrial después del pico de la crisis por pandemia, demandando a su vez el incremento de procesos industriales y consecuente desgaste en las herramientas de fabricación.

La aplicación de lubricantes en agua, suelos y aire, conlleva la generación de residuos que provocan efectos negativos significativos en el ambiente [9]. Este fenómeno se ejemplifica con la capacidad de perjuicio de un litro de aceite en agua, el cual se estima en la contaminación de 1000 a 40000 litros de agua [10].

La elaboración de lubricantes industriales a base de agua desarrollados con nanotecnología puede suponer una solución o mejoramiento de la problemática.

La implementación de diversas estructuras nanométricas de carbono como el nanotori, nanotubos multicapa y grupos funcionalizados COOH y OH, que funcionen como aditivos, al ser añadidas en el lubricante, permitirían optimizar los procesos mecánicos, conservando la calidad y reduciendo costos. La dilución con agua de estos nanolubricantes aumentarían su biodegradabilidad después de la aplicación mejorando el impacto ambiental.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

Una mejora del comportamiento tribológico en los materiales permite el alargamiento de la vida útil de herramientas industriales que realizan procesos de manufactura de motores, vehículos, etc. El uso de lubricantes es indispensable para disminuir fricción superficial, corrosión y el consumo de energía<sup>[11]</sup>. Debido a ello, la implementación de nanoaditivos a lubricantes es imprescindible para mejorar la eficiencia en los mecanismos industriales como el rectificado taladrado, torneado, moldeamiento de metales, entre otros [12]. Al optimizar las propiedades tribológicas ante presiones extremas y desgaste. Se evita que la producción se detenga e incurra en el cambio continua de nuevas piezas para las máquinas, ahorrando gastos innecesarios para las empresas, que puedan afectar su crecimiento.

Esta investigación aporta el análisis en diferentes variables (morfología, concentración y dilución) de nanoestructuras de carbono, que permiten alargar la vida útil y propiedades del lubricante, además la dilución en el lubricante con agua destilada contribuye a la reducción de toxicidad en el mismo, permitiendo una lubricación efectiva y sostenible para el medio ambiente.



A gran y pequeña escala, los beneficiados abarcan el campo de nanotecnología, países, empresas, y la sociedad. La nanotecnología recibirá nuevos aportes en materia de nanoaditivos y su aplicación al sector industrial. Los países continuarán teniendo avances en su índice de industrialización. Las empresas mejorarían la cantidad y calidad de producción a largo plazo optimizando sus mecanismos. La sociedad satisfará sus necesidades básicas y secundarias. El aumento la empleabilidad mejoraría su economía individual.

Este problema es importante debido al creciente aumento de industrialización a nivel mundial, nacional y regional que requiere especial atención en mejorar los procesos de manufactura para obtener resultados que contribuyan con su desarrollo.

El hueco del conocimiento que se pretende abordar se relaciona con la experimentación de las diferentes variables. Concentraciones (de aditivo diluido respecto al lubricante base), tipo de lubricante (sintético a base de agua) y estructuras (morfología del carbono) que no han sido abordadas en otras investigaciones.

Investigaciones en los últimos años sobre nanoestructuras de carbono y funcionalización de estas, nos dan indicios de la factibilidad de obtener resultados satisfactorios, debido al análisis de morfología y propiedades de estas estructuras y de su aplicación en otro tipo de lubricantes.

Se considera el proyecto significativo y pertinente por la zona en la que se realiza la investigación (Monterrey, Nuevo León). Y por los materiales empleados como las nanoestructuras de carbono sintetizadas en UANL - FCFM y lubricante ampliamente utilizados a nivel regional y nacional para procesos de perforaciones de aceros y metales (Sigralub M-40).

### **1.3 HIPÓTESIS**

La adición de nanoestructuras de carbono en lubricante sintético Sigralub M-40, en combinación con diluciones, resultará en un incremento sustancial en su capacidad de carga, lo que contribuirá al alargamiento de su vida útil.

### **1.4 OBJETIVOS**

#### **1.4.1 General**

Evaluar el desempeño de la incorporación de nanoestructuras de carbono como aditivos en lubricantes sintéticos, con el fin de prolongar su vida útil y mejorar su rendimiento tribológico.

#### **1.4.2 Específicos**

1. Sintetizar y funcionalizar las nanoestructuras mediante tratamiento fisicoquímico.
2. Preparar muestras con el lubricante en diferentes concentraciones de nanoestructuras de carbono y agua destilada.
3. Caracterizar las muestras por medio de la prueba tribológica de 4 bolas para obtener la capacidad de carga.
4. Evaluar el efecto del tipo de nanoestructura, la concentración y la dilución en la capacidad de carga del lubricante.

## CAPITULO 2. INTRODUCCIÓN

En la industria, se contemplan gran cantidad de procesos para la manufactura y obtención de productos. Existiendo mecanismos en los que ocurre interacción entre superficies con desplazamiento relativo, que experimentan efectos de fricción y desgaste. Estos buscan ser reducidos mediante la lubricación. Todas estas interacciones son estudiadas por la tribología. En los últimos años se busca optimizar y elevar la vida útil de las maquinarias, a través de la lubricación y el desarrollo de lubricantes con nanomateriales <sup>[13]</sup>.

En la nanotecnología se desarrollan diversos métodos de síntesis para la obtención de diferentes estructuras nanométricas, uno de los más destacables es el carbono, que puede conformar estructuras de diferentes dimensiones como 0D (fulereno), 1D (nanotubo de carbono), 2D (grafeno). De acuerdo con su configuración estructural, adquieren diferentes propiedades físicas y químicas <sup>[14]</sup> que pueden ser aplicadas en diferentes campos de tecnología y llevar a una optimización de procesos industriales.

En la última década diversos estudios han demostrado que la incorporación de nanoestructuras a lubricantes permite mejoras considerables en su desempeño tribológico. La mejora con estos nanoaditivos depende de factores como el porcentaje que se añade, su geometría, su tipo estructural, entre otros relacionados a las superficies que interaccionan <sup>[15]</sup>.

Para entrar en contexto teórico, debemos tener presentes varios conceptos relacionados en el tema, desde los orígenes, así como estudios previos que nos indiquen la factibilidad del proyecto y las definiciones que nos preparen para entender los siguientes capítulos de métodos de síntesis, caracterización y resultados.

## 2.1 ANTECEDENTES

La primera vez que se usó el término Tribología fue en Inglaterra en el Informe realizado por P. Jos en 1966, sin embargo, los orígenes son mucho más antiguos al inicio de la era industrial <sup>[13]</sup>.

Una breve revisión, nos muestra avances que podrían remontarse hasta la época prehistórica, con el uso de fricción para la generación de fuego con madera. Durante la civilización temprana se hallaron zócalos de piedra lubricados con grasa animal para transporte de objetos pesados y murales egipcios retratando su uso. En la Grecia y Roma antiguas se desarrollaron engranajes y rodamientos para barcos, con aceites animales y vegetales como lubricante. En el renacimiento Da Vinci aportó el diseño de rodamientos con jaula <sup>[16]</sup>. Durante la revolución industrial se desarrollaron estudios teóricos sobre la fricción y leyes del rozamiento, por parte de científicos como Newton, Amontons, Euler, Hook. En 1966 Jost destaca la importancia económica de la tribología en sistemas mecánicos para las reducciones de desgaste y fricción.

Dada su relevancia en el sector industrial, se enfocaron en realizar estudios a escala atómica e imponer condiciones extremas para evaluar los límites de lubricación. Se desarrollaron tecnologías de lubricación utilizando recubrimientos de diamante y carbono, así como lubricantes sólidos y sintéticos.<sup>[17]</sup> La investigación reciente se ha centrado en reducir la fricción y aumentar la capacidad de carga utilizando nanomateriales de carbono, como nanotubos de carbono y grafeno <sup>[18]</sup>.

Los MWCNT, formados por láminas de grafeno enrolladas, han mostrado excelentes propiedades mecánicas, con un módulo de hasta 1 TPa, resistencias a la tracción de ~11–63 GPa <sup>[19]</sup>, y en tribología reducción del desgaste en 17% <sup>[20]</sup>.

Posteriores estudios mostraron que al funcionar los MWCNT con tratamientos químicos, potenciaban las propiedades mecánicas y tribológicas, mejorando la

dispersión e interacción. Con grupos funcionales como los -OH y -COOH se tuvieron aumentos en la capacidad de carga alrededor de 20% con 2wt% [21].

En estudios de autoensamblaje de MWCNT con grupos funcionales, se obtuvieron nanoestructuras poco comunes toroidales. Las cuales mostraron un excelente comportamiento como lubricantes a base de agua mostrando una alta resistencia ante la aplicación de presiones de 7200N [22].

Se observó en otro estudio de deformación plástica con lubricantes sintéticos, que la adición de nanotori al 0.1wt% mejoró la capacidad de carga y redujo el desgaste en un 73% y 16%, respectivamente [23].

A lo largo de la historia se han y continúan desarrollando materiales anti-desgaste y técnicas para aumentar la durabilidad de herramientas industriales. Es importante seguir explorando métodos que contribuyan al desarrollo tribo-tecnológico con enfoque en sostenibilidad y la tecnología 4.0 [24].

## 2.2 TRIBOLOGÍA

Proveniente del griego "tribos" fricción y "logos" análisis, se establece la primera definición del término tribología escrito en el *Informe de Jost*, 1966, Inglaterra, nos la describe como: "La ciencia y la tecnología de las superficies que interactúan en movimiento relativo y de las prácticas relacionadas con ella" [25]. En tribología, los cuerpos en contacto, la superficie material y el ambiente conforman un tribo-sistema, del cual se realiza el estudio del comportamiento del desgaste, la fricción y lubricación entre superficies que interactúan con movimiento de rodadura, deslizamiento, separación, entre otras [26].

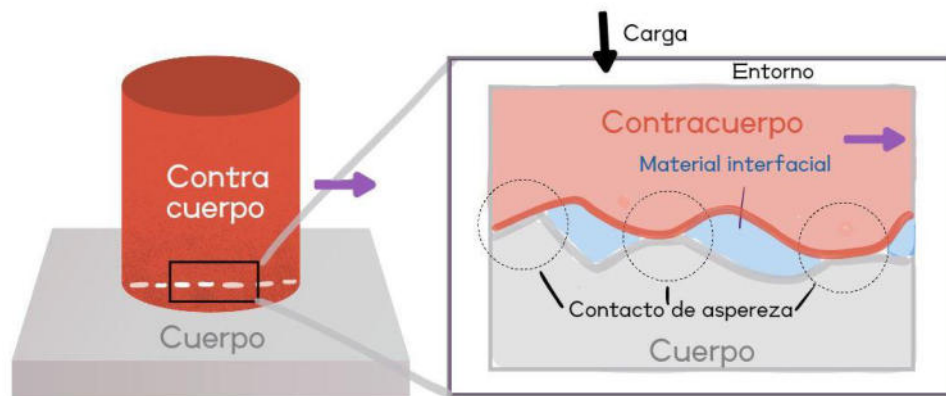


Figura 2.1 Descripción general de un tribosistema.

Comprende también el análisis de las características de películas de material intermedio entre cuerpos en contacto y las consecuencias del fallo de la película o de la ausencia de esta, que suele ser manifestada por fricción severa y desgaste superficial. Busca minimizar estas dos principales desventajas del contacto sólido a sólido, siendo la fricción una causa principal de disipación de energía y desgaste. Este último ocasiona a su vez desperdicio de material y la pérdida de rendimiento mecánico de herramientas. Mediante un mejor control de la fricción, cualquier reducción del desgaste puede resultar en ahorros importantes en producción industrial. Un medio efectivo para controlar y reducir la fricción es la lubricación, la cual mejora sus propiedades tribológicas a través de la implementación de aditivos derivados de la nanotecnología [27].

A través de pruebas de caracterización superficial, en diversos proyectos observamos parámetros que pueden ser analizados por la tribología y que aplicaremos en nuestra investigación [11, 28–31]:

- La capacidad de carga es la máxima cantidad de fuerza que un lubricante puede soportar entre superficies interactuantes sin provocar desgaste severo. Se coloca una máquina por periodos y condiciones preestablecidas.
- La cicatriz de desgaste es la huella resultante de la prueba, se calcula con la medición del diámetro de la abrasión o profundidad.
- El coeficiente de fricción es la relación que vincula la fuerza de rozamiento entre dos superficies con la intensidad de la fuerza normal que las mantiene interactuando.
- La presión limitante del agarrotamiento es la fuerza máxima que se puede aplicar sobre un área antes de que ocurra la rigidez en el movimiento y comience el desgaste grave debido a la rotura de la película lubricante y contacto directo.

Estos pueden ser analizados respectivamente mediante la prueba y la máquina Brugger, el instrumento SRV, Tester de 4 bolas y perfilómetro. A continuación, expandiremos la literatura acerca de las características principales en tribología.

### **2.3 FRICCIÓN**

La palabra fricción tiene origen del latín *fricare*, traducido como frotar, de la cual deriva su definición, establecida como la fuerza que opone resistencia al movimiento entre dos cuerpos en contacto relativo, conocido como deslizamiento [32]. Esta fuerza es considerada como una característica del tribosistema, y no como una propiedad exclusiva del material, ocasionada por discontinuidades superficiales [26].

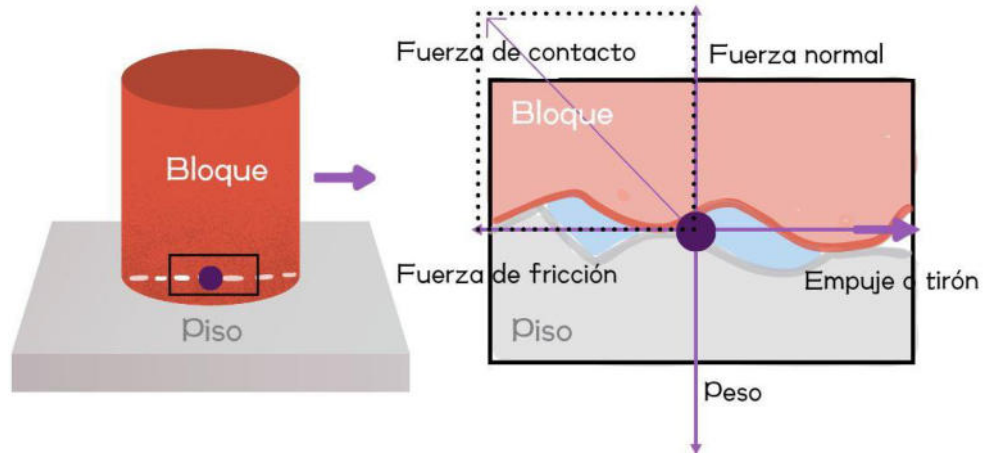


Figura 2.2 Esquema de fuerzas entre dos superficies con vistas a escala macro y microscópica.

### 2.3.1 Fricción entre cuerpos

De acuerdo con el estado de los cuerpos en contacto, la fricción adquiere diferentes denominaciones:

- Fricción aerodinámica: las superficies involucradas son un gas y un sólido. La fuerza es directamente proporcional al área de superficie.
- Fricción del fluido: interacción entre una superficie líquida con una sólida. Depende de la viscosidad del fluido y el gradiente de temperatura.
- Fricción interna: Ocurre entre las moléculas del mismo material, ocasionada por los procesos internos de disipación de energía, los cuales se deben a la deformación plástica y elástica.
- Fricción sólida o seca: ocurre entre cuerpos sólidos, originando la presencia de una fuerza tangente a la superficie y opuesta al movimiento [33].

En esta tesis nos enfocaremos en la última denominación, dada entre cuerpos rígidos, en nuestro caso balines metálicos, donde unos permanecen estáticos y uno superior entra en contacto con rotación a velocidad determinada.



### 2.3.2 Leyes de fricción

Se puede describir a nivel macroscópico las leyes clásicas de fricción que enuncian los factores que influyen en el rozamiento. Estas fueron propuestas por Guillaume Amontons (1699) y Charles Coulomb (1781), declarando lo siguiente:

1. La magnitud de la fuerza de fricción entre dos cuerpos es proporcional a la fuerza normal que uno ejerce sobre el otro.
2. La fuerza de fricción no depende del área superficial de contacto entre dos cuerpos, sin embargo, sí de la naturaleza del material.
3. La fuerza de fricción es independiente de la velocidad de deslizamiento de los cuerpos.
4. La fuerza de fricción tiene sentido opuesto a la velocidad del movimiento.

A partir de las leyes, se derivan los conceptos de fricción estática  $\mu_e$  y cinética  $\mu_c$  las cuales se presentan en los cuerpos rígidos, siendo la primera de mayor valor ( $\mu_e > \mu_c$ ) [34].

### 2.3.3 Fuerza de fricción estática

Se fundamenta en las dos primeras leyes, esta es la fuerza necesaria para comenzar el movimiento en relación con dos superficies en contacto. Es producida por sus defectos y se opone al comienzo del deslizamiento. En dicho punto de inicio, la fuerza de fricción estática es igual a la fuerza aplicada, hasta alcanzar el umbral del movimiento, caracterizado por el coeficiente de fricción estática  $\mu_e$ .

De acuerdo con la siguiente figura, cuando pasamos a la región cinética, la fuerza que se aplica para desplazarse es menor, indicando que es independiente a la velocidad del desplazamiento [34].

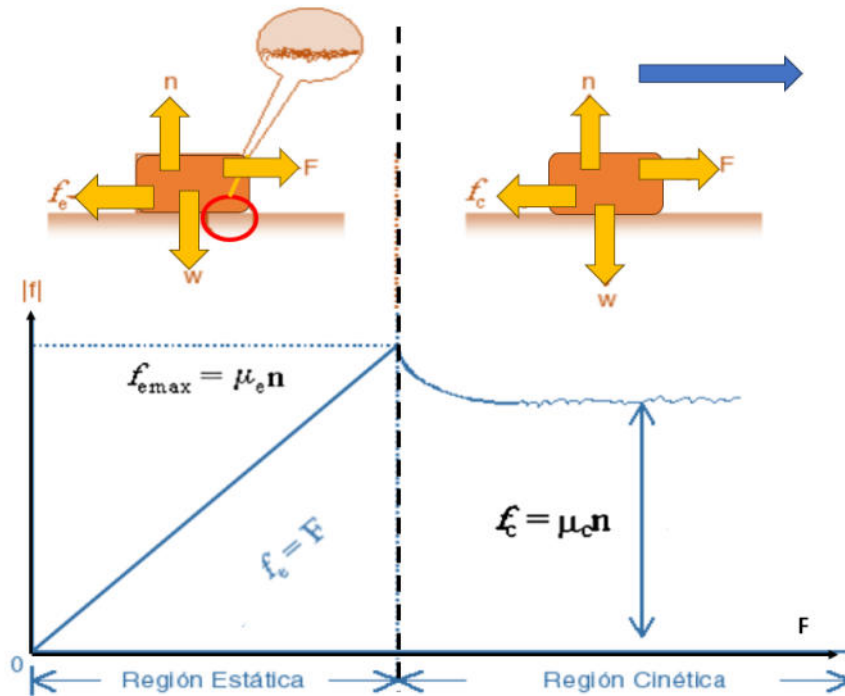


Figura 2.3 Gráfica de regiones de fricción estática y cinética.

### 2.3.4 Fuerza de fricción cinética

Es la fuerza tangencial que actúa cuando empieza el deslizamiento entre dos cuerpos en contacto, y es requerida para mantener el movimiento. Está relacionada a la primera ley que nos dice que la fuerza necesaria para deslizar un cuerpo respecto a otra superficie es proporcional al peso del cuerpo, entonces si la masa o carga aplicada aumenta, también lo hace la fuerza requerida para continuar el movimiento [35].

De acuerdo con esto, se deriva una constante de proporcionalidad conocida como coeficiente de fricción, definida por la relación entre la fuerza de fricción y la carga aplicada. Este parámetro adimensional está denotado por la letra  $\mu$  del alfabeto griego, y su expresión está dado de la siguiente forma:

$$\mu_c = \frac{F_r}{N} \quad (1)$$

donde  $F_r$  es la fuerza de fricción,  $\mu_c$  es el coeficiente de fricción cinético, y  $N$  la carga normal [32].

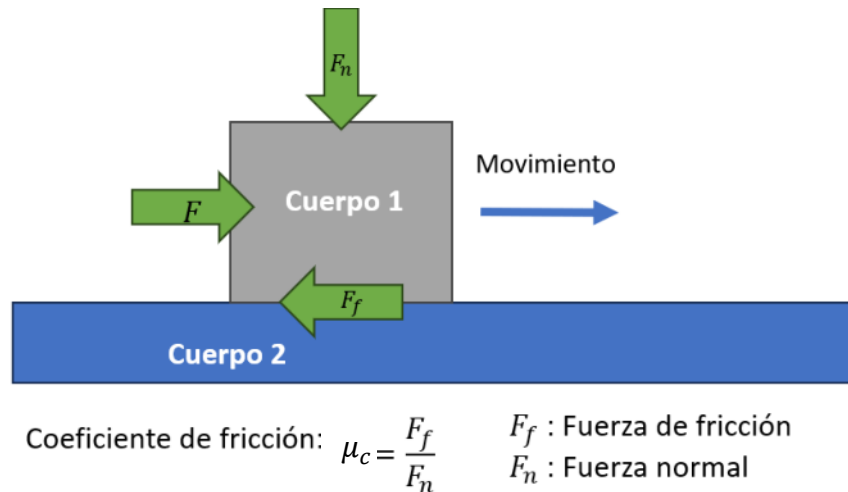


Figura 2.4 Coeficiente de fricción cinético en un sistema de deslizamiento.

### 2.3.5 Factores y efectos

La fricción puede ser deslizante o rodante, al presentar una naturaleza mecánica y/o molecular que depende de diversos factores como las condiciones de operación, rugosidad, las características de los materiales, la presencia o ausencia de agentes oxidantes, el efecto de la carga, entre otras. Los cuales influyen en el comportamiento de los coeficientes de fricción presentes [34, 36]. Es importante destacar que el mecanismo real de fricción ocurre a nivel microscópico, involucrando la topografía y morfología de las superficies en contacto donde está presente la fricción que inicia el proceso de transformación de energía, en los puntos de contacto [37]. Los mecanismos responsables de este proceso están presentes en la siguiente figura.

## I. Iniciación energética: Esfuerzos



## II. Transformación de energía



$$\mu = \mu_{ad} + \mu_{def}$$

## III. Disipación energética:

### Procesos térmicos, emisión y disipación

Figura 2.5 Mecanismos en la transformación de energía por fricción.

La fricción de esta manera afecta de manera significativa en el rendimiento de las máquinas, por lo cual se desarrollan investigaciones orientadas al análisis de los efectos más perjudiciales de la fricción en los materiales, como lo son la pérdida de potencia, disipación de energía, el sobrecalentamiento y el desgaste [38].

## 2.4 DESGASTE

El desgaste es un fenómeno tribológico que consiste en la alteración o pérdida irreversible del material de superficies en movimiento relativo, bajo la acción de altas cargas, alta temperatura o presión. No se considera como propiedad inherente del material, sino como una respuesta del sistema tribológico, al igual que la fricción[26, 37]. Principalmente surge como consecuencia del rozamiento, al originar diversos mecanismos de desgaste como adhesión, abrasión, deformación plástica y fatiga, que serán desarrolladas más adelante. Los cuales ocasionan el cambio en la morfología superficial por procesos físicos y químicos

dentro del área de contacto deslizante. Sin embargo, el desgaste también puede presentarse sin fricción, debido a la degradación o corrosión del material [39].

## 2.4.1 Mecanismos de desgaste

En la práctica se tiene una gran cantidad de mecanismos que dependen del tribosistema a analizar, observando así diversos tipos de desgaste. De acuerdo con los mecanismos predominantes basados en la norma ISO 15243:2017 [40], en términos generales, tenemos a los siguientes desgastes:

- Adhesivo,
- Abrasivo,
- Corrosivo,
- Por fatiga.

### 2.4.1.1 Desgaste adhesivo

Este mecanismo de desgaste se caracteriza por la pérdida de material o transferencia de este, producto de la unión ubicada entre superficies sólidas en contacto deslizante una sobre otra. Con un efecto de soldadura en las asperezas, que al separarse inmediatamente ocasionan la fragmentación de una parte del material. Esto se explica microscópicamente, al considerar los puntos altos de conexión entre las irregularidades, que, debido a la acción de fuerzas interatómicas, sufren deformaciones y producen partículas de residuos de desgaste, que conduce a la mezcla del material en ambas superficies o el deterioro superficial de cualquiera de ellas [26, 36].

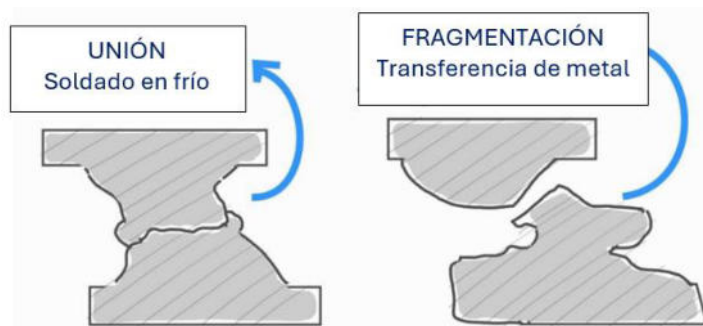


Figura 2.6 Desgaste por mecanismo adhesivo

### 2.4.1.2 Desgaste abrasivo

Es el mecanismo más común de desgaste en máquinas, consiste en la eliminación de material superficial por una acción mecánica de un abrasivo, el cual es forzado contra la superficie y se mueve a lo largo de ella. Usualmente debido a la contaminación con sustancias, partículas o protuberancias con dureza superior a la superficie desgastada [39, 41, 42]. Se pueden diferenciar dos métodos de desgaste abrasivo:

- Dos cuerpos: Ocurre cuando los picos de las asperezas penetran sobre la superficie contraria, sin la presencia de una partícula contaminante, este contacto ocurre cuando existe excesiva rugosidad y/o un inadecuado régimen de lubricación.
- Tres cuerpos: Ocurre ante la presencia de una partícula dura contaminante, comprimida entre los cuerpos deslizantes. Si la partícula es de tamaño superior a la película lubricante ocurre la formación de surcos o ranuras superficiales en dirección del movimiento [43].

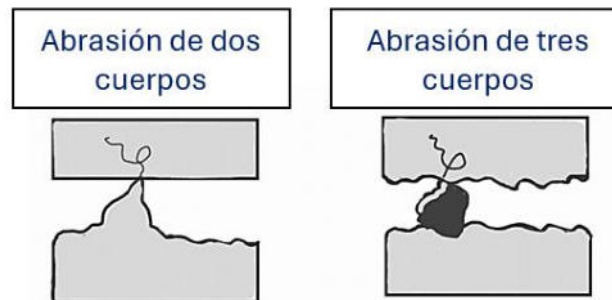


Figura 2.7 Tipos de desgaste abrasivo.

### 2.4.1.3 Desgaste Corrosivo

También denominado desgaste químico, en el cual, la reacción química con el ambiente es significativa, entre la superficie desgastada y el medio erosionado. El desgaste puede ser seco o húmedo. La erosión húmeda ocurre en respuesta con el agua, al crear acidez con una reacción química oxidativa; y por otro lado

la erosión seca es producida por la presencia de gases secos como aire o el nitrógeno. Ambas causando la remoción o deterioro del material [44].

La corrosión se presenta por la degradación del lubricante o excesiva contaminación de agua, gases o fluidos. Donde el inhibidor de corrosión ya no es capaz de proteger a la superficie contra la acidez, y experimenta diferentes “ataques” a la superficie inducida por corrosión, restringiendo la interacción entre los sólidos, sin embargo, no es necesario el contacto para que se genere este desgaste [39].

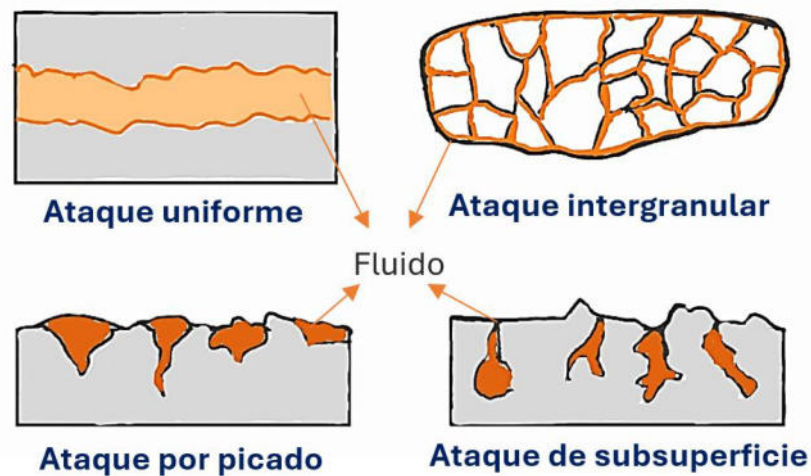


Figura 2.8 Diferentes formas de ataque por corrosión.

#### 2.4.1.4 Desgaste por fatiga

Este desgaste es ocasionado por esfuerzos cíclicos entre las asperezas de cuerpos en contacto. Se origina por la fractura surgida del movimiento oscilatorio por rozamiento en las superficies sólidas. Dicha degradación por flexión del material puede comenzar en la superficie interior o por algún daño que inicie en la superficie [45].

- Fatiga subsuperficial: Ocurre tras varios ciclos de esfuerzos con altas cargas concentradas a escala microscópica en el área de contacto, presionando el material y efectuando el cambio estructural que involucra

la remoción de fragmentos y formación de grietas que se propagan hacia la superficie. En la industria, es común en los dientes de engranajes.

- Fatiga iniciada en superficie: Las grietas empiezan por la superficie y se extienden hacia el interior del material. Debido a la reducción de la lubricidad, la película lubricante disminuye su fluidez y el grosor lo que provoca contacto por fricción deslizando y daño superficial. Los puntos más altos de las irregularidades se liman, dando un aspecto esmerilado [40].

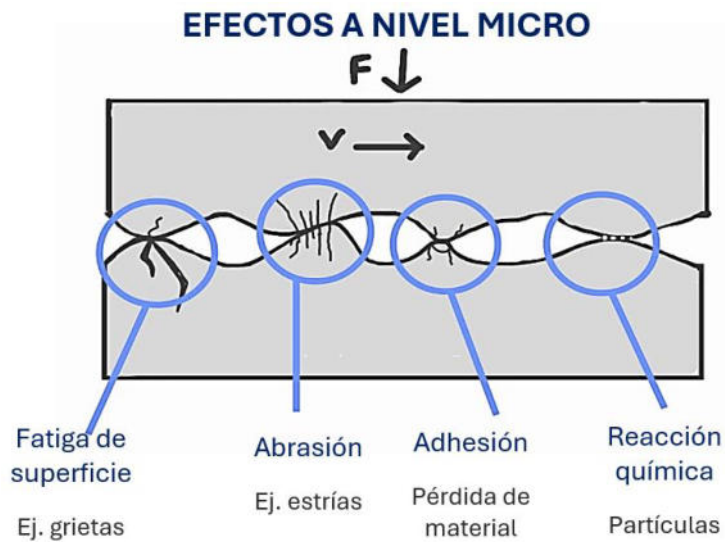


Figura 2.9 Mecanismos de desgaste.

### 2.4.2 Parámetros de desgaste

Los procesos de desgaste pueden caracterizarse a través de mediciones por perfilometría de los cambios dimensionales o topográficas en el material. De manera cuantitativa los dos parámetros más comunes serán enunciados a continuación [46]:

- Factor de desgaste: Se conoce también como la tasa de desgaste específica, relaciona los parámetros de funcionamiento con las mediciones de desgaste deslizando. Posee dimensión ( $mm^3/Nm$ ) y está definido con la siguiente expresión.

$$k = \frac{V}{F_N d} \quad (2)$$



Donde  $k$  es el factor de desgaste,  $V$  el volumen del material desprendido durante el deslizamiento,  $F_N$  la fuerza de carga normal y  $d$  la distancia de deslizamiento.

- Coeficiente de desgaste: correlaciona los parámetros del sistema tribológico con las mediciones del desgaste por deslizamiento. Es definido como un coeficiente adimensional.

$$K = \frac{H V}{F_N} \quad (3)$$

Donde  $K$  es del factor adimensional del coeficiente de desgaste,  $V$  el volumen de desgaste,  $F_N$  la fuerza de carga normal,  $d$  la distancia de deslizamiento y  $H$  la dureza del material más blando.

El desgaste ocasiona efectos en la funcionabilidad y desempeño de las máquinas, debido a ello, debe ser monitoreada continuamente, para entender los mecanismos de desgaste implicados y alargar la vida útil [46]. Es importante destacar que el desgaste no siempre es negativo, puede ser deseable en ciertas situaciones. Por ejemplo, se busca inducirlo en procesos de mecanizado donde tratan de pulir, limar o rectificar piezas. Por otro lado, es negativo cuando causan fallas en las partes, grietas o fragmentación de superficies.

## **2.5 LUBRICACIÓN**

Para facilitar el deslizamiento de movimiento de una superficie sobre otra y evitar daño, se interponen capas delgadas de gas, líquido o sólido de baja resistencia al corte. El conocimiento relacionado con mejorar o diagnosticar la eficacia de estas películas en la prevención de daños entre superficies en contacto se conoce como "lubricación". El tipo de material influye en los límites de la eficacia de la película. Aunque no hay restricciones en el tipo de material requerido para formar una película lubricante [27].

### **2.5.1 Funciones de los lubricantes**

Los lubricantes son sustancias que intervienen entre las superficies de fricción, impidiendo así cualquier influencia negativa en el movimiento. Se usan comúnmente para reducir la fricción y el desgaste [47].

Las tres funciones principales de los lubricantes involucran:

- **Controlar la fricción:** Siendo la primordial función del lubricante, debe reducir la fricción, prevenir el desgaste superficial y agarrotamiento. Sin embargo, hay situaciones donde la alta fricción controlada es necesaria, como en embragues, frenos, etc.
- **Enfriamiento del contacto:** El movimiento de frotamiento genera calor, el cual puede tener consecuencias negativas en los materiales que interaccionan, como cambios en la microestructura o posible falla térmica. A altas temperaturas se acelera el desgaste de los lubricantes. Un factor de control importante es la capacidad calorífica del lubricante.
- **Limpieza del contacto:** Mientras una máquina está en funcionamiento pueden aparecer partículas de desgaste, polvo o restos de lubricantes envejecidos. Estos contaminantes influyen en el rendimiento de la lubricación de manera negativa. Por ello es necesario hacer circular un lubricante para que pueda eliminar los residuos acumulados. Los lubricantes avanzados contienen sustancias para ayudar al proceso de limpieza de manera aún más eficiente.

Dado que las funciones de limpieza y enfriamiento necesitan fluidez, las grasas y lubricantes sólidos podría aplicarse a elementos de máquinas donde el calor y la contaminación no son factores relevantes. Porque de las tres funciones los lubricantes líquidos son los más indicados en muchas aplicaciones prácticas. Por lo tanto, varios aditivos han sido desarrollados y están siendo aplicados en lubricantes líquidos <sup>[48]</sup> pueden clasificarse de diversas formas, de acuerdo con el estado en el que se encuentren o su composición estructura y dependiendo a las características de los materiales en contacto con movimiento relativo <sup>[49]</sup>.

De acuerdo con su estado, los lubricantes se clasifican en tres aspectos:

- Líquidos: están incluidos los aceites minerales, sintéticos y semisintéticos.
- Semisólidos o semilíquidos: Presentan un estado intermedio acuoso espesante, tenemos a las pastas, grasas y ungüentos en esta categoría.
- Sólidos: Incluyen los revestimientos, partículas, plásticos, grafito, entre otros.

Es importante destacar que los aceites líquidos son los principales lubricantes utilizados, ya que permiten sustituir las fricciones externas de los sólidos y disminuir el desgaste de forma significativa <sup>[11][50]</sup>. Generalmente los lubricantes se formulan a partir de diferentes bases como minerales, sintéticos y biolubricantes. Los lubricantes sintéticos se formulan artificialmente a partir de la modificación de hidrocarburos y productos químicos derivados del petróleo en lugar de usar directamente el petróleo crudo entero <sup>[51]</sup>.

## 2.6 Nanoestructuras

Las nanoestructuras son estructuras que representan una conexión entre las moléculas y macrosistemas, constituyendo una categoría de materiales donde al menos una dimensión es inferior a 100nm.

Son notables las diferencias entre las características químicas y físicas de las nanoestructuras, las moléculas y los macromateriales que comparten la misma composición química. Esto se deriva de la configuración espacial, la morfología, reactividad química, estructura electrónica y energía en los sistemas <sup>[52]</sup>.

Para obtener las nanoestructuras se tienen dos alternativas de producción:

- Top Down: Implica producirlas mediante una reducción de material a partir de estructuras más grandes a manera de grabado.
- Bottom-up: En esta técnica se construyen desde los componentes más pequeños, a partir de bloques de átomos o moléculas, los cuales se ensamblan para formar estructuras más grandes <sup>[53]</sup>.

El conjunto de nanoestructuras abarca arreglos de nanoestructuras individuales, que al estar organizadas pueden manifestar propiedades distintas a ellas de manera individual <sup>[54]</sup>. Dentro de las nanoestructuras encontramos diferentes dimensiones (0D,1D,2D,3D):

- Nanomateriales de dimensión cero: Aquí se encuentran las nanopartículas menores a 10nm, llamadas puntos cuánticos, en donde las tres dimensiones se ubican en nanómetros.
- Nanomateriales de una dimensión: Encontramos a los nanotubos y nanoalambres, donde se tiene una longitud variable, conservan solo una dimensión en nanómetros.
- Nanomateriales de dos dimensiones: Tenemos a las películas delgadas, cuya área es de tamaño indefinido manteniendo su espesor inferior a 100nm.

- Nanomateriales de tres dimensiones: Las superredes tridimensionales de nanopartículas forman parte de los sólidos en tres dimensiones conformados por unidades nanométricas <sup>[52]</sup>.

La aplicación de estas nanoestructuras es multidisciplinaria debido a sus múltiples posibilidades de mejoras en las propiedades físicas y químicas de los materiales, siendo de gran utilidad en el sector de industria y particularmente beneficioso en el diseño de nanoaditivos en lubricantes que beneficien los procesos tribológicos.

## **2.7 Nanotubos de carbono multicapa (MWCNT)**

Son estructuras cilíndricas a escala nanométrica, compuestas por varias capas concéntricas de grafeno, las cuales están enrolladas en forma de tubo. El diámetro externo puede variar entre 2 y 100 nanómetros, y el interno entre 1 y 10 nm. Debido a su estructura multicapa, los MWCNT exhiben propiedades mecánicas, física y químicas excepcionales <sup>[55]</sup>.

### **2.7.1 Propiedades de los MWCNT**

- Alta resistencia mecánica: En las múltiples capas concéntricas de grafeno encontramos átomos de carbono organizados en un patrón hexagonal formando tubos cilíndricos. Estos átomos se unen por enlaces covalentes de tipo  $sp^2$ , excepcionalmente fuertes, proporcionando una gran resistencia mecánica y estabilidad a los nanotubos <sup>[56]</sup>. La relación alta entre la longitud y diámetro de los tubos minimiza defectos a lo largo de su eje, mejorando de manera significativa su capacidad de carga y resistencia a la tensión <sup>[57]</sup>.
- Alta conductividad térmica y eléctrica: Los átomos de carbono en los MWCNT están organizados en una estructura de hexágonos enlazados, formando capas concéntricas que constituyen la estructura tubular. Esta alineación regular facilita notablemente la movilidad de electrones a lo largo del nanotubo. Dicha movilidad es crucial para su alta conductividad

térmica y eléctrica, permitiendo a los electrones transportar de manera eficiente la carga eléctrica y el calor <sup>[58]</sup>.

- Gran área superficial: Los MWCNT poseen una estructura tubular porosa con estructura hueca, donde el diámetro es mucho menor que su longitud. Dicha característica les proporciona un área superficial bastante amplia en comparación con su volumen, lo que optimiza su capacidad de interacción con otras moléculas y materiales <sup>[59]</sup>.

La MWCNT tienen gran capacidad para formar enlaces químicos, tienen una forma delgada y alargada junto con su alta relación largo-diámetro, para facilitar su dispersión en diversos materiales sin formar aglomerados y mejorar su compatibilidad con distintas matrices, se puede optar por realizar una funcionalización.

### **2.7.2 MWCNT funcionalizados**

La funcionalización de los MWCNT se realiza por medio de la modificación química de su superficie, esto es, a través de tratamientos en los que se añadan grupos funcionales de manera controlada, grupos como hidroxilos (-OH), carboxilos (-COOH), epóxidos (-O) y aminos (-NH<sub>2</sub>). El tratamiento con agentes oxidantes cambia significativamente la química de la superficie en la nanoestructura. Este proceso implica la formación de enlaces covalentes o no covalentes, esto depende de los reactivos y método empleado. Estas interacciones mejoran las propiedades, aumentando la solubilidad en diversos solventes y matrices poliméricas, mejorando la dispersión para prevenir que se formen aglomerados, y potenciando la interacción con otros materiales <sup>[60]</sup>. En esta investigación, nos centramos en la funcionalización con grupos OH y COOH debido a su capacidad para mejorar las propiedades tribológicas de los lubricantes. Estas funcionalizaciones no solo mejoran la dispersión de los MWCNT y previenen su aglomeración, sino que también favorecen la formación de una película lubricante más uniforme, lo que contribuye a reducir la fricción y el desgaste en superficies metálicas bajo condiciones extremas<sup>[61]</sup>.

### **2.7.2.1 Polaridad e hidrofiliidad**

La polaridad se refiere a la distribución no uniforme de las cargas dentro de una molécula creando polos, uno positivo y otro negativo. Las moléculas polares atraen a otras similares mediante fuerzas dipolo-dipolo, es esta la propiedad que las hace hidrófilas, ya que pueden establecer puentes de hidrógeno con el agua (interacción dipolo-dipolo más fuerte) donde un hidrógeno unido a un átomo altamente electronegativo como el oxígeno se acerca a otro electronegativo [62].

Los grupos funcionales carboxilo (-COOH) e hidroxilo (-OH) son muy polares debido a la presencia de oxígeno, muy electronegativo, contribuyendo respectivamente a momentos dipolares de 1.5-1.7 y 1.7-2.1 Debye [63]. Estos grupos interactúan bastante bien con moléculas polares y solventes, facilitando la solubilidad y dispersión de los MWCNT en medios acuosos y orgánicos [64].

### **2.7.2.2 Reactividad, acidez y resistencia a la temperatura**

La reactividad se refiere a la habilidad de una sustancia o molécula para participar en reacciones químicas. El grupo hidroxilo (-OH) es grupo funcional que puede actuar como ácido débil, con una magnitud de 15 - 17 pKa, lo que le permite participar en diversas reacciones como la deprotonación (pérdida de un protón) o condensación (formación de enlaces con otras moléculas).

Por otro lado, el grupo carboxilo (-COOH) tiene una acidez mayor, con un pKa de 4 a 5, considerado como ácido fuerte. Esto facilita que pierda un protón más fácil, aumentando su reactividad química [62].

Sobre la estabilidad térmica, el grupo hidroxilo es estable hasta alcanzar temperaturas altas, comenzando su descomposición térmica entre 900 y 1100°C. En contraste, los grupos carboxilo son menos estables, ya que estos comienzan su descomposición térmica entre 200 y 400°C [65]. Esto puede darse por el proceso de decarboxilación en el que se libera dióxido de carbono en condiciones de alta temperatura.

## **2.8 NANOADITIVOS EN LUBRICANTES**

En tribología encontramos distintos mecanismos de desgaste mecánico (abrasivo, adhesivo, corrosivo, por fatiga) los cuales pueden afectar el rendimiento de los lubricantes. Los aditivos se usan comúnmente para prevenir estos efectos y para proporcionar las propiedades deseables y la interacción con la interfaz. Se dividen en dos categorías: antidesgaste (AW) o extrema presión (EP) [66]. El aceite lubricante determina las propiedades básicas del lubricante como eliminar el exceso de calor y reducir el desgaste / fricción, y los aditivos se encargan de optimizar aún más las propiedades y funciones de los lubricantes.

La incorporación de diferentes nanopartículas en los lubricantes ha mostrado mejorar la eficiencia de los procesos industriales al reducir la fricción interfacial y aumentar la capacidad de carga. Estos aditivos crean una barrera protectora entre las dos superficies, reduciendo el contacto directo [12].

Diversas investigaciones acerca de sistemas de lubricación adicionados con nanoaditivos muestran la disminución del desgaste y daño superficial, el consumo de energía y el coeficiente de fricción (COF) [11, 12, 15, 67, 68].

Existen una gran variedad de factores que contribuyen a la mejora del rendimiento en las propiedades tribológicas, al agregar nanoaditivos a lubricantes. Algunos de estos factores son: porcentaje o concentración de nanoaditivos agregados, geometría de las nanoestructuras, tipo de nanopartículas, y rugosidad de la superficie en contacto [67]. Estos, junto con los mecanismos tribológicos generados por nanopartículas (efecto portante, relleno de valles, separadores superficiales y efecto de rodadura/deslizamiento, entre otros), son los que han mostrado avances en el desempeño del proceso de lubricación [69].

## **2.9 NANOLUBRICANTES**

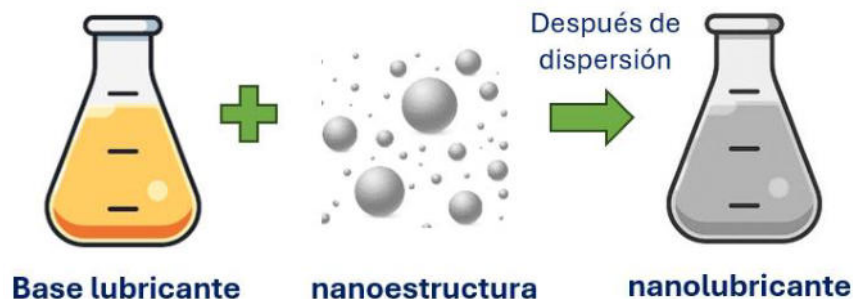
El empleo de nanomateriales como aditivos en lubricantes, recibe el nombre de nano lubricación, y la dispersión de nanopartículas en el lubricante base es



conocido como nanolubricante. Los cuales son ampliamente estudiados en tribología. Comúnmente, las partículas que los conforman poseen dimensiones diametrales de 1 a 100nm [70].

Estos nanolubricantes pueden sintetizarse por método de uno o dos pasos.

- Método de un paso: Directamente formulados por proceso químico.
- Método de dos pasos: Primero se sintetiza en forma de polvo por síntesis química o física, para luego dispersarlos en la base lubricante.



*Figura 2.10 Obtención de nanolubricantes.*

Para explicar los mecanismos de reducción de fricción, y rendimiento antidesgaste de estas estructuras, se han propuesto diversas hipótesis que se enuncian a continuación.

- En el efecto de rodadura, los nanomateriales esféricos son los que contribuyen a rodar entre las superficies desgastadas, no se producen interacciones químicas, por tanto, modifican el deslizamiento añadiendo la rodadura.
- En película protectora las nanoestructuras forman un tribofilm o película delgada sobre la superficie, a través de interacciones con las superficies en deslizamiento disminuyendo la fricción y desgaste.
- En el efecto de reparación estos nanomateriales podrían actuar mediante la producción del tribofilm que se deposita en las superficies y compensa la pérdida de masa.

- Para el efecto de pulido, la abrasividad del nanomaterial disminuye la rugosidad de las superficies friccionantes. De esta forma la rugosidad está influenciada con el tamaño de los nanomateriales [71].

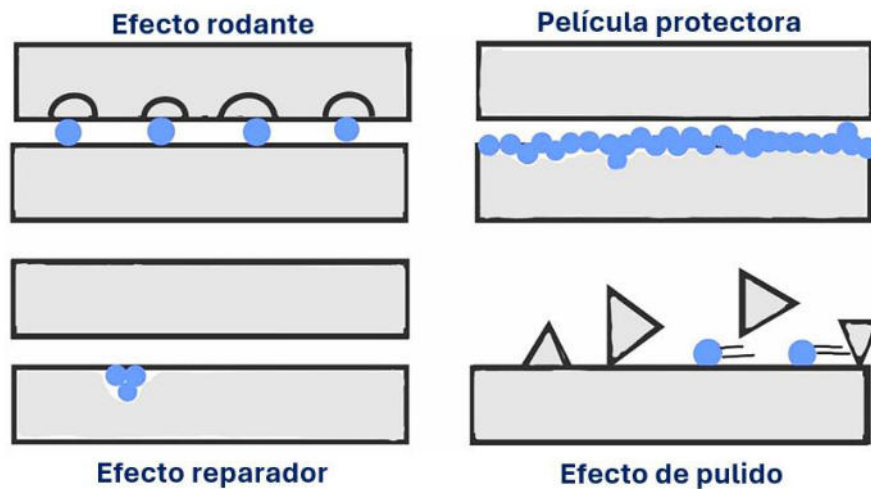


Figura 2.11 Efectos de mejora de NPs.

Los nanolubricantes, optimizados por nanoestructuras, permiten reducir el uso de lubricante base y son compatibles con disoluciones de agua. Esta característica disminuye la generación de residuos. Se están desarrollando activamente métodos de reciclaje y descomposición en cuanto a la gestión de nanotubos de carbono utilizados en los nanolubricantes, entre ellos, destacan las técnicas para extraer y recuperar los nanotubos de carbono, los cuales pueden ser reutilizados en nuevos ciclos de producción o incorporados en la fabricación de materiales compuestos [72, 73]. Tecnologías emergentes enfocadas en la degradación controlada de los nanotubos de carbono, como los procesos de oxidación avanzada, permiten transformar estos nanomateriales en compuestos más manejables y menos persistentes, facilitando su gestión [74].

### 2.9.1 Nanopartículas como aditivos

Las nanopartículas, de acuerdo con su composición, pueden consistir en metales, óxidos metálicos, sulfuros, nanocompuestos o nanopartículas de

carbono tales como las enlistadas en la Tabla 1.1. Destacando como aditivos lubricantes a los nanomateriales a base de carbono, los cuales mejoran los efectos negativos asociados al tribosistema como reducir el coeficiente de fricción y mejorar la resistencia al desgaste <sup>[75]</sup>. Particularmente estas nanoestructuras poseen propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y químicas particulares que les da una excelente lubricidad <sup>[76]</sup>.

*Tabla 2.1 Lista de nanoestructuras utilizadas como aditivos en lubricantes y su efecto en la mejora de capacidad de carga y cicatriz de desgaste.*

| Nanopartícula/<br>Nanoestructura | Base<br>Lubricante | Concentración<br>wt (%) | Capacidad<br>de<br>carga poz<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | Cicatriz<br>de<br>desgaste<br>(mm) | Ref.     |
|----------------------------------|--------------------|-------------------------|--|------------------------------------|----------|
| Cnp: Nanotori                    | Sintético          | 0.1                     | 73%  | 16%                                | [23, 67] |
| TiO <sub>2</sub>                 | Grasa              | 1                       | 11.41%   | 5.23%                              | [68]     |
| MoS <sub>2</sub>                 | Agua               | 1                       | 641%   | 38%                                | [67]     |
| MoO <sub>3</sub>                 | Aceite             | 1                       | 26.79%   | 8%                                 | [67, 68] |
| MWCNT-OH                         | Agua               | 0.01                    | 19%  | -                                  | [21]     |
| MWCNT-<br>COOH                   | Agua               | 0.01                    | 10%  | -                                  | [21]     |
| MWCNT                            | Grasa              | 1                       | 63%  | 25%                                | [20, 77] |
| MWCNT                            | Agua               | 2.5                     | -  | 17%                                | [20]     |
| Cnp: Nanotori                    | Solo agua          | 2                       | 955%   | 80%                                | [21]     |

### **2.9.2 Parámetros de nanopartículas en rendimiento de lubricantes**

También existen parámetros asociados a las NPs muy importantes que afectan en el rendimiento de los lubricantes, tales como el tamaño, la forma, la estructura y la concentración de nanopartículas.

### **2.9.2.1 Concentración**

La concentración de nanopartículas es un factor primordial en la mejora de reducción en fricción desgaste. Es importante que se considere todos los parámetros del tribosistema. Para cada lubricante existe una concentración óptima para la máxima reducción. Sin embargo, no existe una concentración ideal general, ni una relación directamente proporcional entre la cantidad de nanopartículas agregadas y el rendimiento [70].

### **2.9.2.2 Morfología**

La estructura y arreglo atómico puede afectar las propiedades mecánicas, como la presencia de vacancias atómicas incrementa la resistencia mecánica y un exceso de defectos ellos pueden reducirlo. Es relevante para la presión experimentada por cargas, aquellas de forma esférica o toroidal actuarán con efecto de rodamiento entre las superficies deslizantes. Sin embargo, las esféricas sufren mayor presión ya que el área de superficie de contacto es menor. También está relacionado el área superficial/volumen de la NPs, ya que un área con una alta energía superficial puede provocar una mayor aglomeración y atracción molecular resultando en sedimentación. Además, con un exterior blando en la estructura se permite una elevada capacidad de carga [18].

### **2.9.2.3 Funcionalización**

Nanomateriales funcionalizados han mostrado mejoras en la estabilidad de dispersión y la distribución homogénea en el aceite base. Las nanopartículas funcionalizadas en superficie tienen una mejor lubricación evitando la transferencia de material y el contacto directo. La aglomeración de nanopartículas es un problema a la hora de preparar nanolubricantes debido a las fuerzas de Van der Waals. Donde la suspensión será estable las NPs si se tienen fuerzas de repulsión elevadas. La aglomeración puede reducirse mediante el empleo de métodos de tratamiento físico o químico como la modificación de la superficie de las NPs utilizando nanopartículas funcionalizadas para lograr la

estabilidad de los nanolubricantes a largo plazo. Debido a la saturación de modificadores, la fuerza superficial de los grupos hidroxilo se reduce y los enlaces de hidrógeno se eliminan evitando el desarrollo de enlaces de oxígeno, y limitando la aglomeración [18, 61].

## CAPITULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 3.1 MÉTODO

Se preparan nanolubricantes con distintas estructuras de carbono (Figura 3.1): nanotubos de carbono multicapa (MWCNT), nanotubos de carbono multicapa funcionalizados con grupos OH (MWCNT-OH), nanotubos de carbono multicapa funcionalizados con grupos COOH (MWCNT-COOH) y nanotori, en diferentes concentraciones de peso en NPs (wt%) y proporción de cantidad de agua destilada. El resumen del proyecto se muestra en la figura 3.2, la cual contiene los procesos a seguir para el desarrollo de la investigación.

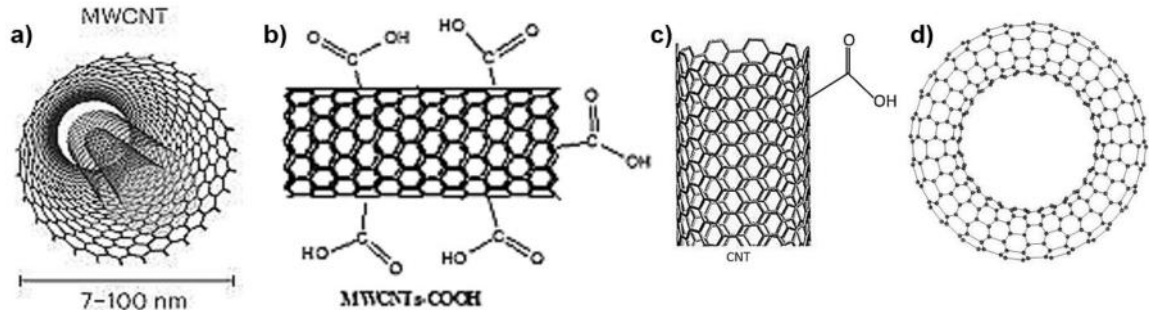


Figura 3.1 Representación de nanoestructuras de carbono utilizadas: a) Nanotubo de carbono multicapa. b) Nanotubo de carbono con grupos COOH. c) Nanotubo de carbono con grupo OH. d) Nanotoroide de carbono.



Figura 3.2 Esquema del proceso de experimentación



*Figura 3.3 Muestras de lubricante Sigralub adicionado con nanoestructuras*

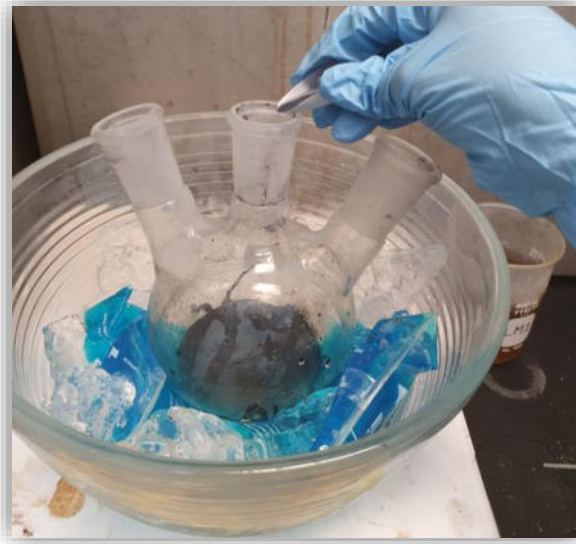
Para desarrollar esta investigación requeriremos dividirla en 4 procesos que incluyen una serie de pasos y parámetros generales que se desarrollan a continuación.

### **3.1.1 Preparación de nanoestructuras**

Los nanotubos de carbono multicapa (MWCNT) se sintetizaron mediante la técnica de spray pirólisis, utilizando tolueno como precursor de carbono y ferroceno como catalizador, en un horno tubular bajo un flujo controlado de nitrógeno seco. Para su funcionalización con grupos carboxilo (-COOH) e hidroxilo (-OH), se realizaron tratamientos químicos específicos. La funcionalización con grupos -COOH se realizó mediante oxidación en una mezcla de ácido sulfúrico y nítrico (proporción 3:1), mientras que los grupos OH se incorporaron mediante reacción con peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) durante 1 hora.

Para la preparación de las nanoestructuras toroidales (Figura 3.4), se siguió el "Método de Síntesis de nanotori a baja temperatura" de Arquieta P. [22]. Este método consiste en un tratamiento fisicoquímico en el que los MWCNT

funcionalizados con grupos  $-COOH$  se disuelven en una solución ácida compuesta por ácido nítrico, sulfúrico, clorhídrico y permanganato, sometidos a agitación magnética en un baño de hielo durante 48 horas. Posteriormente, se añade peróxido de hidrógeno, y la mezcla se lava repetidamente con agua destilada, seguida de 2 centrifugaciones, y tratamiento con ultrasonido para una dispersión homogénea, finalmente se recoge el sobrenadante para obtener los nanotoroides.



*Figura 3.4 Preparación de nanotoroides de carbono*

### **3.1.2 Preparación de nanolubricantes**

Se utilizó de base el lubricante sintético SIGRALUB M-40, aplicado habitualmente en los procesos de conformación de metales (perforación de tubos). Para la preparación de las muestras de nanolubricante se utilizaron frascos de 60 ml que contenían tres tipos de bases: lubricante puro, lubricante diluido en proporciones de 1:5 y 1:10 con agua destilada. A cada frasco se le añadió uno de los diferentes tipos de nanoestructuras previamente sintetizadas (MWCNT, MWCNT-OH, MWCNT-COOH, o nanotoroides), en concentraciones de 0.1 wt% y 0.3 wt%, empleando agitación termomagnética para asegurar una dispersión homogénea. Posteriormente, las muestras se sometieron a un tratamiento de ultrasonido

durante 4 minutos, con el fin de optimizar la dispersión de las nanopartículas en el lubricante, fundamental para evaluar su efecto en el rendimiento tribológico del lubricante.

### 3.1.3 Pruebas tribológicas

Se eligió la prueba de las 4 bolas por ser una técnica ampliamente utilizada en tribología para evaluar el desgaste y la capacidad de carga de los lubricantes bajo condiciones extremas. Esta prueba simula las condiciones reales de presión y fricción en aplicaciones industriales y proporciona datos cuantitativos confiables para comparar el rendimiento de los nanolubricantes en las diferentes concentraciones y diluciones. En la Tabla 3.1 se muestran los componentes involucrados en las pruebas tribológicas como el material de la muestra, la concentración de nanoaditivo en el lubricante, las pruebas o caracterización a realizar y los respectivos análisis.

*Tabla 3.1 Resumen de los componentes del proyecto*

| MATERIAL                  | CONCENTRACIÓN |           | CARACTERIZACIÓN                         | ANÁLISIS  |
|---------------------------|---------------|-----------|---|---|
| Signalub M-40             | NPs (%)       | AGUA (ml) | Test de 4 Bolas<br>Perfilometría óptica | Presión máxima de carga<br>Dimensiones de las huellas de desgaste |
| SM-40 + MWCNT             | 0.1           | Sin agua  |   |   |
| SM-40 + Nanotori          |               | 1-5       |   |   |
| SM-40 + MWCNT + COOH / OH | 0.3           | 1-10      |   |   |



El rendimiento de los nanolubricantes, fue determinado a través de una máquina T-02 tester de 4 bolas (Figura 3.5). Con resultados de este análisis es posible evaluar el coeficiente de fricción, la capacidad de carga (en condiciones EP y AW), y las huellas de desgaste. Las pruebas se realizan 3 veces como mínimo por cada muestra para estar seguro en repetición del resultado. Los parámetros empleados involucran una temperatura ambiente del nanolubricante a 25°C, a velocidad de 500 rpm y cargas aplicadas de 0 hasta 7200 newtons en un lapso de 18 segundos.



*Figura 3.5 Máquina de Prueba 4 bolas T-02 UVM.*

## **CAPITULO 4. METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN TRIBOLÓGICA**

### **4.1 PRUEBA DE LAS 4 BOLAS**

Las pruebas tribológicas en lubricantes buscan maximizar la eficiencia en máquinas industriales, al disminuir el desgaste y fricción de superficies en movimiento relativo, los lubricantes deben ser sometidos a este tipo de pruebas para determinar su comportamiento ante la fricción y desgaste en distintas condiciones de operación. En específico, la técnica de desgaste de 4 bolas utiliza un tribómetro como instrumento para establecer las propiedades relacionadas a la prevención del desgaste (WP), presión extrema (EP) y comportamiento

friccional en una película lubricante, empleando varios parámetros como las cargas, velocidad de funcionamiento, las bases (aceites, lubricantes, grasas) y material de los balines <sup>[29]</sup>.

El tribómetro puede determinar diferentes tipos de rendimiento en los lubricantes, como: la presión limitante de agarrotamiento (Poz), el diámetro de la cicatriz de desgaste (WSD), la capacidad de carga (poz) y coeficiente de fricción (COEF).

Experimentalmente, la prueba consiste en 4 bolas de acero (balines), de las cuales 3 son colocadas juntas en un contenedor, el cual se cubre con el lubricante a analizar, tal y como se muestra en la Figura 4.1. La cuarta bola superior realiza un movimiento de rotación y se presiona contra las bolas estacionarios con parámetros como la carga, velocidad, temperatura y tiempo especificado. En nuestro análisis se evalúan rangos de cargas que van de 0 a 7200 Newtons, con breves periodos de 18 segundos con temperatura ambiente aproximada de 24°C, se sugiere repetir la prueba de 3 a 4 veces por muestra.

Al final de la prueba, cuando la película lubricante ha perdido sus propiedades mecánicas y físicas, se determinan los parámetros en los puntos de contacto o soldadura, se contrastan las mediciones de las tres huellas de desgaste producidas y se informa el promedio de los diámetros. El coeficiente de fricción también se mide a lo largo de la prueba <sup>[28]</sup>.

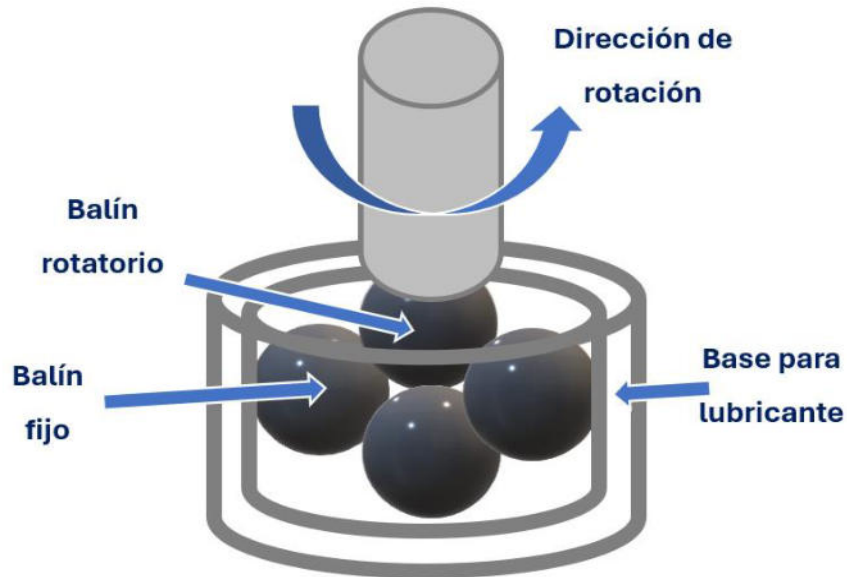


Figura 4.1 Diagrama esquemático del tribómetro de 4 bolas.

Esta prueba es la mejor para medir las cualidades tribológicas, sin embargo, una de sus desventajas es su incapacidad de incorporar gráficas de rugosidad o relieve superficial y datos de temperatura en el tiempo, en esos casos se emplea un perfilómetro y viscosímetro para incluirlos respectivamente. Debido a los beneficios que ofrece, la mayoría de las industrias manufactureras están interesadas en investigar el rendimiento tribológico, en especial la automotriz y metalúrgica <sup>[30]</sup>.

## 4.2 PERFILOMETRÍA ÓPTICA

Esta técnica de caracterización no destructiva, extrae información topográfica de la superficie, haciendo un escaneo de línea o tridimensional. Su principal objetivo es obtener los parámetros primordiales de rugosidad y morfología superficial, a través de luz, de acuerdo con la configuración del equipo perfilométrico <sup>[78]</sup>.



*Figura 4.2 Perfilómetro Alicona.*

El perfilómetro óptico (Figura 4.2) consta de un detector que determina la ubicación de puntos de la muestra, y de una base donde se deposita la muestra, la cual puede moverse en distintas direcciones para la medición. Emplea una luz que se dirige de forma que pueda detectar la superficie tridimensionalmente [79].

El perfilómetro proporciona una caracterización tridimensional para diferentes tipos de superficies (rugosas, lisas, duras, blandas, etc.). Puede determinar parámetros y analizar diferentes características del material, entre ellas:

- Dimensiones de las partículas microscópicas arriba del sustrato.
- Dimensiones del pozo de corrosión o espesor del recubrimiento.
- Visualización de cicatrices o patrones de desgaste.
- Mediciones de rugosidad y profundidad.
- Medición superficial de discontinuidades y defectos en pruebas tribológicas.

Entre las ventajas de este método destaca su funcionamiento sin contacto con la superficie de la muestra, evitando su deterioro luego del análisis, además es relativamente rápido. No es necesario una cámara especial ni ambiente vacío, tiene buena adaptabilidad al analizar muestras de diversas dimensiones y

materiales con una precisión alta de rugosidad En varios sectores industriales, el análisis de perfil superficial desempeña un rol importante en la elaboración de materiales de alta precisión y en los controles de calidad para evitar defectos superficiales [80].

### 4.3 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA (IR)

Esta técnica de análisis espectroscópica se basa en los procesos de absorción y emisión de radiación infrarroja (IR) por moléculas en vibración. Estudiando la interacción entre la materia y la radiación electromagnética principalmente en la región media del espectro. Cada molécula posee un tipo de huella espectral única que permite su identificación respecto a otras. Para poder entender mejor este análisis debemos mencionar aspectos del infrarrojo.

El espectro IR comprende rangos entre 12500 y 10  $cm^{-1}$ , dividido en tres regiones (Figura 4.3):

- Infrarrojo cercano (NIR): 12500 - 4000  $cm^{-1}$
- Infrarrojo medio (MIR): 4000 - 400  $cm^{-1}$
- Infrarrojo lejano (FIR): 400 - 10  $cm^{-1}$

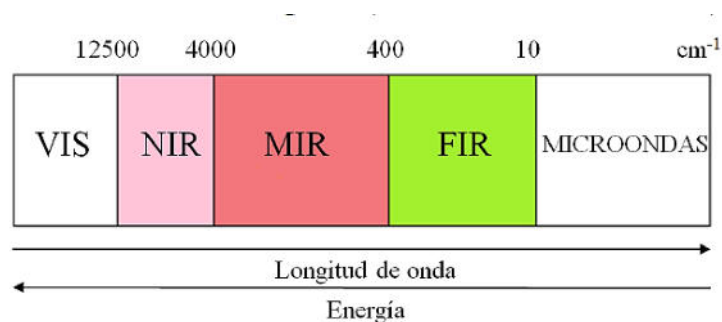


Figura 4.3 Región del infrarrojo.

Cuando la energía de radiación que incide en una molécula es igual a la diferencia de energía entre dos estados de energía, la molécula absorbe radiación y provoca un cambio en su momento dipolar debido a los movimientos vibratorios, representados en la Figura 4.4, los cuales pueden ser de 2 tipos diferentes:

- Estiramiento: cambios en la distancia entre dos átomos a lo largo del eje de enlace.
- Flexión: cambio en el ángulo que forman dos enlaces.

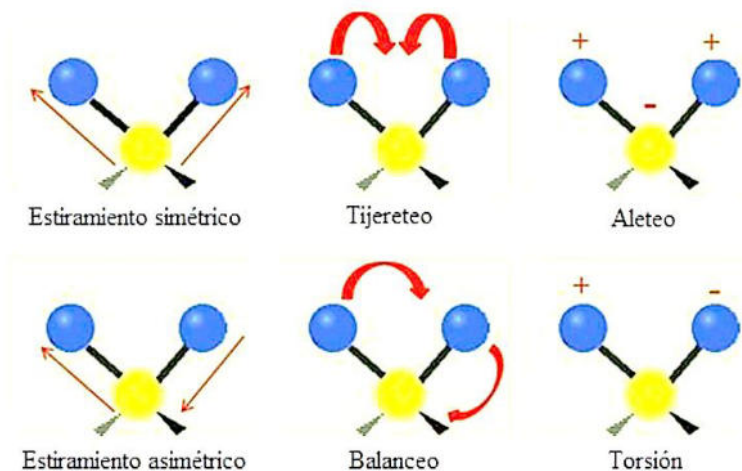


Figura 4.4 Vibraciones moleculares <sup>[81]</sup>.

La mayoría de las moléculas experimentan vibraciones que provocan absorción en determinada longitud del IR, y que, al ser analizadas, permite obtener información acerca que las moléculas que componen la sustancia <sup>[82]</sup>.

El principio de funcionamiento se basa en el interferómetro de Michelson, partiendo de la radiación infrarroja emitida de un haz de luz, que impacta a un divisor que fragmenta el haz en dos mitades simétricas (Figura 4.5), que de acuerdo a la muestra, siguen una determinada trayectoria, donde el detector IR capta la señal generada por el contacto con la muestra, la digitaliza y envía de nuevo al equipo, donde el algoritmo de la transformación de Fourier se lleva a cabo para el desarrollo de las curvas del interferograma <sup>[83]</sup>.

Respecto a la fuente de radiación, esta debe tener un rango de longitud de onda amplio, una fuerte intensidad y estabilidad en cualquier periodo. Puede ser continua (lámpara de tungsteno), de línea (láser diodo) o radiación (global, bobina níquel-cromo). Adicionalmente existen varios sistemas de medida:

- Transmitancia: se toma en cuenta la radiación transmitida y absorbida, es aplicada para muestras gaseosas, líquidas o semilíquidas.

- Reflectancia difusa e interna total: considera la radiación reflejada, suele ser empleada para sólidos.
- Transflectancia: emplea las anteriores radiaciones simultáneamente, se utiliza para muestras líquidas o semilíquidas.

Entre las ventajas de este método resalta su versatilidad para trabajar con muestras sólidas y líquidas, por otro lado, al no ser destructivo para la muestra no requiere una preparación específica y la resolución de los espectros están bien definidos [81].

Su aplicabilidad nos permite determinar un análisis cualitativo de la composición química, al detectar los grupos de moléculas de estructuras no conocidas, en la industria alimentaria se aplica para el control de calidad, en la biológica para distinguir entre muestras sanas y patológicas o detectar microorganismos, en la manufacturera para detectar contaminantes o en nuestro caso la estructura química estable de los aditivos nanolubricantes.

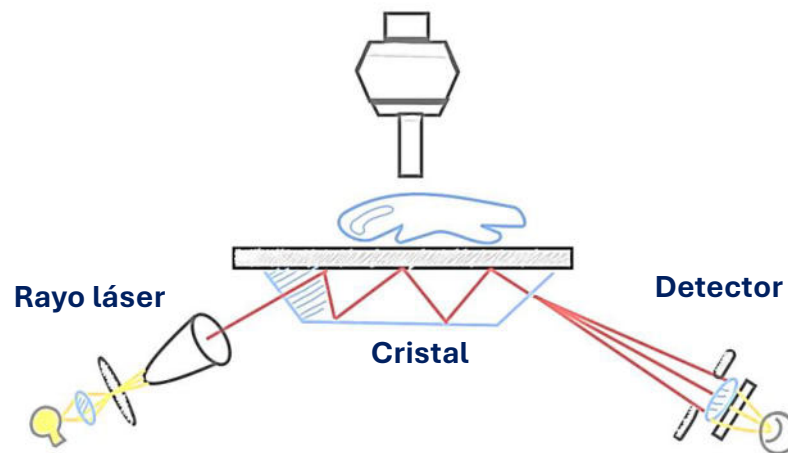


Figura 4.5 Funcionamiento de una maquina IFTR [84].

## CAPITULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Comparación del lubricante a lo largo del Tiempo

Se utilizó el lubricante Sigralub M-40 sin nanoestructuras añadidas, con diluciones de agua en proporciones de 1:5 y 1:10, además de una muestra sin diluir. En agosto de 2022 y febrero de 2023 se llevaron a cabo las pruebas tribológicas con estas bases lubricantes para evaluar los cambios en el desempeño a lo largo del tiempo transcurrido, estos datos se muestran en la Tabla 5.1. Denominamos “BASE 2022” al lubricante sin nanoestructuras probado en 2022 y la “BASE 2023” al lubricante sin nanoestructuras probado 2023.

*Tabla 5.1 Capacidad de carga de las muestras bases 2022 y 2023 con distinta dilución, y porcentaje de comparación entre ellas.*

| Dilución en la muestra | Capacidad de carga BASE 2022 (N/mm <sup>2</sup> ) | Capacidad de carga BASE 2023 (N/mm <sup>2</sup> ) | Desempeño 2023 vs 2022 (%) |
|------------------------|---|---|----------------------------|
| Sin agua               | 4515  | 573   | -87%                       |
| 1:5                    | 4125  | 2150  | -48%                       |
| 1:10                   | 3880  | 2427  | -37%                       |

En la Figura 5.1 se observa que el lubricante base en 2022, en promedio tiene mayor capacidad de carga a comparación del lubricante base en 2023 en cualquiera de las diluciones. Además, en 2022 el lubricante base sin dilución es aquel con mayor capacidad de carga, en contraposición del 2023 donde la base lubricante sin agua obtiene el menor valor, representando un decremento significativo del -87% en su capacidad respecto a 2022 (Tabla 5.1).



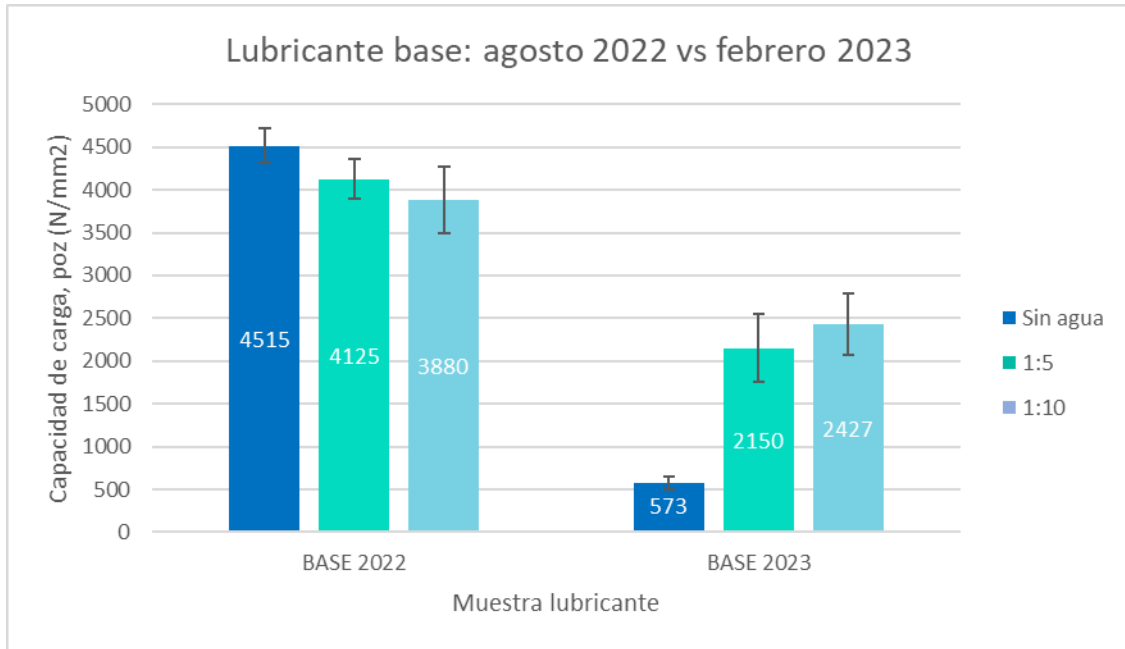


Figura 5.1 Lubricante base en 2022 y 2023. Comparación de la capacidad de carga BASE 2022 y BASE 2023 según la dilución en agua.

Este comportamiento es comprensible, dado que la vida útil de este lubricante es inferior a un año y se mantuvo almacenado a temperatura ambiente. La degradación observada puede atribuirse a la sedimentación y la pérdida de capacidad dispersiva del lubricante durante el almacenamiento, lo que afectó su estabilidad general. En 2022, el lubricante se encontraba en estado óptimo y era compatible con diluciones en agua, aunque su desempeño disminuía a medida que aumentaba la proporción de agua. Para 2023, el lubricante ya había perdido su vida útil. Aunque las diluciones y el tratamiento con ultrasonido mejoraron su fluidez y dispersión, el rendimiento obtenido no se acercó al del lubricante en buenas condiciones.

En la Tabla 5.2, se expone la capacidad de carga máxima soportada por cada muestra elaborada en 2023 a partir del lubricante base del mismo año con nanoestructuras añadidas. Estos valores fueron obtenidos a partir de los diámetros de la cicatriz de desgaste y la presión límite resistida durante la prueba de 4 bolas para cada muestra.

Tabla 5.2 Capacidad de carga máxima en las muestras que utilizan la base 2023 con distintas nanoestructuras y diluciones.

| Capacidad de carga, poz (N/mm <sup>2</sup> ) |                  |          |       |        |          |       |        |
|--|------------------|----------|-------|--------|----------|-------|--------|
| Concentración (wt%)                          |                  | 0.1      |       |        | 0.3      |       |        |
| Tipo de Nanoestructura                       | Dilución de Agua | Sin Agua | 1 a 5 | 1 a 10 | Sin Agua | 1 a 5 | 1 a 10 |
|  |                  | MWCNT-OH | 3981  | 4385   | 4644     | 3145  | 3531   |
| NANOTOROIDE                                  | 3973             | 4282     | 4364  | 3223   | 3556     | 3672  |        |
| MWCNT-COOH                                   | 2840             | 2885     | 3986  | 3376   | 3405     | 3461  |        |
| MWCNT  | 3157             | 3202     | 3725  | 2982   | 3010     | 3977  |        |

## 5.2 Capacidad de carga en muestras sin dilución

En el Figura 5.2, se aprecia que todas las muestras con nanoestructuras añadidas sin dilución superan significativamente la capacidad de carga de la muestra base de 2023, registrando mejoras que oscilan entre un 396% y un 688%, según lo indicado en la Tabla 5.3. Además, entre todas las muestras sin dilución, se destaca que la concentración de 0.1% en peso (wt%) exhibe una capacidad de carga superior en comparación con la concentración de 0.3wt%, a excepción de las muestras a las que se les añadió -COOH.

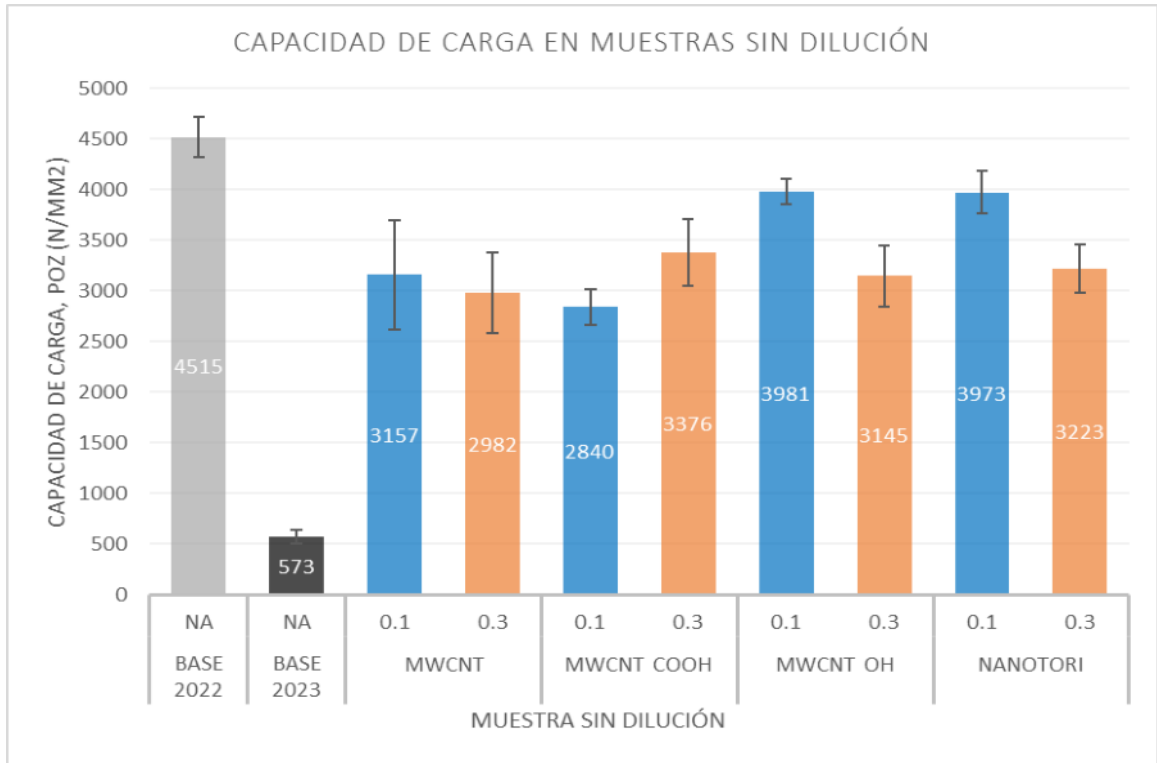


Figura 5.2 Capacidad de carga por muestra sin dilución. Comparación de las muestras lubricantes bases 2022 y 2023 con las muestras 2023 con nanoestructuras añadidas en concentraciones 0.1 y 0.3, todas sin dilución.

Por otro lado, las muestras de 2023 sin dilución que contienen MWCNT OH y Nanotori en concentraciones de 0.1wt% muestran la mejor capacidad de carga, respectivamente. Estas muestras solo tienen 12% menor capacidad de carga con respecto a la muestra base 2022 sin dilución, tal como se refleja en la Tabla 5.3, en términos de capacidad de carga.

Tabla 5.3 Muestras sin dilución: Capacidades de carga y comparación en porcentaje con las bases sin dilución de 2022 y 2023.

| Muestras lubricantes sin dilución |                     |  |                           |                           |
|-----------------------------------|---------------------|--|---------------------------|---------------------------|
| Muestra Lubricante                | Concentración (wt%) | Capacidad de carga, poz (N/mm <sup>2</sup> ) | Comparación con BASE 2023 | Comparación con BASE 2022 |
| BASE 2022                         | NA                  | 4515   | 688%                      | 0%                        |
| BASE 2023                         | NA                  | 573  | 0%                        | -87%                      |

|            |     |      |      |      |
|------------|-----|------|------|------|
| MWCNT      | 0.1 | 3157 | 451% | -30% |
| MWCNT      | 0.3 | 2982 | 420% | -34% |
| MWCNT-COOH | 0.1 | 2840 | 396% | -37% |
| MWCNT-COOH | 0.3 | 3376 | 489% | -25% |
| MWCNT-OH   | 0.1 | 3981 | 595% | -12% |
| MWCNT-OH   | 0.3 | 3145 | 449% | -30% |
| NANOTORI   | 0.1 | 3973 | 593% | -12% |
| NANOTORI   | 0.3 | 3223 | 462% | -29% |

### 5.3 Capacidad de carga en muestras con dilución 1:5

En la Figura 5.3, se observa que todas las muestras con nanoestructuras en concentraciones de 0.1wt% y 0.3wt% superan notablemente la capacidad de carga de la BASE 2023 cuando se diluyen en una proporción de 1:5, con mejoras que varían entre el 34% y el 104%, según se detalla en la Tabla 5.4.

En esta proporción de dilución 1:5, las muestras que sobresalen con los mejores resultados son aquellas a las que se les añadieron MWCNT-OH en una concentración de 0.1wt%, presentando una mejora de la capacidad de carga del 104% Y 6% respecto a las bases de 2023 y 2022 con dilución 1:5, respectivamente. Luego de este, se encuentra la muestra que contienen nanotoroides al 0.1wt% que exhibe solo 103 N/mm<sup>2</sup> menos en la capacidad de carga, lo que las sitúa a estas nanoestructuras en una posición destacada en los resultados.

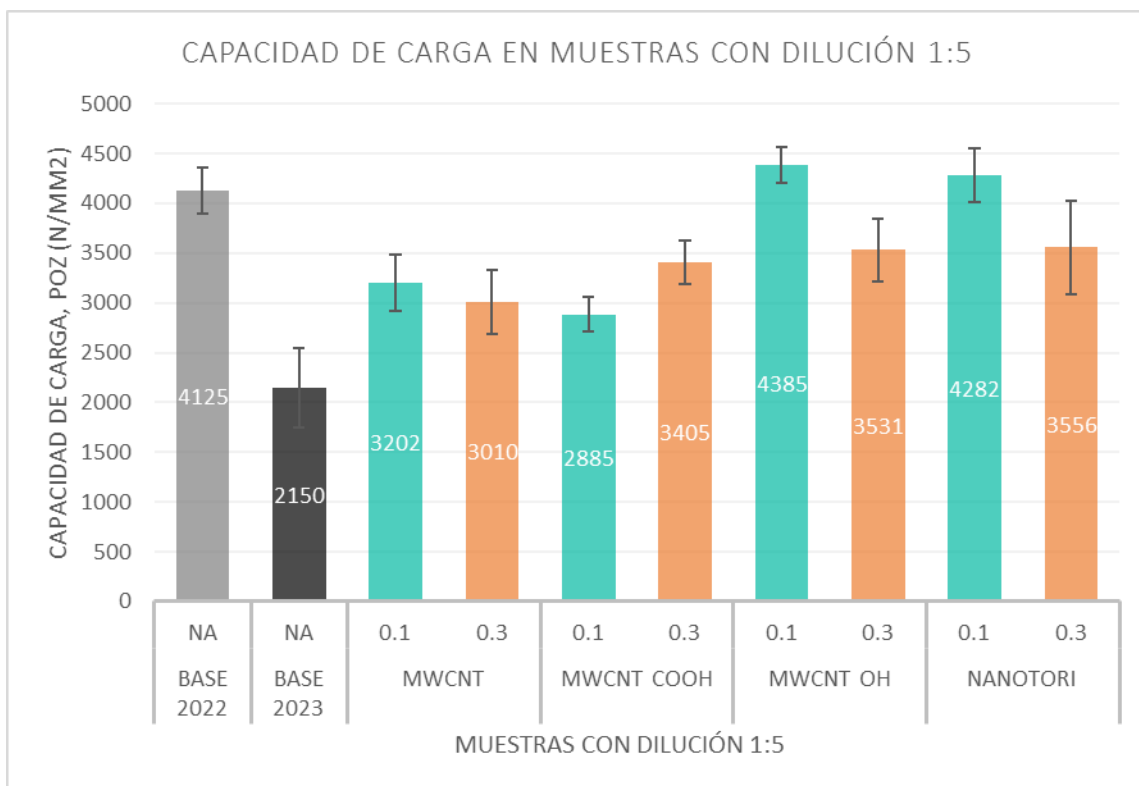


Figura 5.3 Capacidad de carga por muestra con dilución 1:5. Comparación de las muestras lubricantes bases 2022 y 2023 con las muestras con nanoestructuras añadidas en concentraciones 0.1 y 0.3, todas con dilución 1:5.

Tabla 5.4 Muestras con dilución 1:5: Capacidades de carga y comparación en porcentaje con las bases con dilución 1:5 de 2022 y 2023.

| Muestras lubricantes con dilución 1:5 |                     |  |                           |                           |
|---------------------------------------|---------------------|--|---------------------------|---------------------------|
| Muestra Lubricante                    | Concentración (wt%) | Capacidad de carga, poz (N/mm <sup>2</sup> ) | Comparación con BASE 2023 | Comparación con BASE 2022 |
| BASE 2022                             | NA                  | 4125   | 92%                       | 0%                        |
| BASE 2023                             | NA                  | 2150   | 0%                        | -48%                      |
| MWCNT                                 | 0.1                 | 3202   | 49%                       | -22%                      |
| MWCNT                                 | 0.3                 | 3010   | 40%                       | -27%                      |
| MWCNT-COOH                            | 0.1                 | 2885   | 34%                       | -30%                      |
| MWCNT-COOH                            | 0.3                 | 3405   | 58%                       | -17%                      |

|          |     |      |      |      |
|----------|-----|------|------|------|
| MWCNT-OH | 0.1 | 4385 | 104% | 6%   |
| MWCNT-OH | 0.3 | 3531 | 64%  | -14% |
| NANOTORI | 0.1 | 4282 | 99%  | 4%   |
| NANOTORI | 0.3 | 3556 | 65%  | -14% |

#### 5.4 Capacidad de carga en muestras con dilución 1:10

La Figura 5.4, revela que, en la dilución de 1:10, todas las muestras superan los valores de la base 2023, mostrando mejoras que oscilan entre el 51% y el 91%, según se evidencia en la Tabla 6. Además, es importante destacar que, una concentración de nanoestructuras de cada muestra supera la capacidad de carga de la base 2022, mejorándola en un rango que va del 3% al 20%.

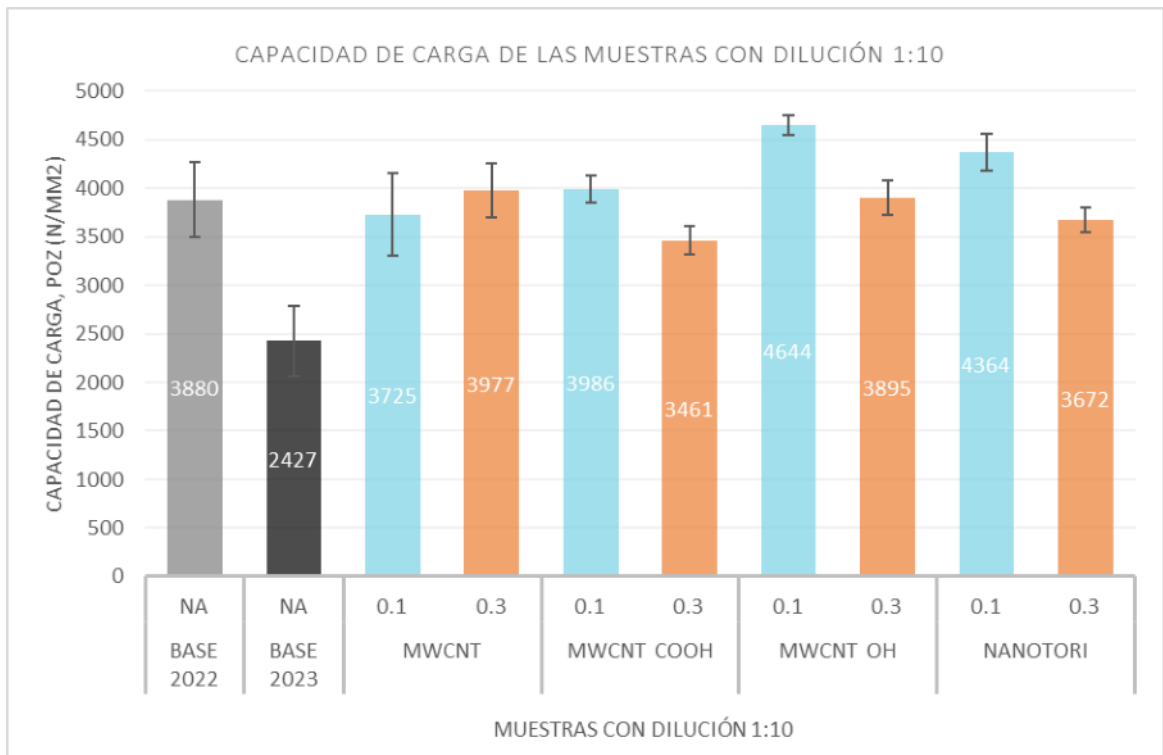


Figura 5.4 Capacidad de carga por muestra con dilución 1:10. Comparación de las muestras lubricantes bases 2022 y 2023 con las muestras con nanoestructuras añadidas en concentraciones 0.1 y 0.3, todas con dilución 1:10.

Entre las muestras analizadas de dilución 1:10, destacan aquellas con una concentración de 0.1wt% de MWCNT-OH, las cuales presentan el rendimiento más sobresaliente, superando la capacidad de carga de las bases 2023 y 2022 en 91% y 20%, respectivamente (ver Tabla 5.5). Seguidamente, la muestra con una concentración de 0.1wt% de nanotori también demuestra mejoras notables, con incrementos del 80% y 12% respecto a dichas bases.

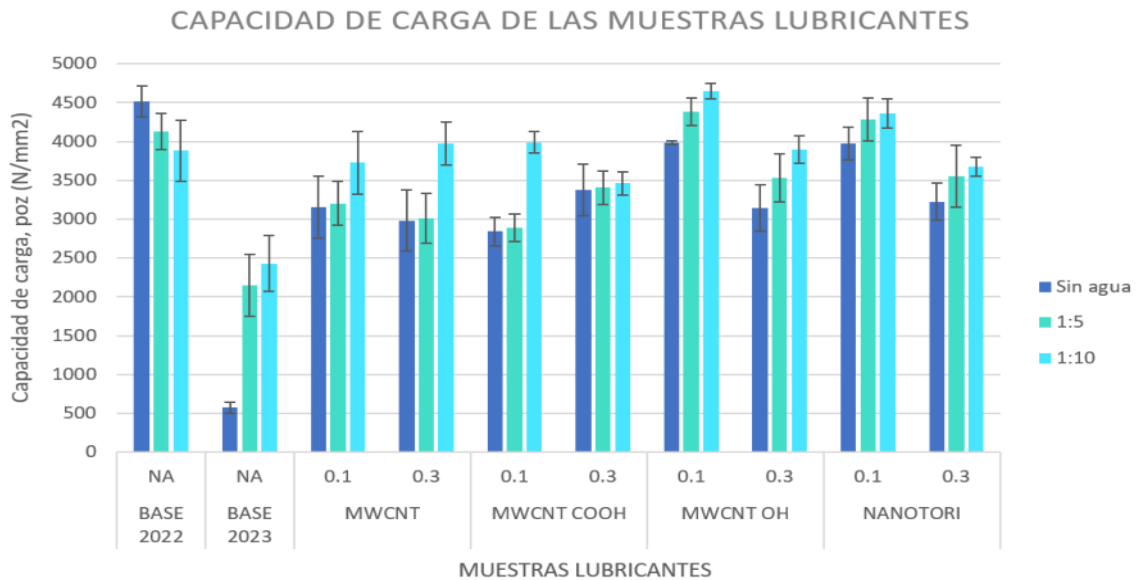
Las mejoras obtenidas concuerdan con las propiedades de los MWCNT funcionalizados, que previenen la aglomeración y mejoran la dispersión en la película lubricante, protegiendo las superficies en contacto y alineándose con los mecanismos tribológicos de estas nanoestructuras, esto será abordado con mayor detalle en la sección 5.6.

*Tabla 5.5 Muestras con dilución 1:10: Capacidades de carga y comparación en porcentaje con las bases con dilución 1:10 de 2022 y 2023.*

| Muestras lubricantes con dilución 1:10 |                     |  |                           |                           |
|--|---------------------|--|---------------------------|---------------------------|
| Muestra Lubricante                     | Concentración (wt%) | Capacidad de carga, poz (N/mm <sup>2</sup> ) | Comparación con BASE 2023 | Comparación con BASE 2022 |
| BASE 2022                              | NA                  | 3880   | 60%                       | 0%                        |
| BASE 2023                              | NA                  | 2427   | 0%                        | -37%                      |
| MWCNT                                  | 0.1                 | 3725   | 53%                       | -4%                       |
| MWCNT                                  | 0.3                 | 3977   | 64%                       | 3%                        |
| MWCNT-COOH                             | 0.1                 | 3986   | 64%                       | 3%                        |
| MWCNT-COOH                             | 0.3                 | 3461   | 43%                       | -11%                      |
| MWCNT-OH                               | 0.1                 | 4644   | 91%                       | 20%                       |
| MWCNT-OH                               | 0.3                 | 3895   | 60%                       | 0%                        |
| NANOTORI                               | 0.1                 | 4364   | 80%                       | 12%                       |
| NANOTORI                               | 0.3                 | 3672   | 51%                       | -5%                       |

En la Figura 5.5 es notable que todas las muestras con nanoestructuras añadidas, independientemente de su concentración y nivel de dilución, superan la capacidad de carga de la muestra base 2023 sin dilución.

En los tres niveles de dilución estudiados (1:5, 1:10 y sin diluir), las muestras lubricantes con nanoestructuras superan la capacidad de carga de la base 2023 en todas sus respectivas condiciones de dilución.



*Figura 5.5 Capacidad de carga en todas las muestras. Comparación de las muestras lubricantes bases 2022 y 2023 con todas las muestras con nanoestructuras añadidas en concentraciones 0.1 y 0.3, y en condiciones de dilución (sin diluir, dilución 1:5 y dilución 1:10)*

Para cada muestra con nanoestructura añadida, se observa un patrón de mejora creciente en la capacidad de carga con el aumento de dilución, siendo la proporción 1:10 la más favorable en cada muestra. En contraposición, la condición sin diluir muestra el menor efecto de mejora en la capacidad de carga.

Destacando sobre todas las demás, las muestras con MWCNT-OH con una concentración del 0.1 wt% en sus tres niveles de dilución (1:5, 1:10 y sin diluir) superan a todas las demás en capacidad de carga.



La muestra base 2022 en diluciones de 1:5 y 1:10 es superada solo por las muestras con MWCNT-OH y nanotori al 0.1 wt%, logrando capacidades de carga superiores en sus respectivas diluciones.

La única muestra que supera a la muestra base lubricante 2022 original sin dilución, es la muestra con MWCNT-OH al 0.1% en dilución 1:10.

### **5.5 Impacto general en la capacidad de carga según la nanoestructura, concentración y dilución**

A continuación, presentamos las gráficas de comparación general de las muestras lubricantes, con respecto a su nanoestructura correspondiente, a las concentraciones 0.1 y 0.3 wt% y a las diluciones 1:5, 1:10 y sin dilución.

En la Figura 5.6, se aprecia que las muestras con nanoestructuras añadidas superan en capacidad de carga a la base 2023. Las muestras lubricantes con MWCNT-OH destacan al mostrar, en promedio, una mayor capacidad de carga en comparación con las demás. En contraste, las muestras con -COOH presentan los menores resultados.

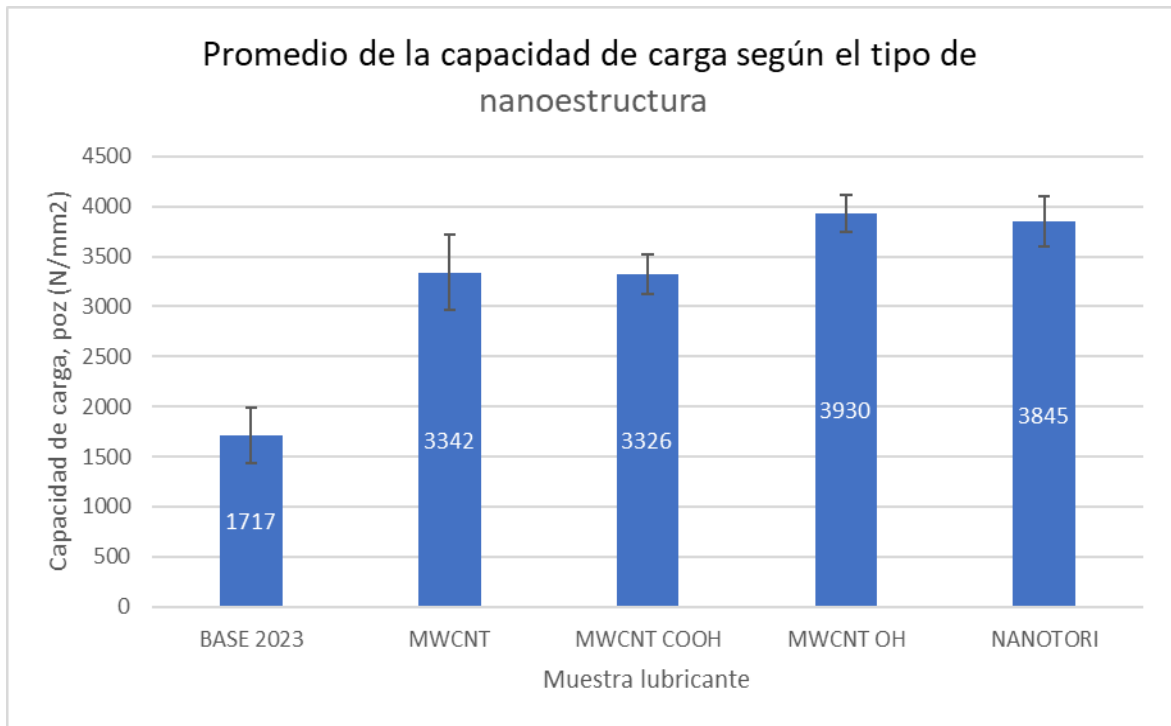
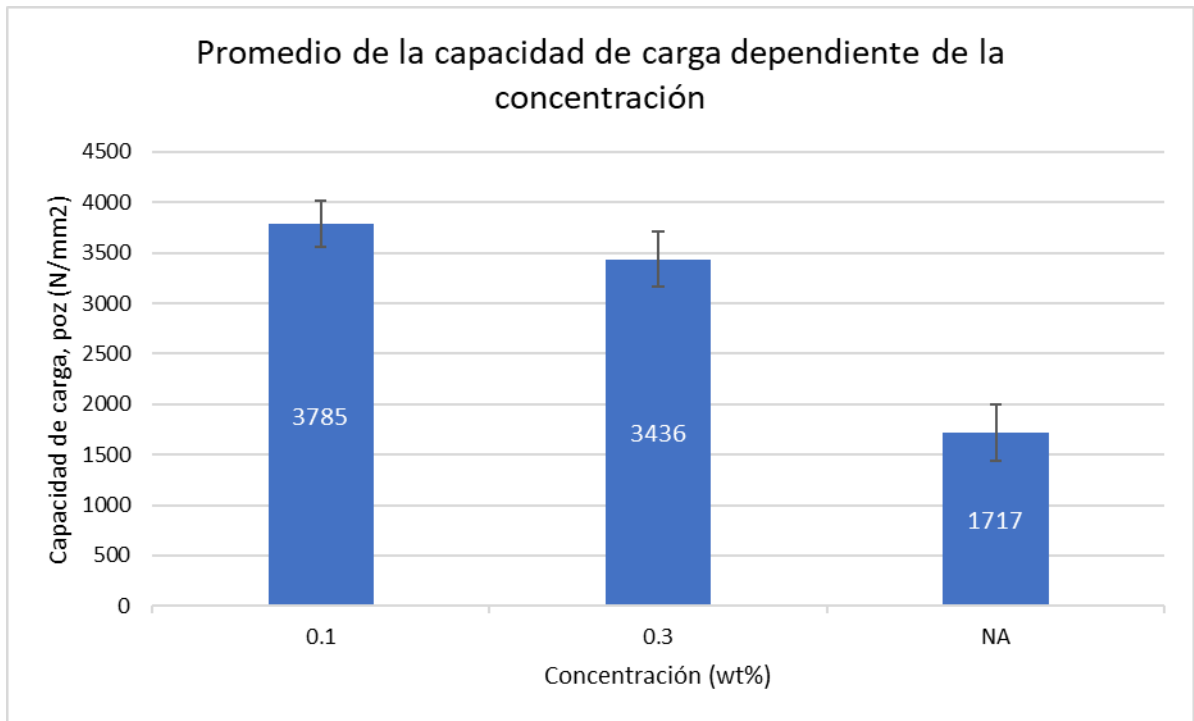


Figura 5.6 Capacidad de carga promedio por muestra lubricante. Comparación general de la capacidad de carga promedio por cada muestra lubricante con nanoestructuras y la muestra lubricante base 2023.

De la Figura 5.7 se desprende que, en general, la concentración de 0.1 wt% en las muestras es la que obtiene los mayores valores promedio de capacidad de carga. Además, ambas concentraciones de nanoestructuras (0.1wt% y 0.3wt%) logran resultados de capacidad de carga superiores a los de las muestras base sin ningún añadido.



*Figura 5.7 Capacidad de carga promedio por concentración. Comparación general de la capacidad de carga promedio por cantidad de concentración de nanoestructuras.*

De la Figura 5.8 se visualiza que las muestras lubricantes con dilución 1:10 obtienen los valores promedio más altos de capacidad de carga. Estas son seguidas por las muestras con dilución 1:5, que muestran una capacidad de carga menor pero aún significativa. Finalmente, las muestras sin diluir presentan la menor capacidad de carga promedio.

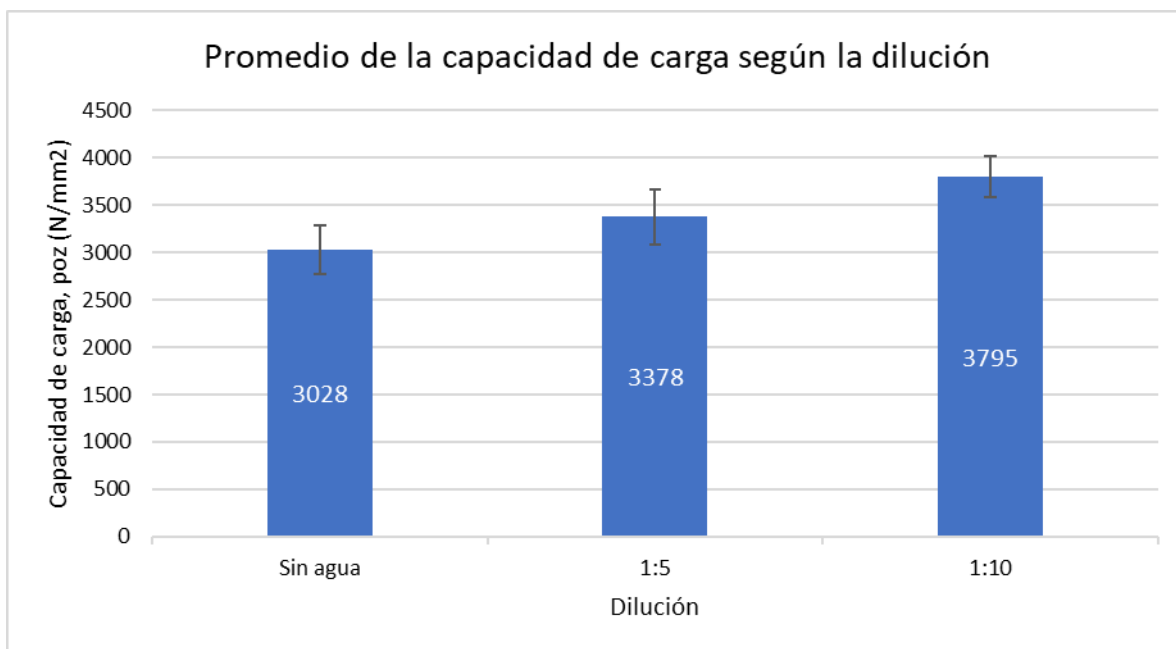


Figura 5.8 Capacidad de carga promedio por dilución. Comparación general de la capacidad de carga promedio con la proporción de dilución presente en las muestras lubricantes de 2023.

En la Tabla 5.6 se encuentran los datos de los 10 nanolubricantes que lograron los mejores resultados en capacidad de carga durante la prueba de 4 bolas.

Tabla 5.6 Lista de las 10 primeras muestras lubricantes con los mejores valores de capacidad de carga y su porcentaje de comparación respecto a los lubricantes base sin dilución 2022 y 2023.


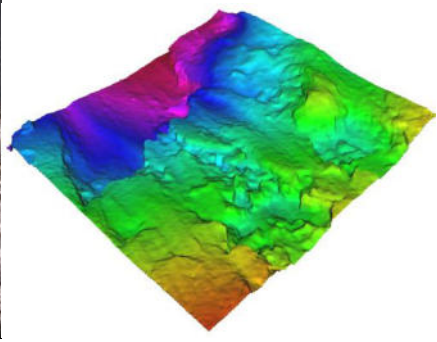
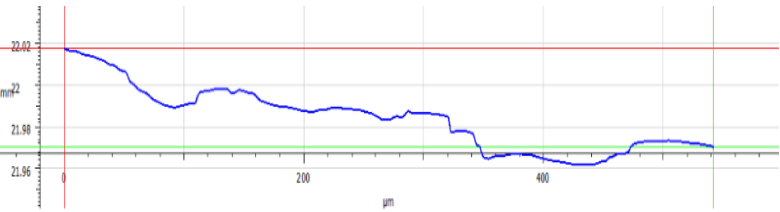

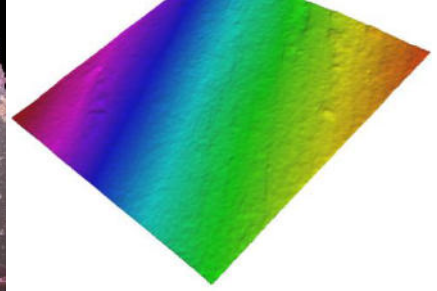
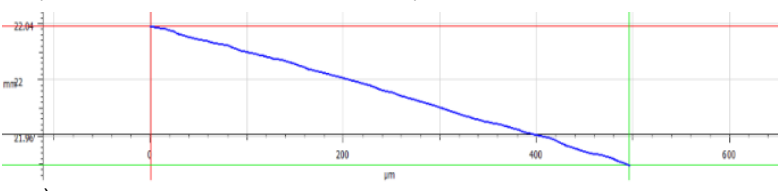
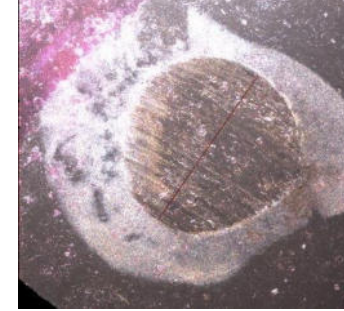
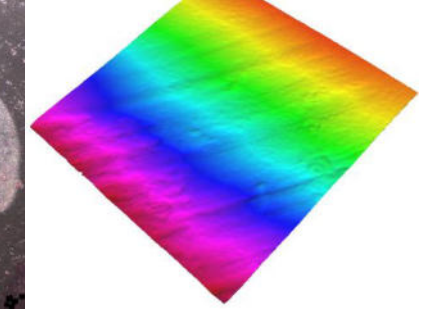
| N° | Muestra Lubricante | Concentración (wt%) | Dilución | Capacidad de carga, poz (N/mm <sup>2</sup> ) | Comparación con BASE 2023 sin dilución | Comparación con BASE 2022 sin dilución |
|----|--------------------|---------------------|----------|--|--|--|
| 1  | MWCNT OH           | 0.1                 | 1:10     | 4644   | 710%                                   | 3%                                     |
| 2  | MWCNT OH           | 0.1                 | 1:5      | 4385   | 665%                                   | -3%                                    |
| 3  | NANOTORI           | 0.1                 | 1:10     | 4364   | 662%                                   | -3%                                    |
| 4  | NANOTORI           | 0.1                 | 1:5      | 4282   | 647%                                   | -5%                                    |
| 5  | MWCNT COOH         | 0.1                 | 1:10     | 3986   | 596%                                   | -12%                                   |
| 6  | MWCNT OH           | 0.1                 | Sin agua | 3981   | 595%                                   | -12%                                   |
| 7  | MWCNT              | 0.3                 | 1:10     | 3977   | 594%                                   | -12%                                   |

|    |          |     |          |      |      |      |
|----|----------|-----|----------|------|------|------|
| 8  | NANOTORI | 0.1 | Sin agua | 3973 | 593% | -12% |
| 9  | MWCNT OH | 0.3 | 1:10     | 3895 | 580% | -14% |
| 10 | MWCNT    | 0.1 | 1:10     | 3725 | 550% | -17% |

En la Tabla 5.7 se presentan imágenes perfilométricas de las cicatrices de desgaste en los balines de acero, correspondientes a la base lubricante 2023 sin dilución y a las 10 muestras de nanolubricantes con los valores más altos de capacidad de carga. En estas imágenes, se observan los mecanismos de desgaste adhesivo y abrasivo. En las muestras de nanolubricantes, el desgaste adhesivo se evidencia por la transferencia de material en los puntos de contacto entre los balines, donde se generó el efecto de "soldadura" o "barrido". Las marcas de desgaste en forma de estrías o rayas uniformemente distribuidas indican la presencia leve de desgaste abrasivo de dos cuerpos. A medida que este desgaste se intensifica, aparecen cavidades irregulares o pozos, producto de la penetración de asperezas y partículas residuales en la superficie del balín durante la prueba. La muestra de la base lubricante 2023, por su parte, presenta el mayor nivel de desgaste abrasivo, lo cual se refleja en su elevado valor de rugosidad y en el perfil de profundidad del desgaste, coincidiendo con su baja capacidad de carga.

*Tabla 5.7 Datos de rugosidad e imágenes por perfilómetro de las cicatrices de desgaste formadas en balines de acero después de la prueba de 4 bolas para la muestra lubricante BASE 2023 y las muestras contenidas en la tabla 4. a) Incremento con lente x10, b) Incremento con lente x50, c) Gráfica que describe la forma y profundidad del desgaste.*

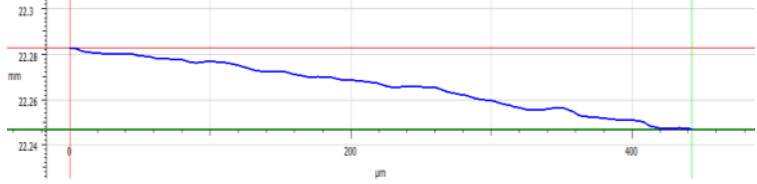

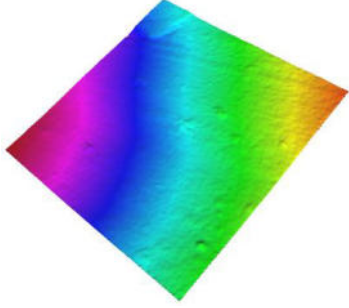

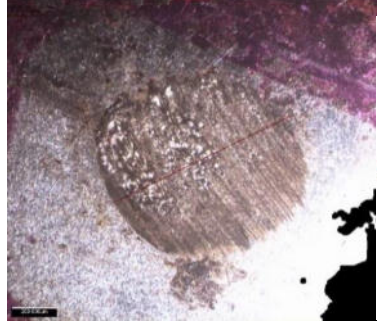
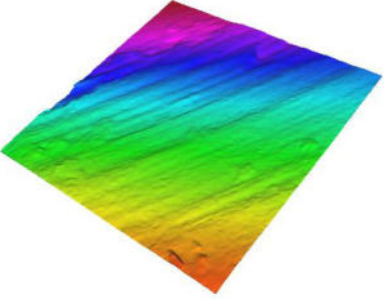
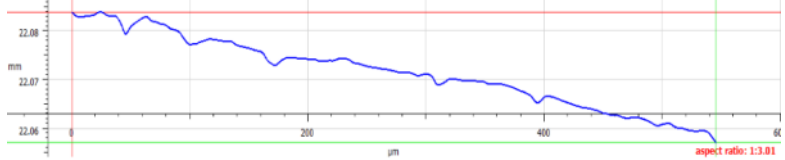
|                    |                                       |  |
|--------------------|---------------------------------------|--|
| Muestra lubricante | Promedio Rugosidad (Ra) $\mu\text{m}$ | Cicatriz de desgaste en balines de acero |
|--------------------|---------------------------------------|--|

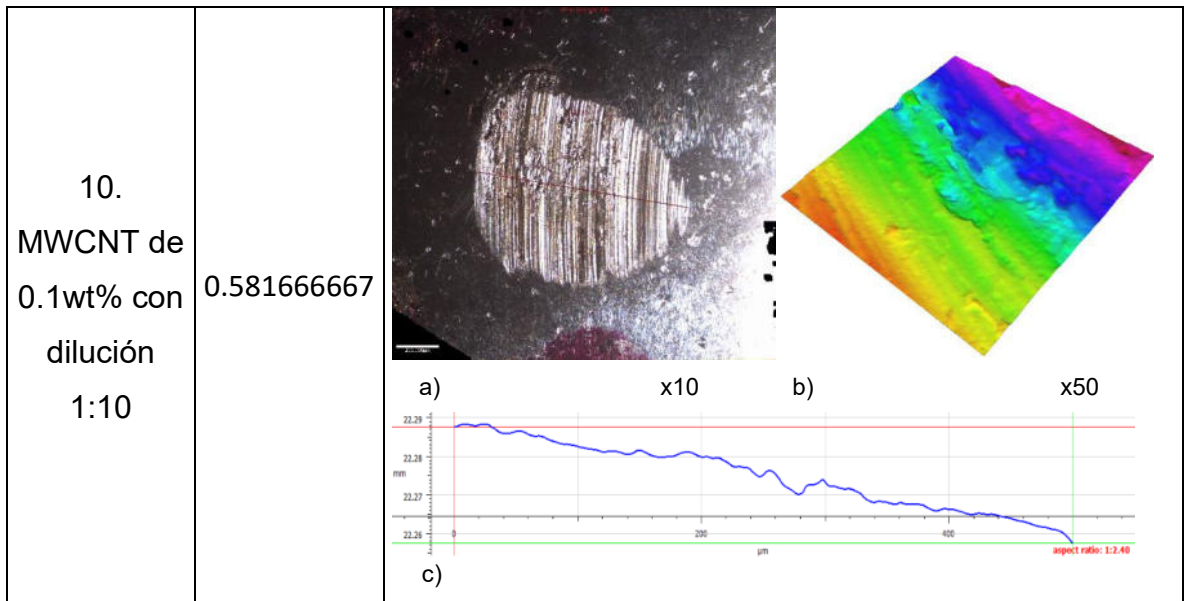
|   |              |   |
|---|--------------|---|
| <p>BASE 2023<br/>SIN<br/>DILUCIÓN</p>                           | <p>2.614</p> |    <p>a) x10      b) x50</p> <p>c)</p>     |
| <p>1. MWCNT-<br/>OH de<br/>0.1wt% con<br/>dilución<br/>1:10</p> | <p>0.369</p> |    <p>a) x10      b) x50</p> <p>c)</p> |
| <p>2. MWCNT-<br/>OH de<br/>0.1wt% con<br/>dilución 1:5</p>      | <p>0.459</p> |   <p>a) x10      b) x50</p>  |

|  |              |                                     |
|--|--------------|-------------------------------------|
|  |              | <p>c)</p>                           |
| <p>3.<br/>NANOTORI<br/>de 0.1wt%<br/>con<br/>dilución<br/>1:10</p> | <p>0.470</p> | <p>a) x10      b) x50</p> <p>c)</p> |
| <p>4.<br/>NANOTORI<br/>de 0.1wt%<br/>con dilución<br/>1:5</p>      | <p>0.485</p> | <p>a) x10      b) x50</p> <p>c)</p> |

|  |              |  |
|--|--------------|--|
| <p>5. MWCNT-COOH de 0.1wt% con dilución 1:10</p> | <p>0.549</p> |  |
| <p>6. MWCNT-OH de 0.1wt%</p>                     | <p>0.571</p> |  |
| <p>7. MWCNT-de 0.3wt% con dilución 1:10</p>      | <p>0.475</p> |  |



|   |       |   |
|---|-------|---|
|   |       |  <p>c)</p>  |
| 8. NANOTORI de 0.1wt%                   | 0.377 |  <p>a) x10</p>  <p>b) x50</p>  <p>c)</p>      |
| 9. MWCNT-OH de 0.3wt% con dilución 1:10 | 0.474 |  <p>a) x10</p>  <p>b) x50</p>  <p>c)</p> |



### Análisis espectroscópico de IR

En el estudio de espectroscopía infrarroja (IR) aplicado a MWCNT funcionalizados y no funcionalizados con 0.1wt% de nanoestructuras (nanotori, MWCNT-OH, MWCNT-COOH) en tres diferentes diluciones, se ha identificado varias bandas características que confirman la presencia de grupos funcionales específicos en las muestras nanolubricadas, demostrando su incorporación efectiva, tal y como se observa en las figuras 5.9 a 5.12.

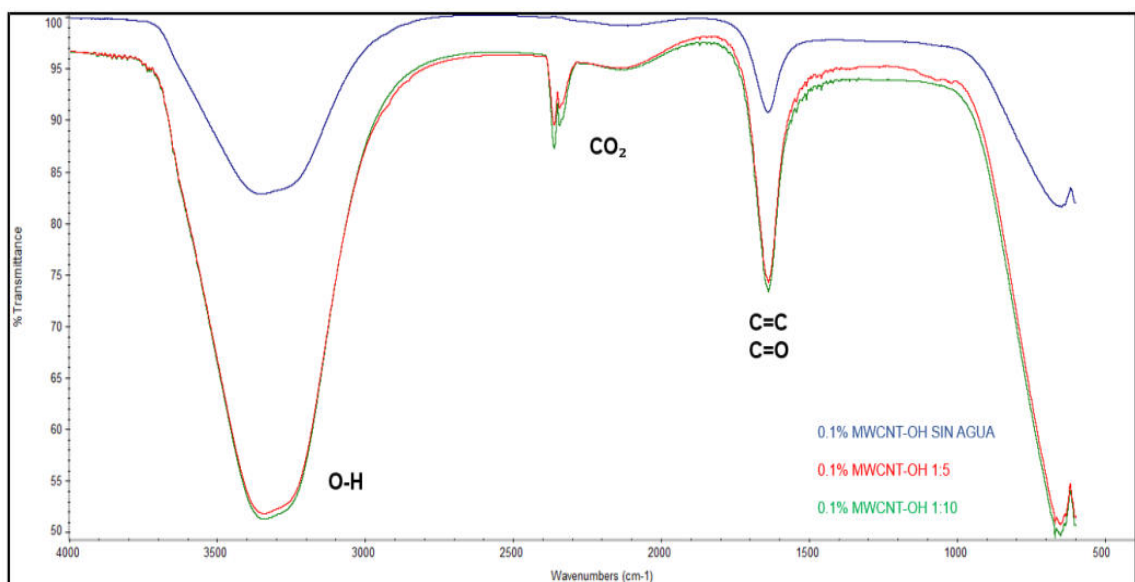


Figura 5.9 Espectro IR del nanolubricante con 0.1 wt% MWCNT-OH en diluciones de agua

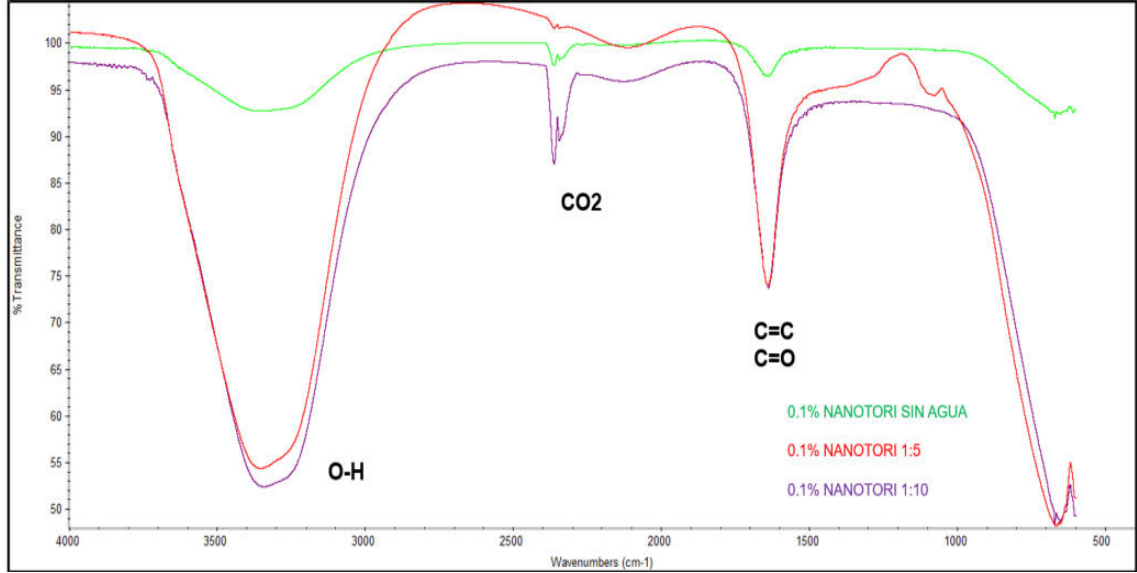


Figura 5.10 Espectro IR del nanolubricante con 0.1 wt% NANOTORI en diluciones de agua

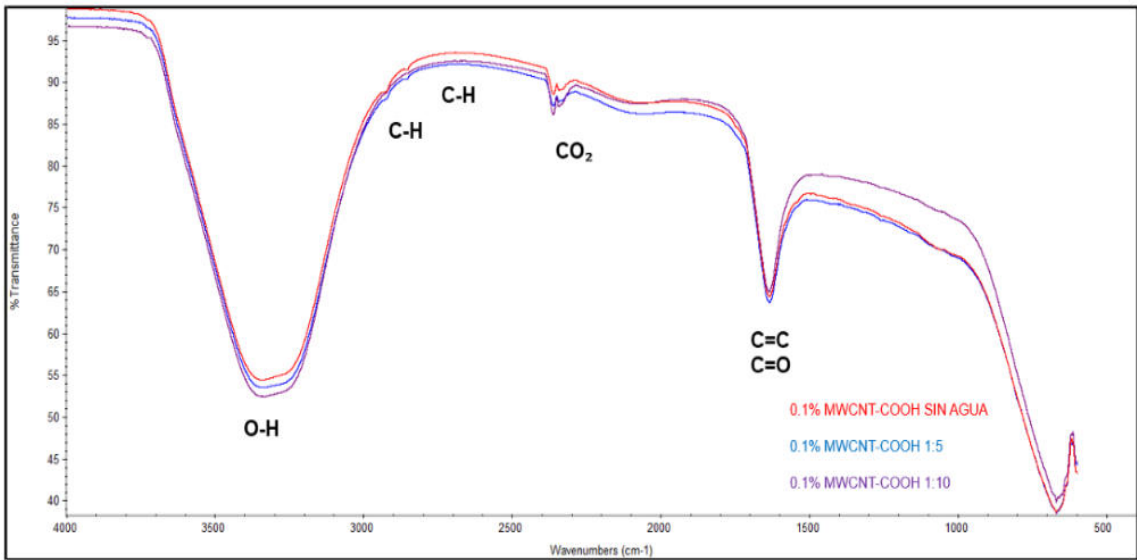


Figura 5.11 Espectro IR del nanolubricante con 0.1 wt% MWCNT-COOH en diluciones de agua

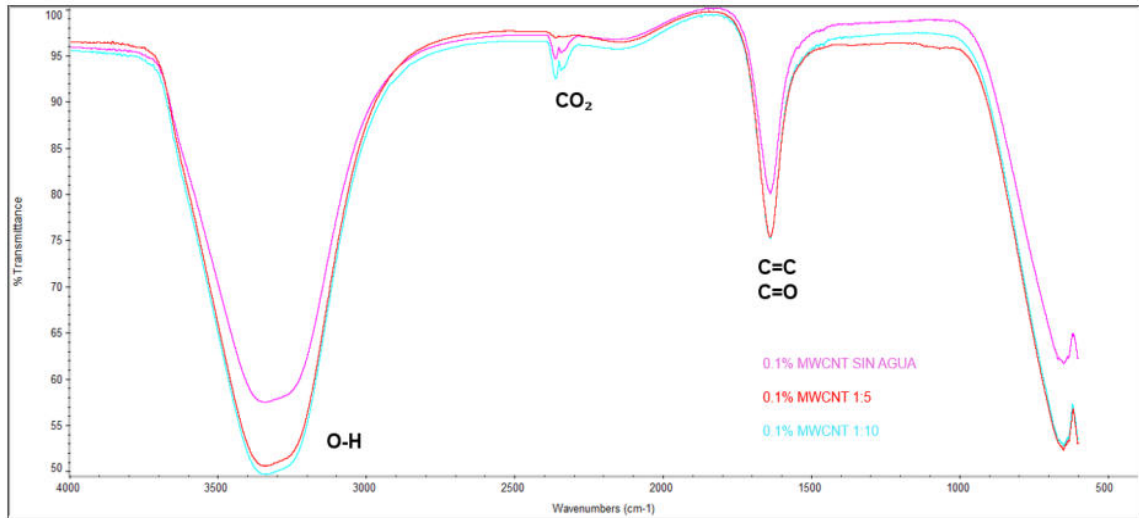


Figura 5.12 Espectro IR del nanolubricante con 0.1 wt% MWCNT en diluciones de agua

Región de 3200-3600  $\text{cm}^{-1}$ : Se observa una banda ancha que resulta del estiramiento vibracional del grupo OH. La formación de este grupo puede ocurrir por la absorción de grupo hidroxilo derivado de la interacción del ácido con la superficie de los MWCNT durante el tratamiento químico, así también como por la captación de agua, típico en procesos de oxidación y funcionalización [85].

Región de 1650-1750  $\text{cm}^{-1}$ : Presenta una banda indicativa de grupos carbonilo que puede incluir cetonas, aldehídos y con mayor probabilidad ácidos carboxílicos. Estos grupos se introducen comúnmente durante la funcionalización y son importantes en la reactividad y compatibilidad de los nanomateriales.

Región de 1600-1680  $\text{cm}^{-1}$ : Presencia de enlaces dobles carbono-carbono, los cuales reflejan la estructura gráfica propia de los nanotubos y nanotori. Esta característica es crucial para la conductividad y resistencia mecánica en procesos de fricción y desgaste.

Región cerca de 667  $\text{cm}^{-1}$ : La banda en esta zona sugiere la presencia de dióxido de carbono en la muestra, probablemente introducido desde el entorno (aire) durante la medición, se considera parte de la contaminación del ambiente, aun así, no afecta la detección de los demás enlaces.

## 5.6 DISCUSIÓN

Durante la prueba tribológica de 4 bolas observamos que todas las muestras diluidas de 2023 exhiben un rendimiento superior en comparación a las no diluidas del mismo año. Esto se atribuye a la mejora parcial en la dispersión del lubricante por efecto de la dilución con agua y tratamiento de ultrasonido que induce a la cavitación generando microburbujas y ondas de choque que pueden romper algunas conglomeraciones, facilitando la redistribución de partículas sedimentadas <sup>[86]</sup>.

La prueba tribológica de 4 bolas también reveló que las muestras que contenían nanolubricantes mejoraron notablemente su capacidad de carga en comparación con las bases lubricantes de 2023, que no contenían estos aditivos. Las imágenes y gráficas perfilométricas de las muestras con nanolubricantes mostraron un predominio de desgaste adhesivo leve, evidenciado por estrías distribuidas uniformemente en los puntos de contacto, en contraste con el alto desgaste abrasivo presentado en las muestras sin nanoaditivos. Esto sugiere que las nanoestructuras ayudaron a redistribuir las fuerzas, reduciendo el desgaste en la película lubricante. Todo esto, se debe a los mecanismos tribológicos involucrados durante la prueba:

- Reducción del desgaste: La incorporación de MWCNT actúa como refuerzo estructural, al formar una capa protectora sobre las superficies metálicas y disminuyendo la tasa del desgaste.
- Mejora de lubricación: La estructura de forma tubular de los MWCNT permite tener mayor área superficial que ayuda a retener el lubricante en zonas de contacto, estableciendo una especie de película lubricante resistente y prolongada. Esto es importante para mantener las superficies separadas minimizando la fricción entre ellas <sup>[87]</sup>.
- Resistencia a altas presiones: Los MWCNT robustecen a la película lubricante que forman dada su alta resistencia, manteniéndola intacta bajo grandes presiones <sup>[57]</sup>.

La aglomeración de MWCNT debido a las fuerzas de Van Der Waals disminuye su efectividad como aditivo, por lo tanto, se opta por la funcionalización de estos para mejorar significativamente las propiedades y mecanismos tribológicos en el lubricante. Al funcionalizar con grupos -OH Y -COOH mejoramos su compatibilidad con la base lubricante, mejorando su dispersión y estabilidad. La polaridad que se adquiere en la funcionalización de estos grupos es la que facilita la formación de una película uniforme y estable [61, 88].

Desde un punto de vista mecánico, los MWCNT actúan como rodillos microscópicos entre superficies metálicas en contacto dentro de un lubricante, lo cual reduce la fricción metal-metal al mantenerlas separadas y permitir un movimiento fluido. Por otro lado, los MWCNT funcionalizados además de actuar como rodillos también ofrecen una capacidad adicional de adhesión a las superficies, similar a un efecto velcro. Esto les permite la posibilidad de anclarse en las microasperezas de las superficies metálicas, dando una protección superior contra el desgaste. Esta adhesión es el resultado de las ramificaciones de los grupos funcionales a lo largo del nanotubo, ayudando a mantenerlo en su lugar y formando la película lubricante estable y duradera [89].

Respecto al mecanismo tribológico del nanotori, está ligado a su forma toroidal y propiedades mecánicas, similar a una rueda microscópica, proporciona un mecanismo de rodamiento y deslizamiento bajo condiciones de desgaste, contribuyendo a la reducción de la fricción [67]. No obstante, la aglomeración por exceso de concentración puede hacerse presente, por lo cual se requiere optimizar las concentraciones utilizadas y el método de dispersión.

## CAPITULO 6. CONCLUSIONES

El almacenamiento del lubricante Sigalub M-40 durante un período prolongado de más de 6 meses a temperatura ambiente (5-22°C) resultó en una pérdida sustancial de su capacidad de carga, disminuyéndola en un 87%. Este deterioro se evidenció con la sedimentación presente en el lubricante. Sin embargo, se mostró que la introducción de nanoestructuras de carbono y diluciones en agua ayudaron a revertir en gran medida este deterioro. Dichas mejoras oscilaron entre un 420% y 688% en las muestras sin dilución, de 34% a 104% con dilución 1:5 y de 43% a 91% con dilución 1:10.

Las muestras que contenían nanoestructuras MWCNT-OH demostraron los valores más altos de capacidad de carga promedio. En particular, las muestras con concentración de 0.1wt% de MWCNT-OH destacaron su efectividad, registrando mejoras del 688% sin dilución, 104% dilución 1:5, 91% dilución 1:10, respecto a las bases de 2023. Resultados similares son exhibidos por las muestras añadidas con nanotori.

En las muestras estudiadas, la concentración de 0.1wt% de nanoestructuras en promedio general resultó mejor que la de 0.3wt%. En cuanto a la dilución, encontramos que las muestras diluidas de 1:10 demostraron ser una elección eficiente. No solo conservando una capacidad de carga igual o superior a las muestras no diluidas, sino que también utilizando menos material lubricante. Esta eficiencia apunta a una estrategia para disminuir la toxicidad del lubricante sin sacrificar su rendimiento.

Cada nanoestructura analizada mejoró el rendimiento del lubricante base 2023, alargando su vida útil gracias a sus mecanismos de acción tribológicos durante las pruebas. Los MWCNT actuaron como rodillos microscópicos, reduciendo la fricción. Los MWCNT funcionalizados con grupos OH y COOH añadieron propiedades de adhesión, similar a un efecto velcro, potenciando los resultados. Por otro lado, los nanotoroides proporcionaron un efecto deslizante de

rodamiento. Las gráficas obtenidas por espectroscopía infrarroja (IR) confirmaron la presencia de grupos funcionales específicos que mejoran la dispersión de las nanoestructuras en el lubricante, contribuyendo así a su eficacia.

Los resultados de esta investigación resaltan el potencial de las nanoestructuras y las diluciones para mejorar la capacidad de carga y el rendimiento del lubricante Sigralub M-40. Estos hallazgos tienen implicaciones importantes en la industria, abriendo camino hacia una lubricación más efectiva y sostenible.



## REFERENCIAS

1. Industria, valor agregado (% de crecimiento anual) | Data, <https://datos.bancomundial.org/indicador/NV.IND.TOTL.KD.ZG?end=2021&start=2014>
2. Industrialización, valor agregado (% del PIB) | Data, <https://datos.bancomundial.org/indicador/NV.IND.MANF.ZS?end=2021&start=2013&view=chart>
3. Crecimiento de la población (% anual) | Data, [https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.GROW?display=default&3fcid3dext\\_fbwbar\\_d\\_ext&start=2015](https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.GROW?display=default&3fcid3dext_fbwbar_d_ext&start=2015)
4. Actividad industrial. Estadística Mensual de la Industria Minerometalúrgica. EMIM; Encuesta Nacional de Empresas Constructoras. ENEC; Encuesta Mensual de la Industria Manufacturera. EMIM; Cuentas de bienes y servicios del Sistema de Cuentas Nacionales de Mexico,
5. México - Índice de Producción Industrial 2022 | Datosmacro.com, <https://datosmacro.expansion.com/negocios/produccion-industrial/mexico>
6. Crecimiento de la población (% anual) - Mexico | Data, <https://datos.bancomundial.org/indicador/sp.pop.grow?locations=MX&start=2020>
7. DATA NUEVO LEÓN | Datos económicos de Nuevo León, <http://datos.nl.gob.mx/>
8. Conociendo México 01 800 111 46 34 • [www.inegi.org.mx](http://www.inegi.org.mx) • [atencion.usuarios@inegi.org.mx](mailto:atencion.usuarios@inegi.org.mx) @ INEGI\_INFORMA INEGI Informa.
9. Universidad Nacional de Colombia., M.C., Guerrero Figueroa, J.T., Quintero, A. del P. (2010). Revista Colombiana de biotecnología. Universidad Nacional de Colombia

10. Gonzales Canal, I., Gonzales Ubierna, J.A. (2015). ACEITES USADOS DE COCINA. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL, INCIDENCIAS EN REDES DE SANEAMIENTO Y COSTE DEL TRATAMIENTO EN DEPURADORAS.
11. Tovar Sifuentes, E. (2019). Tribological properties of lubricants with carbon nanoparticles (nanotori) and several additives. Tesis de Maestría. , Nuevo León
12. Peña-Parás, L., Maldonado-Cortés, D., Kharissova, O. V., Saldívar, K.I., Contreras, L., Arquieta, P., Castaños, B. (2019). Novel carbon nanotori additives for lubricants with superior anti-wear and extreme pressure properties. *Tribology International*, 131, 488–495.
13. Ciulli, E. (2019). Tribology and Industry: From the Origins to 4.0. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 5, 55.
14. Hamada, N., Sawada, S.I., Oshiyama, A. (1992). New one-dimensional conductors: Graphitic microtubules. *Physical Review Letters*, 68, 1579.
15. Sifuentes, E.T., Kharissova, O. V., Maldonado-Cortés, D., Peña-Parás, L., Michalczewski, R., Kharisov, B.I. (2021). A comparison of tribological properties of nanolubricants containing carbon nanotori and additional additives. *Materials Chemistry and Physics*, 272,
16. Dowson, D. (1998) *History of Tribology*. 2nd Edn. London and Bury St Edmunds: Professional Engineering Publishing Limited.
17. Modern tribology handbook: Volume one: Principles of tribology | Request PDF, [https://www.researchgate.net/publication/329323123\\_Modern\\_tribology\\_handbook\\_Volume\\_one\\_Principles\\_of\\_tribology](https://www.researchgate.net/publication/329323123_Modern_tribology_handbook_Volume_one_Principles_of_tribology)
18. Ali, I., Basheer, A.A., Kucherova, A., Memetov, N., Pasko, T., Ovchinnikov, K., Pershin, V., Kuznetsov, D., Galunin, E., Grachev, V., Tkachev, A. (2019). Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers. *Journal of Molecular Liquids*, 279, 251–266.

19. Varshney, K. Carbon Nanotubes: A Review on Synthesis, Properties and Applications. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 2,
20. Wu, Y., Dong, C., Yuan, C., Bai, X., Zhang, L., Tian, Y. (2021). MWCNTs filled high-density polyethylene composites to improve tribological performance. *Wear*, 477,
21. Arqueta Guillén, P. (2019). Caracterización y aplicación de sistemas multifuncionales a base de nanotubos de carbono. Tesis de doctorado.
22. Kharissova, O. V, Arqueta, P., Maldonado, D. (2019). Síntesis y aplicación tribológica de nanoestructuras a base de carbono tridimensionales.
23. Taha-Tijerina, J.J., Martínez, J.M., Euresti, D., Arqueta-Guillén, P.Y. (2022). Carbon Nanotube Reinforced Lubricants in Plastic Deformation Processes. *Lubricants*, 10,
24. Alam, M.S. (2021). Industrial tribology in the past, present and future: a review. *Material Science & Engineering International Journal*, 5,
25. Jost, H. P. (1966). *Lubrication (Tribology) Education and Research, A Report on the Present Position and Industry's Needs*. London: Her Majesty's Stationary Office, Department of Education and Science.
26. WIMMER, M., the, M.L.-S. of, 2019, undefined (2020). Tribology of the artificial hip. *eu-ireland-custom-media-prod.s3 ...*, 37–52.
27. Stachowiak, G.W. (Gwidon W.), Batchelor, A.W. (Andrew W.) *Tribology of polymers in Engineering tribology*. 883.
28. Nazare, M.I., Paleu, V., Bhaumik, S., Ianuș, G., Olaru, D.N. (2018). Performances of automotive lubricants – tests on four ball machine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 444, 022013.

29. Anchal Singh, R.K. Mondloi (2018). A Review Study of Tribological Parameters of Used Engine Oil. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 05, 2395–0056.
30. Delprete, C., Razavykia, A. Piston dynamics, lubrication and tribological performance evaluation: A review, (2020).
31. Ali, I., Basheer, A.A., Kucherova, A., Memetov, N., Pasko, T., Ovchinnikov, K., Pershin, V., Kuznetsov, D., Galunin, E., Grachev, V., Tkachev, A. Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers, (2019).
32. Young, H., Freedman, R. (2013). *Leyes del movimiento de Newton*. In: *Física Universitaria*. p. 147. PERSON, México
33. Figueroa, M. *Diseño Mecánico Integral y Manufactura de los Componentes Mecánicos*, (2009).
34. Janahmadov, A.K., Javadov, M. (2019). General Laws of Friction and Wear of Polymers. 25–48.
35. Vera-Cardenas, E.E., Zamora-Campos, L.A. (2018). Desarrollo mecatrónico de prototipo para pruebas de desgaste. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 19, 307–322.
36. Marques, F., Flores, P., Claro, J.C.P., Lankarani, H.M. (2019). Modeling and analysis of friction including rolling effects in multibody dynamics: a review. *Multibody System Dynamics*, 45, 223–244.
37. Hidirov, S. (2020). *FUNDAMENTALS OF TRIBOLOGY*.
38. Barral Becerra, R.S. Prototipo de Tribómetro Anillo sobre Bloque para Obtención de Curvas de Fricción, (2014).
39. Swain, B., Bhuyan, S., Behera, R., Mohapatra, S.S., Behera, A., Swain, B., Bhuyan, S., Behera, R., Mohapatra, S.S., Behera, A. (2020). Wear: A Serious Problem in Industry. *Tribology in Materials and Manufacturing - Wear, Friction and Lubrication*,

40. International Organization for Standardization (2017). Rolling bearings, Damage and failures, Terms, characteristics and causes.
41. Shen, M., Li, B., Zhang, Z., Zhao, L., Xiong, G. (2019). Abrasive wear behavior of PTFE for seal applications under abrasive-atmosphere sliding condition. *Friction* 2019 8:4, 8, 755–767.
42. Chinthu, A.R. (2019). Metallurgical aspects of steels designed to resist abrasion, and impact-abrasion wear. 35, 1133–1148.
43. Scott, R. Mecanismos básicos de desgaste, <https://noria.mx/lublearn/mecanismos-basicos-de-desgaste/>
44. Ji, X., Luo, C., Sun, Y., Zhao, J. (2019). Corrosive wear of multi-layer Fe-based coatings laser cladded from amorphous powders. *Wear*, 438–439, 203113.
45. Jimenez-Martinez, M. (2020). Fatigue of offshore structures: A review of statistical fatigue damage assessment for stochastic loadings. *International Journal of Fatigue*, 132, 105327.
46. Yue, T., Wahab, M.A. (2019). A review on fretting wear mechanisms, models and numerical analyses. *Computers, Materials and Continua*, 59, 405–432.
47. Liu, H., Liu, H., Zhu, C., Parker, R.G. (2020). Effects of lubrication on gear performance: A review. *Mechanism and Machine Theory*, 145, 103701.
48. Minami, I. (2017). Molecular Science of Lubricant Additives. *Applied Sciences* 2017, Vol. 7, Page 445, 7, 445.
49. Rahman, M.H., Warneke, H., Webbert, H., Rodriguez, J., Austin, E., Tokunaga, K., Rajak, D.K., Menezes, P.L. (2021). Water-Based Lubricants: Development, Properties, and Performances. *Lubricants* 2021, Vol. 9, Page 73, 9, 73.

50. (2002). Fundamentals of Solid State Engineering. Fundamentals of Solid State Engineering,
51. Nowak, P., Kucharska, K., Kamiński, M. (2019). Ecological and Health Effects of Lubricant Oils Emitted into the Environment. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16,
52. LOPEZ TELLEZ, G., MORALES LUCKIE, R.A., OLEA MEJIA, O.F., SANCHEZ MENDIETA, V., TRUJILLO REYES, J., VARELA GUERRERO, V., VILCHIS NESTOR, A.R., LOPEZ TELLEZ, G. 236622, MORALES LUCKIE, R.A. 45308, OLEA MEJIA, O.F. 170933, SANCHEZ MENDIETA, V. 13230, TRUJILLO REYES, J. 212986, VARELA GUERRERO, V. 219131, VILCHIS NESTOR, A.R. 161073 (2013). nanoestructuras metálicas.
53. Mendoza Uribe, G., Rodríguez-López, J.L. (2007). La nanociencia y la nanotecnología: una revolución en curso. Perfiles latinoamericanos, 14, 161–186.
54. Montero, I., Schuller, I. (2011). Nanoestructuras: un viaje de tres a cero dimensiones. Revista Española de Física, 2, 17.
55. Ramachandran, K., Boopalan, V., Bear, J.C., Subramani, R. (2022). Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs)-reinforced ceramic nanocomposites for aerospace applications: a review. Journal of Materials Science, 57, 3923–3953.
56. Yu, M.F., Dyer, M.J., Ruoff, R.S. (2001). Structure and mechanical flexibility of carbon nanotube ribbons: An atomic-force microscopy study. Journal of Applied Physics, 89, 4554–4557.
57. Bhowmik, K., Basantia, S.K., Roy, T., Bandyopadhyay, A., Khutia, N., Chowdhury, A.R. (2022). Mechanical Properties of MWCNT Reinforced Epoxy Nanocomposites: Experimental, Micromechanical and Numerical

- Study. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 103, 575–586.
58. Yuan, S., Zheng, Y., Chua, C.K., Yan, Q., Zhou, K. (2018). Electrical and thermal conductivities of MWCNT/polymer composites fabricated by selective laser sintering. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 105, 203–213.
  59. Stegarescu, A., Cabrera, H., Budasheva, H., Soran, M.L., Lung, I., Limosani, F., Korte, D., Amati, M., Borodi, G., Kacso, I., Opreș, O., Dan, M., Bellucci, S. (2022). Synthesis and Characterization of MWCNT-COOH/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and CNT-COOH/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/NiO Nanocomposites: Assessment of Adsorption and Photocatalytic Performance. *Nanomaterials 2022*, Vol. 12, Page 3008, 12, 3008.
  60. Dubey, R., Dutta, D., Sarkar, A., Chattopadhyay, P. (2021). Functionalized carbon nanotubes: synthesis, properties and applications in water purification, drug delivery, and material and biomedical sciences. *Nanoscale Advances*, 3, 5722–5744.
  61. Garcia Tobar, M., Contreras Urgiles, R.W., Jimenez Cordero, B., Guillen Matute, J. (2024). Nanotechnology in Lubricants: A Systematic Review of the Use of Nanoparticles to Reduce the Friction Coefficient. *Lubricants*, 12, 166.
  62. Smith, M., March, J. (2007). Hofmann and Curtius Rearrangements. *March's Advanced Organic Chemistry: Reactions, Mechanisms and Structure*, 1607–1609.
  63. Jorge, M., Gomes, J.R.B., Barrera, M.C. (2022). The dipole moment of alcohols in the liquid phase and in solution. *Journal of Molecular Liquids*, 356,
  64. Park, S.H., Lee, S.E. (2017). Enhanced dispersion and material properties of multi-walled carbon nanotube composites through turbulent Taylor-

- Couette flow. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 95, 118–124.
65. Russian Moodle Funcionalización oxidativa de nanoestructuras de carbono.
  66. Dai, W., Kheireddin, B., Gao, H., Liang, H. (2016). Roles of nanoparticles in oil lubrication. *Tribology International*, 102, 88–98.
  67. Sifuentes, E.T., Kharissova, O. V., Maldonado-Cortés, D., Peña-Parás, L., Michalczewski, R., Kharisov, B.I. (2021). A comparison of tribological properties of nanolubricants containing carbon nanotori and additional additives. *Materials Chemistry and Physics*, 272,
  68. Peña-Parás, L., Maldonado-Cortés, D., Taha-Tijerina, J. (2019). Eco-friendly nanoparticle additives for lubricants and their tribological characterization. In: *Handbook of Ecomaterials*. pp. 3247–3267. Springer International Publishing
  69. Ren, B., Gao, L., BotaoXie, Li, M., Zhang, S., Zu, guoqing, Ran, X. (2020). Tribological properties and anti-wear mechanism of ZnO@graphene core-shell nanoparticles as lubricant additives. *undefined*, 144,
  70. Jason, Y.J.J., How, H.G., Teoh, Y.H., Chuah, H.G. (2020). A study on the tribological performance of nanolubricants. *Processes*, 8, 1–33.
  71. Kotia, A., Chowdary, K., Srivastava, I., Ghosh, S.K., Ali, M.K.A. (2020). Carbon nanomaterials as friction modifiers in automotive engines: Recent progress and perspectives. *Journal of Molecular Liquids*, 310, 113200.
  72. Bata, A., Nagy, D., Weltsch, Z. (2022). Effect of Recycling on the Mechanical, Thermal and Rheological Properties of Polypropylene/Carbon Nanotube Composites. *Polymers* 2022, Vol. 14, Page 5257, 14, 5257.



73. Schauerman, C.M., Ganter, M.J., Gaustad, G., Babbitt, C.W., Raffaele, R.P., Landi, B.J. (2012). Recycling single-wall carbon nanotube anodes from lithium ion batteries. *Journal of Materials Chemistry*, 22, 12008–12015.
74. Advanced Oxidation Processes with Carbon Nanotubes: Surface-Promoted Formation of Hydroxyl Radical During Ozonation | Request PDF, [https://www.researchgate.net/publication/267313629\\_Advanced\\_Oxidation\\_Processes\\_with\\_Carbon\\_Nanotubes\\_Surface-Promoted\\_Formation\\_of\\_Hydroxyl\\_Radical\\_During\\_Ozonation](https://www.researchgate.net/publication/267313629_Advanced_Oxidation_Processes_with_Carbon_Nanotubes_Surface-Promoted_Formation_of_Hydroxyl_Radical_During_Ozonation)
75. He, T., Chen, N., Fang, J., Cai, G., Wang, J., Chen, B., Liang, Q. (2022). Micro/nano carbon spheres as liquid lubricant additive: Achievements and prospects. *Journal of Molecular Liquids*, 357, 119090.
76. Gao, Q., Liu, S., Hou, K., Li, Z., Wang, J. (2022). Graphene-Based Nanomaterials as Lubricant Additives: A Review. *Lubricants 2022*, Vol. 10, Page 273, 10, 273.
77. Mohamed, A., Osman, T.A., Khattab, A., Zaki, M. (2015). Tribological behavior of carbon nanotubes as an additive on lithium grease. *Journal of Tribology*, 137,
78. Afonso, E., Martínez-Gómez, P., Tiemblo, P., García, N. (2021). La perfilometría óptica como técnica de caracterización topográfica no destructiva y sin contacto.
79. Optical Profilometry - Nanoscience Instruments, <https://www.nanoscience.com/techniques/optical-profilometry/#optical>
80. Quintero, F.J., Mendoza, K., Romero, L.A., Marrugo, A.G. (2020). Desarrollo e implementación de un perfilómetro óptico por triangulación láser. In: 2020 9th International Congress of Mechatronics Engineering and Automation, CIIMA 2020 - Conference Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

81. Téllez Mesa Clara Aplicaciones de la espectroscopía infrarroja en el análisis de alimentos, (2019).
82. Fadlelmoula, A., Pinho, D., Carvalho, V.H., Catarino, S.O., Minas, G. (2022). Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy to Analyse Human Blood over the Last 20 Years: A Review towards Lab-on-a-Chip Devices. *Micromachines*, 13, 187.
83. Valand, R., Tanna, S., Lawson, G., Bengtström, L. A review of Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy used in food adulteration and authenticity investigations, (2020).
84. FTIR Espectroscopía infrarroja - Polímeros termoplásticos, elastómeros y aditivos, <https://www.mexpolimeros.com/ftir.html>
85. Hadianfard, M.J., Alizadeh, M., Moradzaman, M. Effects of chemical and mechanical functionalization of carbon nanotubes on the behavior of a CNT/Phenolic nanocomposite.
86. Ashokkumar, M. (2011). The characterization of acoustic cavitation bubbles - An overview. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18, 864–872.
87. Gulzar, M., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Varman, M., Zulkifli, N.W.M., Mufti, R.A., Zahid, R. (2016). Tribological performance of nanoparticles as lubricating oil additives. *Journal of Nanoparticle Research*, 18, 1–25.
88. Debelak, B., Lafdi, K. (2007). Use of exfoliated graphite filler to enhance polymer physical properties. *Carbon*, 45, 1727–1734.
89. Chaudhary, N., Singh, A., Roy, M., Kumar, V., Singh, B.P., Dhakate, S.R., Jha, P., Bhattacharjee, D. (2023). Surface modification of multiwalled carbon nanotubes network through high energy electron beam and its implications on thermoelectric properties. *Materials Science and Engineering: B*, 293, 116464.