

Evaluación de Lubricantes y Grasas Usando el Método De las Cuatro Bolas por Desgaste,
Basado en el Estándar Astm D4172-21 y Astm D2266-01 Empleando la Plataforma Umt-
Tribolab de la Empresa Bruker

Julián Camilo Álvarez Díaz y Herson Duván Estévez Maldonado
Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Alberto David Pertuz Comas

Phd. Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A Dios, quien guio cada paso de este proyecto y a mis queridos padres, Luz Amparo Maldonado y José Misael Estévez, quienes fueron mi apoyo incondicional a lo largo de mi carrera. Su guía, apoyo y aliento en los momentos más críticos fueron fundamentales para alcanzar cada logro. A ellos, les dedico mis esfuerzos y éxitos, agradecido por mantener viva la fe y por ser un ejemplo inspirador en mi vida.

Herson Duván Estévez Maldonado

Este proyecto lo dedico principalmente a Dios, a mi padre que, aunque ya no me acompaña en vida fue uno de los motores e impulso que me motivo día tras día, a mi madre y a mi hermana por el apoyo incondicional durante todo este proceso y me ayudaron durante los momentos más difíciles de mi vida, Quiero que sepan que este logro y muchos más que vengan van a ser en honor a ustedes.

Julián Camilo Álvarez Díaz

Agradecimientos

Brindamos agradecimientos a quienes aportaron ayuda, colaboración y tiempo en este proyecto. Gracias al laboratorio de metalografía de ingeniería mecánica UIS y su auxiliar quien nos guio en el proceso de elaboración del montaje y las pruebas.

Gracias a la dirección que tuvimos por parte de Alberto David Pertuz Comas director de nuestro proyecto, a los profesores, administrativos, directivos y compañeros de la escuela de ingeniería mecánica.

Tabla De Contenido

	pág.
Introducción	12
1. Problema de Investigación	14
1.1 Planteamiento del Problema.....	14
1.2 Justificación de la solución	15
2. Objetivos	16
2.1 Objetivo general.....	16
2.2 Objetivos específicos.....	16
3. Marco Teórico	17
3.1. Referentes Teóricos.....	17
3.1.1. <i>Tribología</i>	17
3.1.1.2. Fricción.....	19
3.1.2. <i>Lubricante</i>	22
3.1.2.2. Grasas lubricantes.....	23
3.2. Ensayo de las Cuatro Bolas.....	24
4. Diseño Metodológico	26
4.1. Técnicas, instrumentos o estrategias a implementar en los objetivos específicos de la investigación.....	26
4.2. Despliegue de la Matriz de qfd	30
4.2.1 <i>Criterios de Diseñador</i>	30
4.2.2 <i>Ponderación de resultados</i>	32
4.2.3 <i>Planteamiento de alternativas</i>	32
4.2.3.1 Alternativa 1.....	32

ENSAYO DE LAS CUATRO BOLAS	5
4.2.3.2 Alternativa 2:.....	33
4.2.3.3 Alternativa 3:.....	34
4.3 Matriz de PUGH.....	35
4.5. Diseño de los Componentes de la Maquina	45
4.7. Cálculos.....	49
5. Resultados y Análisis	56
5.1. Resultados de las Pruebas	56
5.1.1. Prueba #1: condiciones sin lubricación.....	56
5.1.2. Prueba #2: Variación en la carga	58
5.1.3. Prueba #3: Evaluación con lubricante	60
5.1.4. Prueba #4: Evaluación con lubricante a mayor carga.....	62
5.2. Análisis.....	63
5.2.1. Pruebas con lubricante	64
5.2.2. Prueba sin Lubricante.....	66
6. Conclusiones.....	69
7. Recomendaciones	70
Referencias Bibliográficas.....	71

Lista De Tablas

Tabla 1. Matriz QFD	31
Tabla 2. Matriz de PUGH	35
Tabla 3. Prueba 1.....	56
Tabla 4. Prueba 1 (fotografías).....	57
Tabla 5. Medidas en el microscopio.....	58
Tabla 6. Prueba 2.....	58
Tabla 7. Prueba 2 (fotografías).....	59
Tabla 8. Medidas en el microscopio.....	60
Tabla 9. Prueba 3.....	60
Tabla 10. Prueba 3 (Fotografías)	61
Tabla 11. Medidas en el microscopio.....	61
Tabla 12. Prueba 4.....	62
Tabla 13. Prueba 4 (fotografías).....	63
Tabla 15. Resultados con lubricante seleccionado	64
Tabla 16. Resultados sin lubricante.....	66

Lista De Figuras

Figura 1. Esquema ilustrativo que representa la progresión de la interacción entre dos superficies rugosas en movimiento.....	19
Figura 2. Fuerza de fricción.	20
Figura 3. Fuerza de rozamiento cinético.	21
Figura 4. Resistencia a la rodadura	22
Figura 5. Alternativa 1.	32
Figura 6. Alternativa 2	33
Figura 7. Alternativa 3	34
Figura 8. película pasiva	36
Figura 9. Análisis de elementos finitos SolidWorks, esfuerzo y deformación.....	38
Figura 10. Forma tetraédrica de las esferas.....	39
Figura 11. Planos SolidWorks de las esferas	40
Figura 12. Planos SolidWorks de las esferas.	40
Figura 13. Vista de sección frontal.	41
Figura 14. Medidas internas de la copa.....	42
Figura 15. Dimensiones de la arandela.	44
Figura 16. Volumen que ocupa la arandela.....	45
Figura 17. Sensor de carga	47
Figura 18. ROT- DRIVER	48
Figura 19. diagrama de Profundidad de huella de desgaste	51
Figura 20. Vista en eje xy del círculo (huella de desgaste)	53

Figura 21. Plano de corte.....	54
Figura 22. Comportamiento del índice de desgaste respecto a la carga.....	65
Figura 23. Índice de desgaste sin lubricante.....	67
Figura 24. volumen de desgaste vs carga.....	67
Figura 25. Profundidad de desgaste vs carga	68

APÉNDICES

Apéndice A. Manual de operación.....	74
Apéndice B. Análisis de las huellas producidas por desgaste.....	81
Apéndice C. Diámetro promedio de la cicatriz o huella de desgaste... ..	82
Apéndice D. Área de la cicatriz o huella de desgaste	83
Apéndice E. Planos de la copa	87

Resumen

Título: Evaluación de Lubricantes y Grasas Usando el Método de las Cuatro Bolas Por Desgaste, Basado en el Estándar Astm D 4172-21 y Astm D2266 empleando la plataforma UMT-Tribolab de la empresa Bruker*

Autor: Herson Duván Estévez Maldonado y Julián Camilo Álvarez Díaz**

Palabras Clave: Desgaste, lubricación, carga, fricción.

Descripción:

Los lubricantes nacen como una opción para evitar el desgaste entre dos superficies en pro del buen funcionamiento de un sistema, con los años se han presentado avances debido a las necesidades y sus diferentes aplicaciones; los lubricantes son de gran importancia en la ingeniería mecánica por lo cual en el presente proyecto se busca evaluar las propiedades de los lubricantes y grasas mediante el método de las 4 bolas usando la plataforma UMT-Tribolab de la empresa BUNKER, en base a las normas ASTM D 4172 y ASTM D 2266, para esto se realizó un montaje que está compuesto de diseño de copa de ensamble para el tribómetro y realizar pruebas usando diferentes condiciones de carga, temperatura, lubricante y revoluciones para evaluar las propiedades anti-desgaste y capacidad de reducción de la fricción en base a las medidas de diámetro y áreas promedio de huellas de desgaste. Para el análisis de resultados nos basamos en el modelo Archard para calcular el índice y volumen de desgaste debido a que este modelo fue desarrollado con el fin de proporcionar una manera cuantitativa para calcular el volumen de desgaste en superficies redondas y el índice de desgaste en función del volumen desgastado, en base a los resultados se obtuvo un índice de desgaste con lubricante para una carga de 10N fue $7.41 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N*s}$, para una carga de 15N fue $6.472 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N*s}$, y sin lubricante con una carga de 10N fue $1.383 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N*s}$, para una carga 15N fue $1.43 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N*s}$. Con los datos obtenidos se analizó que la carga tiene un impacto directo en el desgaste de los componentes, a mayores cargas se observó un aumento en el desgaste. A su vez se denota que con la presencia de un lubricante se logra la disminución en las huellas de desgaste.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Alberto David Pertuz Comas. Ph.D. Ingeniería Mecánica

Abstract

Title: Evaluation of Lubricants and Greases Using the Four Ball Wear Method, Based on the Astm D 4172-21 and Astm D2266 Standard*

Author(s): Herson Duván Estévez Maldonado, Julián Camilo Álvarez Díaz**

Key Words: Wear, Lubrication, Burden, Friction.

Description:

Lubricants are born as an option to prevent wear between two surfaces for the proper functioning of a system, over the years there have been advances due to the needs and different applications; Lubricants are of great importance in mechanical engineering; therefore, this project seeks to evaluate the properties of lubricants and greases by means of the 4-ball method using the UMT-Tribolab platform of the company BUNKER, based on ASTM D 4172 and ASTM D 2266 standards, For this purpose, an assembly was carried out, which is composed of a tribometer assembly cup design and tests using different load conditions, temperature, lubricant and revolutions to evaluate the anti-wear properties and friction reduction capacity based on the measurements of diameter and average areas of wear tracks. For the analysis of results we relied on the Archard model to calculate the wear rate and wear volume because this model was developed in order to provide a quantitative way to calculate the wear volume on round surfaces and the wear rate as a function of the volume worn, based on the results we obtained a wear rate with lubricant for a load of 10N was $7.41 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{s}$, for a load of 15N it was $6.472 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{s}$, and without lubricant with a load of 10N it was $1.383 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{s}$, for a load of 15N it was $1.43 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{s}$. With the data obtained, it was analyzed that the load has a direct impact on the wear of the components; the higher the load, the more wear was observed. At the same time, it was noted that with the presence of a lubricant, a decrease in wear traces is achieved.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Alberto David Pertuz Comas. Ph.D. Mechanical Engineering

Introducción

La palabra lubricante surgió desde que los seres humanos empezaron a utilizar herramientas. En la antigüedad como lo fue en la edad egipcia que usaban aceite de oliva para disminuir el rozamiento entre las superficies para así mover piedras y maderas enormes para construcción, cuando aparecieron los carros de combate se empezó a utilizar nuevos lubricantes como el “sebo” que es grasa cruda de animal y se colocaba en el eje de las ruedas.

En la edad medieval, por el crecimiento del uso de maquinaria de hierro y bronce, se originaron varios productos lubricantes como aceite de cacahuete, aceite de colza, aceite de esperma de ballena, etc. Pero no se apartaban del límite de aceite generado por animales o plantas, además la mayoría de estos lubricantes que usaban lo hacían por experiencia y no análisis científicos.

Los estudios y análisis serios por los lubricantes empezaron por la exploración de petróleo en Pensilvania de Estados Unidos en el Siglo XIX. En esa época aún se utilizaba el aceite de esperma de ballena para las diferentes máquinas, pero descubrieron que si se mezclaba con el petróleo su uso se extendía a 10 años más. Desde entonces empezaron a sustituirlo por productos a base de petróleo. En el siglo XX, se crearon máquinas más complejas y delicadas, se tuvo que crear lubricantes que cumplieran las nuevas necesidades, condiciones más severas. Luego con el desarrollo de vehículos, trenes de Diesel, aviones, barcos y de las dos guerras mundiales, se crearon refinerías de petróleo lo cual permitió añadir aditivos de mayor calidad para los lubricantes. Después de 1950 se requerían lubricantes que soportan condiciones más extremas como; velocidad, temperatura, la carga que soportan y actualmente también se tiene en cuenta factores como lo son el medio ambiente.

Es por ello, que el desgaste es uno de los factores que más influyen en las fallas y/o pérdidas en las producciones o en las máquinas, por eso se empezaron añadir sustancias con el fin de mitigar los daños ocasionados por el rozamiento entre las superficies, los cuales potencian o añaden funciones y propiedades en este caso de los lubricantes a través de sustancias químicas agregadas.

Por eso se realizará una evaluación de las propiedades anti-desgaste de los lubricantes y grasas que operan en condiciones de lubricante límite, mediante el método de las cuatro bolas y aplicando la norma estándar ASTM D4172-21 y ASTM D2266-0. Además de que estas pruebas pueden servir mucho para la industria y obtener un mejor rendimiento de las máquinas que se usan día a día.

1. Problema de Investigación

1.1 Planteamiento del Problema

Teniendo en cuenta la gran cantidad de fallas y/o pérdidas que se producen en la industria debido a los fenómenos de fricción y desgaste. Existen varios estudios tribológicos para mejorar los componentes que sufren desgaste y el estado de las superficies evitando que la maquinaria llegue a un punto crítico. “La lubricación depende básicamente de tres parámetros: viscosidad del fluido lubricante, velocidad relativa entre las superficies y la carga que soportan estas mismas” (Universidad nacional de energía, 2020).

La función de lubricación es preservar las partes que están en movimiento del mecanismo, reduciendo el desgaste y la fricción. El lubricante actúa como refrigerante, también se encarga de limpiar y eliminar desechos. Cuando nos referimos al término lubricante debemos hacer referencia al término aditivos, puesto que estos agentes proporcionan y/o potencian la función de el mismo. “Los aditivos son sustancias químicas activas que se añaden a los aceites para formar el lubricante final y así mejorar las propiedades existentes o añadir nuevas” (Guest, 2021).

“La resistencia de película se puede describir como la capacidad del lubricante para disminuir los efectos de la fricción y controlar el desgaste por otros medios diferentes al espesor de la película lubricante. Como se mencionó, la viscosidad es el principal contribuyente al espesor de la película durante la lubricación hidrodinámica y elastohidrodinámica” (cmc-latam, 2016).

La película en los lubricantes es valiosa ya que evita el contacto entre dos superficies metal-metal. Para que el lubricante sea el óptimo se deben tener en cuenta tres parámetros mencionados anteriormente para emplear. Estos factores se pueden ver afectados por agentes contaminantes y la temperatura.

La evaluación de lubricantes y grasas por el método de las cuatro bolas por desgaste basado en el estándar ASTM D4172-21 y ASTM D2266-01 usando la plataforma UMT-Tribolab de la corporación BRUKER es el análisis de los lubricantes en general, son muy útiles para diferenciar entre lubricantes y grasas que tienen diferentes niveles de capacidad de soporte de carga, protección al desgaste y la reducción a la fricción. Sin embargo, estos resultados no necesariamente se relacionan con las aplicaciones de la vida real.

Por ello se realizará un estudio de las lubricantes y grasa lo que permitirá evaluar las características, para así poder prevenir fallas que se puedan generar en el futuro. Con esta información se puede establecer qué tipo de lubricante es el más conveniente para los diferentes tipos de usos y condiciones a los que van a ser sometidos, para posteriormente utilizar el lubricante más adecuado para que las máquinas tengan un ciclo de vida mucho más largo.

1.2 Justificación de la solución

Este proyecto es importante ya que pretende hacer un montaje de un tribómetro de cuatro bolas con el fin de evaluar lubricantes y grasas en el laboratorio de metalografía de la universidad industrial de Santander, sede Bucaramanga, en el cual se pueda hacer estudios y prácticas por parte de la población universitaria. A su vez brindar una mejor experiencia en los análisis de lubricantes y los aditivos que se le añaden, para tener un uso óptimo de los equipos.

También se busca el diseño de una copa para realizar las pruebas de desgaste de las cuatro bolas, en el cual se pretende seleccionar una alternativa muy versátil que pueda cumplir con las necesidades del operario y demás personal que van a realizar estudios con este equipo.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Determinar las características y propiedades de lubricantes y grasas utilizando el método de desgaste de cuatro bolas, basado en la norma estándar ASTM D4172-21 y ASTM D2266-01, usando la plataforma UMT-Tribolab de BRUKER.

2.2 Objetivos específicos

- Acoplar el montaje de ensayo de las cuatro bolas en la plataforma UMT-Tribolab empleando las normas ASTM D4172-21 y ASTM D2266-01.
- Diseñar una copa de prueba, para ensamblar con el accionamiento giratorio y portamuestras del anillo base.
- Realizar pruebas de desgaste utilizando cargas y temperatura constante durante un lapso de 60 min. Con el fin de analizar las huellas que se producen en las tres bolas inferiores.
- Medir los diámetros y áreas promedios de las huellas de desgaste en las tres bolas inferiores aplicando los métodos suministrados por la norma ASTM D2266-01 y ASTM D4172-21.
- Evaluar las propiedades relativas de prevención de desgaste de grasas lubricantes obtenidas por el método de las cuatro bolas.
- Elaborar un manual de operación y ensayo para facilitar la práctica aplicando los métodos de las normas ASTM D4172-21 y ASTM D2266-01.

3. Marco Teórico

Para tener un buen desempeño y desarrollo de todo el proceso, se debe tener un conocimiento previo o haber realizado una investigación conceptual, que permita avanzar de manera concreta y profunda en las actividades investigativas. Por esto, se hace necesario realizar una indagación sobre el contexto a tratar.

3.1. Referentes Teóricos

Varios campos de investigación han intentado comprender el estudio de las propiedades y el significado de la lubricación. Sin embargo, para entender qué investigación se necesita hacer, debemos definir los conceptos básicos del tema. Estos incluyen las propiedades de los lubricantes, los aditivos y los análisis más comunes para comprobar las propiedades.

3.1.1. Tribología

“La tribología es la ciencia que estudia los fenómenos que pueden ocurrir entre sistemas en contacto, inmóviles o en movimiento relativo” (Nanotec,2019).

3.1.1.1. Desgaste. El desgaste es un fenómeno tribológico que surge cuando las capas superficiales de los sólidos experimentan rupturas o desprendimientos debido al contacto y movimiento relativo entre las superficies. Este movimiento puede ser unidireccional, de balanceo, deslizante o rodante, o incluso una combinación de estos. No se trata únicamente de una propiedad del material, sino más bien de una respuesta intrínseca al sistema.

Según la empresa mexicana XADO (2022) el desgaste lo podemos definir como la pérdida progresiva de material en la superficie de trabajo a causa del roce o fricción entre ellos. Esto nos puede conllevar a una pérdida de las propiedades del material como lo son la dureza, resistencia a la tracción o resistencia al impacto y deformaciones del material o incluso agujeros.

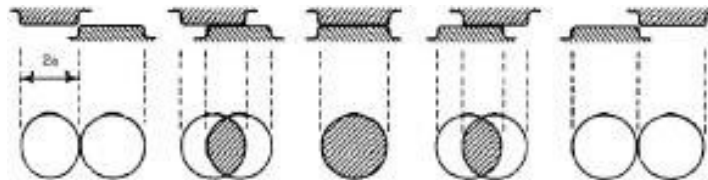
El desgaste puede manifestarse en diversos niveles de intensidad, e incluso puede ser aceptado o incluso beneficioso en circunstancias particulares. Aunque hay varias técnicas para mitigarlo, su presencia conlleva pérdidas económicas considerables. Una solución efectiva para reducirlo es mediante la aplicación de recubrimientos y tratamientos superficiales, ya que, al alterar las características mecánicas de la superficie de los materiales, se reduce la liberación de partículas en esta área.

3.1.1.1.1. *Desgaste por Fricción.* Se produce debido al movimiento relativo entre dos superficies en contacto. Esto puede llevar al pulido y desgaste gradual de las superficies.

3.1.1.1.2. *Modelo de Archard.* La Ecuación de Archard, desarrollada semi-empíricamente por Holm y Archard, brinda una aproximación para calcular la cantidad de material que se desgasta, especialmente a través de los mecanismos de adhesión y abrasión.

Figura 1.

Esquema ilustrativo que representa la progresión de la interacción entre dos superficies rugosas en movimiento.



Nota: Un esquema ilustrado que representa la progresión de la interacción entre dos superficies rugosas en movimiento. Tomado de (Materiales, T. L. (2022, octubre 24)).

$$V = \left(\frac{K * L * W}{H} \right)$$

Donde:

V: Volumen gastado

K: Coeficiente de desgaste

L: Distancia de deslizamiento

W: Fuerza normal aplicada

H: Dureza de penetración

3.1.1.2. Fricción. La fuerza de fricción, también conocida como fuerza de rozamiento, se refiere a la resistencia que surge entre dos superficies en contacto cuando una se mueve sobre la otra o cuando se intenta iniciar ese movimiento. Este fenómeno es esencial en nuestra vida diaria, ya que nos permite llevar a cabo actividades como caminar y correr. Es importante destacar que esta fuerza siempre se opone al sentido del movimiento relativo entre las superficies, proporcionando una resistencia al desplazamiento. Este principio es crucial en la ingeniería y la física para comprender y calcular el comportamiento de sistemas en movimiento.

La fricción es la fuerza de rozamiento que existe entre dos superficies que se encuentran en contacto, que se opone al deslizamiento generado debido a las imperfecciones, que en su

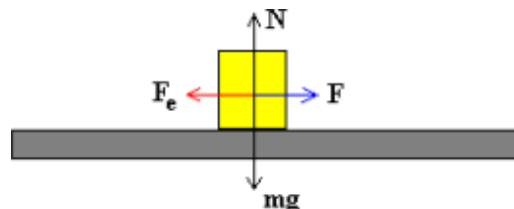
mayoría suelen ser partes microscópicas, entre dichas superficies en contacto. La fuerza resultante entre ambas superficies se compone de una fuerza normal y de la fuerza de rozamiento, que es paralela a las superficies en contacto (Editorial etece,2021).

Existen varios tipos de desgaste que se pueden presentar en diferentes contextos:

3.1.1.2.1. Fricción Estática. Ocurre cuando dos superficies están en contacto, pero no hay movimiento relativo entre ellas. Para superar esta fricción y hacer que las superficies se muevan, es necesario aplicar una fuerza mayor a la fuerza de fricción estática.

Figura 2.

Fuerza de fricción.



Nota: Tendencia al movimiento de dos objetos que están en contacto. Tomado de (En, M., Felipe Díaz, I., & Castillo, D. (s. f.). tribología: fricción, desgaste y lubricación. Mex.tl).

$$F = F_e$$

La mayor fuerza de fricción se alcanza justo en el momento en que el bloque está a punto de deslizarse; es decir, en el punto de inicio del movimiento.

$$F_{e_max} = \mu_e N$$

F_e : Fuerza de rozamiento estático

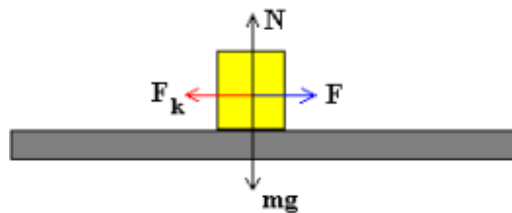
μ_e : coeficiente de rozamiento estático

N: Fuerza normal

3.1.1.2.2. Fricción Cinética (o Dinámica). Se presenta cuando dos superficies están en movimiento relativo una con respecto a la otra. La fuerza de fricción cinética es generalmente menor que la fricción estática para las mismas superficies.

Figura 3.

Fuerza de rozamiento cinético.



Nota: Tomado de (En, M., Felipe Díaz, I., & Castillo, D. (s. f.). tribología: fricción, desgaste y lubricación. Mex.tl).

$$F_k = \mu_k N$$

F_k : Fuerza de rozamiento dinámico

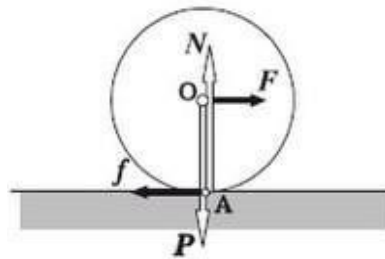
μ_k : coeficiente de rozamiento cinético

N: Fuerza normal

3.1.1.2.3. Fricción de Rodadura. Ocurre cuando un objeto rueda sobre una superficie. Este tipo de fricción es menor que la fricción estática y cinética, lo que hace que sea el tipo de fricción más eficiente para la locomoción.

Figura 4.

Resistencia a la rodadura.



Nota: Tomado de (Wikipedia contributors. (s. f.). Resistencia a la rodadura. Wikipedia, The Free Encyclopedia).

3.1.1.2.4. Fricción Interna. También conocida como fricción viscosa, es la resistencia que experimenta un fluido (como un líquido o un gas) al fluir a través de un conducto o al moverse sobre una superficie sólida. Es la base de fenómenos como la resistencia al flujo en tuberías y la absorción de energía en sistemas de amortiguación.

3.1.2. Lubricante

Los lubricantes son compuestos empleados para mitigar la fricción entre superficies que experimentan movimiento relativo. Su principal función es establecer una barrera protectora que previene el contacto directo entre dichas superficies, reduciendo así el desgaste y la generación de calor. Además, contribuyen a optimizar la eficiencia de maquinaria y componentes al minimizar las pérdidas de energía ocasionadas por la fricción. Según la definición del estándar ASTM G40-13, un lubricante es cualquier sustancia intercalada entre dos superficies en movimiento relativo que controla la fricción y el desgaste entre ellas.

3.1.2.1. Aceites lubricantes. El término aceite lubricante se refiere a una amplia gama de fluidos utilizados para reducir la fricción y desgaste entre superficies en movimiento relativo. La mayoría de estos aceites son de origen mineral, lo que significa que provienen de la destilación del petróleo crudo. Están compuestos principalmente por diversos tipos de hidrocarburos, entre los que se incluyen las parafinas, que son hidrocarburos saturados lineales o ramificados; los naftenos, que son hidrocarburos saturados cíclicos; y los aromáticos, que contienen anillos de carbono conjugados.

La elección del tipo de aceite lubricante adecuado depende de varios factores, como la aplicación específica, las condiciones de operación y las demandas de rendimiento. En algunos casos, es posible que el aceite mineral no cumpla con las expectativas en términos de propiedades mecánicas, como la resistencia a altas temperaturas o la capacidad de soportar cargas extremas. En tales situaciones, se pueden considerar otros tipos de aceites lubricantes, como los sintéticos o los semisintéticos, que son formulados con bases y aditivos diseñados para proporcionar características de rendimiento superiores.

3.1.2.2. Grasas lubricantes. La grasa, en el contexto de lubricantes, se presenta en un estado semisólido y se compone esencialmente de un jabón emulsionado con aceite. Esta formulación única le otorga propiedades particulares que la distinguen de otros tipos de lubricantes. Su estado semisólido permite que se adhiera eficazmente a las superficies en movimiento, asegurando así una lubricación constante y precisa en los puntos críticos de fricción.

Esta característica es esencial en aplicaciones donde la lubricación a base de aceite líquido podría ser expulsada o desplazada fácilmente. La grasa, por otro lado, permanece en su lugar, incluso en condiciones de alta presión o carga, lo que garantiza una protección prolongada contra el desgaste y la fricción.

Además de su función lubricante, la grasa actúa como una barrera efectiva contra contaminantes externos. Al formar una capa protectora sobre las superficies, previene la entrada

de partículas de suciedad, polvo o cualquier otro tipo de contaminante que pueda comprometer el rendimiento de los componentes mecánicos.

Esta capacidad de sellado también es valiosa en entornos expuestos a condiciones adversas, como la humedad o la presencia de productos químicos agresivos. La grasa proporciona una capa adicional de protección, lo que es esencial para la prolongación de la vida útil y la fiabilidad de maquinaria y equipos en tales entornos.

3.2. Ensayo de las Cuatro Bolas

El método de las cuatro bolas sirve para determinar las propiedades de carga y desgaste, tanto en lubricantes como en grasas, para hacer el método de desgaste de las cuatro bolas debemos basarnos en la norma estándar ASTM D2266 (Eurolab).

El ensayo de las cuatro bolas es una prueba comúnmente utilizada en tribología para evaluar las propiedades de lubricantes y recubrimientos en términos de resistencia al desgaste y capacidad de reducción de la fricción. Consiste en colocar cuatro bolas de acero sobre una superficie y aplicar una carga sobre ellas. Una de las bolas superiores gira sobre las tres bolas inferiores, generando fricción y desgaste.

Existen diferentes variantes de este ensayo, siendo las más comunes:

3.2.1. *Ensayo de las Cuatro Bolas de No Extrema Presión (ASTM D2266; ASTM D4172)*

En este ensayo, tres de las bolas están fijas en una posición triangular y la cuarta bola, montada sobre un vástago, aplica la carga y gira sobre las tres bolas inferiores durante una hora bajo condiciones constantes de carga, temperatura y revoluciones.

3.2.2. *Ensayo de las Cuatro Bolas de Extrema Presión (ASTM D2596)*

Similar al ensayo anterior, pero se aplica una carga mucho mayor para evaluar la capacidad de los lubricantes de soportar condiciones de extrema presión, hasta lograr el punto de soldadura el cual las esferas.

3.2.3. *Ensayo de las Cuatro Bolas de Alta Temperatura (ASTM D5706)*

Diseñado para evaluar lubricantes en condiciones de alta temperatura, donde las bolas se calientan antes de la prueba.

3.2.4. *Ensayo de las Cuatro Bolas de Alta Frecuencia (ASTM D7421)*

Se aplica una frecuencia de rotación alta a una de las bolas, lo que simula condiciones de alta velocidad.

Estos ensayos proporcionan datos cruciales sobre el rendimiento de lubricantes y recubrimientos en diferentes condiciones de operación, lo que ayuda a los ingenieros a seleccionar los lubricantes adecuados para aplicaciones específicas.

4. Diseño Metodológico

En esta sección se describe la naturaleza del enfoque del proyecto al abordar las técnicas y herramientas utilizadas para lograr los objetivos específicos antes mencionados.

4.1. Técnicas, instrumentos o estrategias a implementar en los objetivos específicos de la investigación

- **Diseñar una copa de prueba, para ensamblar con el accionamiento giratorio y porta muestras del anillo base.**

Actividades:

1. Examinar los diferentes tipos de copas. Para el desarrollo de la actividad es necesario investigar sobre muchos catálogos y normas que rigen el ensayo de las 4 bolas. También es necesario indagar en artículos que traten sobre dicho tema.
2. Seleccionar la opción más adecuada. Se pretende llegar a la mejor alternativa de diseño de la copa mediante una matriz pugh y matriz QFD que cumpla con los requerimientos.
3. Llevar a cabo el modelo en mediante un software CAD (SolidWorks). De acuerdo con los parámetros de la máquina, las medidas del sistema rotativo y el tipo de copa seleccionado, se generan los planos para luego hacer la construcción de este.
4. Construcción de la copa. ya con los planos efectuados, se construirá la copa de acuerdo con la alternativa óptima estipulada anteriormente.

En el primer objetivo “Diseñar una copa de prueba, para ensamblar con el accionamiento giratorio y porta muestras del anillo base”. Se seleccionará la alternativa óptima de acuerdo con la necesidad. Sin embargo, se deben tener en cuenta las medidas de la máquina y la unidad rotativa para realizar las pruebas de desgaste.

- **Acoplar el montaje de ensayo de las cuatro bolas en la plataforma UMT-Tribolab empleando las normas ASTM D4172-21 y ASTM D2266-01.**

Actividades:

1. Indagar las normas y textos de investigación (artículos, revistas o publicaciones) sobre los parámetros para tener en cuenta para acoplar el montaje de las cuatro bolas con las condiciones del tribómetro de la empresa UMT-Tribolab.
2. Seleccionar el montaje que mejor se acomode a las condiciones dadas por norma.

Para el desarrollo del segundo objetivo “Acoplar el montaje de ensayo de las cuatro bolas en la plataforma UMT-Tribolab empleando las normas ASTM D4172-21 y ASTM D2266-01” se analizará las condiciones del tribómetro UMT-Tribolab para acoplar el montaje de las cuatro bolas según norma.

- **Realizar pruebas de desgaste utilizando cargas y temperatura constante durante un lapso de 60 min. Con el fin de analizar las huellas que se producen en las tres bolas.**

Actividades:

Para llevar a cabo el tercer objetivo es necesario basarnos en las normas estándar ya establecidas ASTM D4172 y ASTM D2266, para obtener los resultados con más precisión.

1. Limpiar a fondo las cuatro bolas de prueba, piezas de sujeción y la copa usando un líquido de limpieza o fluidos seleccionados. Se puede hacer con la ayuda de un paño limpio o toalla industrial sin pelusa. No debe quedar ningún rastro de líquido de limpieza al momento de introducir el lubricante de prueba y hacer el montaje en la máquina.
2. Insertar las bolas de prueba en el mandril. Luego inserte el mandril en el husillo de la máquina de prueba y apriete según las instrucciones dadas por el fabricante del equipo. La bola debe quedar libre de cualquier movimiento si la bola gira o se mueve dentro del mandril se recomienda que reemplace el mandril.
3. Coloque una pequeña cantidad de lubricante o grasa dentro del recipiente, suficiente para llenar el espacio vacío entre las bolas. inserte las bolas dentro de la copa inferior y bloquee las bolas en posición, con la mano apretar la contratuerca en la copa de la bola usando la llave suministrada.
4. Recubrir completamente de lubricante o grasa las bolas de prueba que están ubicadas en el Mandril y la copa.

5. Evitar golpes de carga aplicando lentamente la carga de prueba. Después de alcanzar la carga de prueba deseada, encender el controlador de temperatura y ajustar el controlador para mantener a 75°C.
 6. Cuando se alcanza la temperatura deseada, simultáneamente se pone en marcha el temporizador y el motor de accionamiento, previamente ajustados a 1200 rpm \pm 60 rpm.
 7. Después de que el motor haya estado encendido durante 60 minutos, se procede a apagar los calentadores y el motor de accionamiento. Retirar la copa de las bolas (tener cuidado al manipular, ya que pueden estar calientes las piezas).
- **Medir las marcas de desgaste en las tres bolas inferiores con precisiones del \pm 0.01 mm aplicando los métodos suministrados por la norma ASTM D2266-01.**

Actividades:

Según la norma estándar ASTM D4172 para medir las marcas de desgaste existen dos opciones con precisiones de \pm 0.01 mm.

 1. Drenar lubricante o grasa de prueba del conjunto de la copa de las bolas, suavemente sin aflojar las bolas y limpiar el área de marcas de huella con un pañuelo.
 2. Dejar las tres bolas sujetas y colocar en la base especial las bolas por separado en el microscopio.
 3. Realizar dos mediciones en cada una de las huellas de desgaste, se toma una medida de la huella a lo largo de una línea radial desde el centro de soporte, para la segunda medida se toma a lo largo de una línea que está a 90° de la primera medida.
 4. Reporta el promedio de las dos mediciones tomadas en cada una de las tres bolas como diámetro de la cicatriz en milímetros.
 5. También basándonos en la norma anterior la otra opción es retirar las bolas del conjunto directamente y medir las marcas de desgaste a 90° entre sí. Si una cicatriz es de forma elíptica, se toma una medida con estrías y la otra a través de las estrías. asegurarse de que la línea de visión sea perpendicular a la superficie que se está midiendo.

Según la norma estándar ASTM D4172 establece que, si el promedio de las dos mediciones en una bola varía del promedio de las seis lecturas tomadas previamente en más 0,04 mm, el usuario debe investigar la alineación de las bolas inferiores con las superiores.

- **Evaluar las propiedades relativas de prevención de desgaste de grasas lubricantes obtenidas por el método de las cuatro bolas.**

Actividades:

Por la carga generada en las bolas y la fricción se van a hacer huellas. Un diámetro de huella bajo significa que el lubricante evita el desgaste, entre menos huella más durabilidad tendrá el equipo.

Para saber qué tipo de desgaste se tiene, se debe tener en cuenta la normas ASTM D6300 la cual trata de determinar los datos de precisión y polarización para su uso en métodos de prueba para productos derivados del petróleo, combustibles líquidos y lubricantes.

1. El examen estadístico de los resultados entre laboratorio es la siguiente:
 - 1.1 La diferencia entre dos resultados de prueba, obtenidos por el mismo operador con el mismo equipo y material de prueba idéntico, el funcionamiento adecuado y correcto de este método de ensayo, supere el valor solo en un caso de cada veinte: 0,20 mm.
 - 1.2 La diferencia entre dos resultados únicos e independientes obtenidos por diferentes operadores y diferentes laboratorios. según la norma es aceptable que se excediera el valor solo en un caso en veinte: 0,37 mm.
2. Sesgo, este procedimiento consiste en este método de prueba para medir las características de prevención del desgaste de grasa lubricante. Proporciona pautas sobre la relación entre un conjunto de resultados de prueba y un conjunto relacionado de valores de referencia aceptados. Cuando se conoce el sesgo de un método de prueba, se puede incorporar un ajuste compensatorio en el método de prueba.

- **Elaborar un manual de operación y ensayo para facilitar la práctica aplicando los métodos de las normas ASTM D4172-21 y ASTM D2266-01.**

Actividades:

Con los datos obtenidos con el montaje escogido anteriormente se desarrollará un manual de funcionamiento operacional y toma de muestras para facilitar su uso y mantenimiento.

En este manual se explica de una manera sencilla y precisa, el paso a paso para poder realizar el montaje de la copa de una forma adecuada, también se mencionará los cuidados que se debe tener, el material utilizado y las cargas a las que puede estar involucrado los componentes.

4.2. Despliegue de la Matriz de qfd

A continuación, se presentan los requerimientos básicos de los interesados en el desarrollo de la copa.

- Fácil manejo
- Funcionalidad
- Económico
- Innovadora
- Capacidad
- Seguridad
- Mantenimiento
- Estética
- Resistencia
- Durabilidad

4.2.1 Criterios de Diseñador

- Capacidad
- Resistencia
- Forma

- Mantenimiento
- Material
- Limpieza
- Seguridad
- Fácil manejo
- Económico

La siguiente tabla muestra la matriz que relaciona los requerimientos del consumidor y el diseñador, cuyas puntuaciones se dan de acuerdo con los siguientes criterios:

Mejor = 9, regular = 3, deficiente = 1 y No sirve = 0.

Tabla 1.

Matriz QFD

EVALUACIÓN COMPARATIVA 9 = MEJOR; 3 = REGULAR; 1 = DEFICIENTE Y 0 = NO SIRVE			Requerimientos		DISEÑADOR							
			Cliente		RESISTENCIA	CAPACIDAD	FORMA	MANTENIMIENTO	MATERIAL	LIMPIEZA	SEGURIDAD	FACIL MAEJO
Requerimientos del cliente												
1	FACIL MANEJO	10	0	0	9	1	0	3	1	9	3	
2	SEGURIDAD	9	9	0	3	9	9	3	9	1	3	
3	ECONOMICO	8	9	9	9	3	9	1	3	0	9	
4	MANTENIMIENTO	7	9	1	3	9	3	3	9	1	3	
5	CAPACIDAD	6	1	9	9	0	0	0	0	0	9	
6	FUNCIONALIDAD	5	1	3	3	3	3	1	3	1	3	
7	INOVADOR	4	0	3	9	1	1	0	0	1	3	
8	DURABILIDAD	3	3	9	1	9	9	3	3	0	3	
9	RESISTENCIA	2	3	1	0	3	9	9	3	1	9	
10	ESTETICA	1	0	0	9	0	1	1	0	1	3	
EVALUACION DE IMPORTANCIA			ABSOLUTA	242	189	327	230	239	119	208	118	261

A partir de la matriz de calidad y debido a los valores obtenidos, se lograron identificar 4 características de diseño las cuales son relevantes para el diseño del proyecto.

1. Forma
2. Económico
3. Resistencia

4. Material

4.2.2 Ponderación de resultados

- Forma (0.306): Diferentes tipos de diseño
- Económico (0.244): De acuerdo con los requerimientos se mostrarán los diferentes modelos con respecto a la confiabilidad, procesos de fabricación.
- Resistencia (0.226): Seguridad, confiable y mayor tiempo de uso.
- Material (0.224): Según con los requerimientos se mostrarán las diferentes alternativas con distintos materiales.

4.2.3 Planteamiento de alternativas

Una vez obtenidos los resultados de la matriz calidad y la ponderación de las prioridades para tener en cuenta, se procede a proponer las alternativas para la solución de cada uno de los componentes de la copa.

4.2.3.1 Alternativa 1

Figura 5.

Alternativa 1.



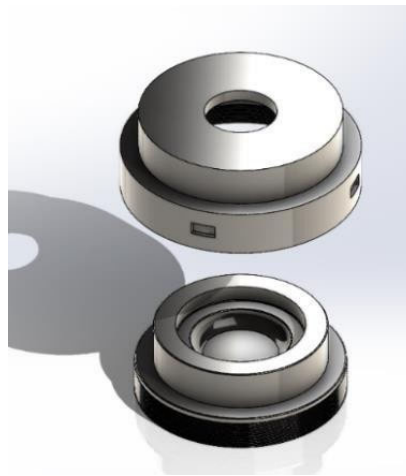
Este diseño con una forma ergonómica brinda una mayor en la fijación de la copa en el montaje, ya que cuenta con dos puntos extras para ajustar. Además, que por el tipo de material su valor es económico, pero su limpieza se dificulta debido a que esta copa tiene una superficie cónica

y su resistencia es baja. Fabricación en aluminio, Roscado en la parte superior y tapa con orejas para realizar una sujeción.

4.2.3.2 Alternativa 2:

Figura 6.

Alternativa 2

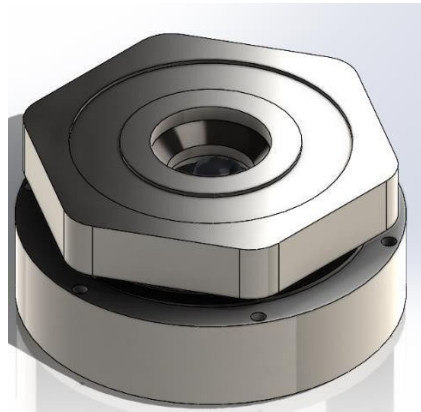


Fabricación hecha en hierro, con forma del asiento semicircular y tapa roscada. Este tipo de copa cuenta con las características para que las tres bolas se posicionen con mayor facilidad ya que las paredes semicirculares de la copa me lo permiten a su vez con una tapa roscada podemos asegurar que no van a haber fugas del lubricante y grasas. También con este tipo de material contamos con mayor seguridad y resistencia al diseño, pero es difícil de maniobrar y ajustar para realizar las pruebas.

4.2.3.3 Alternativa 3:

Figura 7.

Alternativa 3



Este hecho en acero inoxidable AISI 304, puede soportar las grandes cargas a la que va a hacer sometido y a las temperaturas que se van a manejar en el ensayo de desgaste. También en esta alternativa de diseño, se puede apreciar que cuenta de tres elementos la copa inferior, la copa base que tiene una forma de rosca con una superficie plana, una rosca externa y agujeros para hacer el montaje adecuado con el equipo de tribolab. Tiene como segundo elemento una arandela de sujeción que permite centrar las tres bolas inferiores. Por último, tiene una rosca en la parte superior, la cual cuenta con un agujero central donde va a llegar la cuarta bola ejerciendo una fuerza vertical sobre las tres bolas inferiores y también lleva una rosca interior que permite se ajusta para que las bolas inferiores no se muevan con la arandela que las está aprisionando.

4.3 Matriz de PUGH

Tabla 2.

Matriz de PUGH

		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Forma	0,306	3	2	4
Económico	0,244	2	3	3
Resistencia	0,226	4	2	4
Material	0,224	2	2	3
Total		11,0	9,0	14,0
Ranking		2	3	1

En este caso la opción ganadora es la alternativa 3, el cual brinda con un diseño más compacto, con buena calidad en sus materiales, debido a que las pruebas no se realizaran con tanta frecuencia se podría oxidar o deteriorar los materiales de la copa y tener un factor de seguridad más bajo, incluso se puede contaminar la prueba o los diferentes lubricantes que se pongan a prueba en el ensayo dañarían con el pasar del tiempo los elementos.

4.4 Diseño de la Copa

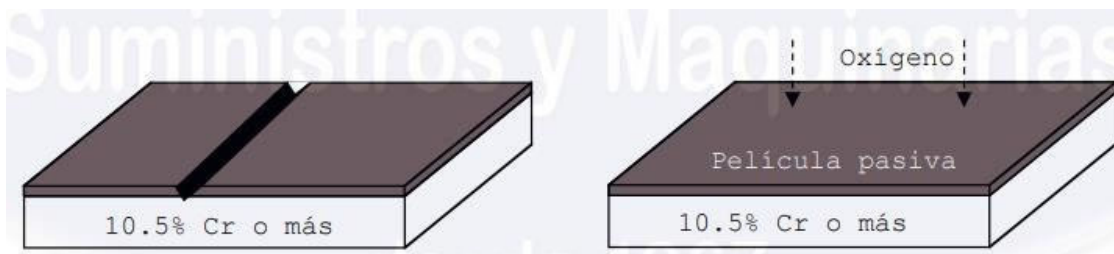
En esta sección se expresa el proceso de diseño a detalle de los componentes utilizados para adaptar la maquina UMT Tribolab para realizar la prueba de las cuatro bolas. En los cuales se presenta el diseño de la copa y el mandril.

4.4.2 Manufactura de la Copa

4.4.2.1 Selección de Material para la Copa. El acero inoxidable seleccionado para la construcción de la copa reacciona con el oxígeno del aire formando óxidos de hierro, comúnmente conocidos como "herrumbre". Sin embargo, se ha descubierto en investigaciones recientes que al añadir un 10% adicional de cromo al acero, este se combina con el oxígeno para crear una fina capa de óxido de cromo sobre la superficie. Esta capa actúa como una barrera protectora contra la corrosión.

Figura 8.

Película pasiva



Nota: Tomado de (El Acero Inoxidable, ¿qué E. S. (s. f). clasificación de los aceros inoxidables. Bonnet.es. Recuperado 25 de septiembre de 2023).

Los aceros se clasifican en tres grupos: martensíticos, ferríticos y austeníticos. La selección de uno de ellos para la copa se basa en sus propiedades generales, que son determinantes para su desempeño.

Los aceros se clasifican en tres grupos: martensíticos, ferríticos y austeníticos. La selección de uno de ellos para la copa se basa en sus propiedades generales, que son determinantes para su desempeño.

El acero inoxidable austenítico, en particular el tipo AISI 304, fue elegido debido a sus propiedades excepcionales. Ofrece formalidad, alta resistencia a la corrosión, buen desempeño en temperaturas extremas, así como excelentes estándares de higiene y limpieza. El acero 304 también

destaca por su versatilidad, encontrando aplicaciones en aviación, hospitales y en la fabricación de remaches.

Para la manufactura de la copa en el estudio de lubricantes, se optó por el acero inoxidable AISI 304. Este material proporciona características altamente beneficiosas para la prueba según la norma ASTM D2266-01. Su alta resistencia a la corrosión, durabilidad y capacidad para soportar altas temperaturas aseguran la precisión y fiabilidad de los resultados.

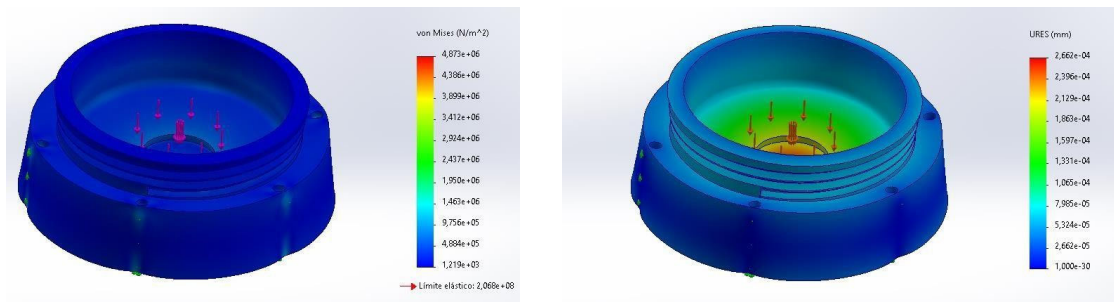
Para enfrentar las cargas a las que será sometida la superficie inferior de la copa, se implementó un disco de desgaste en los puntos de contacto de las tres bolas. Este disco es reemplazable, dado que se desgasta naturalmente con el uso del equipo.

4.4.2.2 Análisis de Elementos Finitos. El análisis de elementos finitos es un paso esencial en la ingeniería para evaluar la respuesta mecánica del componente ante cargas específicas. Este enfoque implica la subdivisión del modelo tridimensional en elementos finitos más pequeños, permitiendo un análisis detallado de su comportamiento bajo diversas situaciones.

En este proceso, se incorporan datos sobre las propiedades mecánicas del acero inoxidable, como su módulo de elasticidad, límite de fluencia y coeficiente de Poisson. Estos parámetros son cruciales para comprender la reacción del material ante las cargas aplicadas, tal como se observa en la figura 20.

Figura 9.

Análisis de elementos finitos SolidWorks, esfuerzo y deformación.



Nota: Análisis de esfuerzo y deformación con ayuda de elementos finitos usando software cat SolidWorks

Al examinar los resultados derivados de este análisis, se evidenció que el esfuerzo máximo experimentado por la pieza alcanza los $4,873e+06$ N/m², cifra que se sitúa por debajo del límite elástico del material. Además, se registró una deformación máxima de $2,662e-04$ mm. Este conjunto de datos indica que la pieza posee una resistencia satisfactoria frente a los esfuerzos a los que ha sido sometida.

4.4.3 Sujeción de Probetas

4.4.3.1 Recipiente de probetas. Las probetas utilizadas según la norma ASTM consisten en bolas de acero estándar AISI No E-52100, las cuales están compuestas por una aleación de cromo. Estas bolas tienen un diámetro de 12.7 mm y se clasifican como grado 25 EP, lo que implica que han sido sometidas a un proceso adicional de pulido para alcanzar una superficie extra pulida. Esta característica física asegura una mayor uniformidad y precisión en las mediciones realizadas durante los ensayos.

Además, de sus características físicas, las bolas de acero AISI No E-52100 también presentan una composición química específica. Están compuestas principalmente por una aleación de cromo, con un contenido típico de aproximadamente 1% de carbono, 1,5% de cromo y trazas de otros elementos como silicio, manganeso y fósforo. Esta composición química proporciona a las bolas de acero una alta resistencia, dureza y capacidad para soportar cargas y desgaste durante los ensayos y pruebas mecánicas. Además, el contenido de cromo contribuye a su resistencia a la corrosión, lo que las hace adecuadas para aplicaciones en ambientes exigentes.

Durante el análisis de las dimensiones que ocupan las 4 probetas dispuestas en forma tetraédrica, se registraron los siguientes datos:

Figura 10.

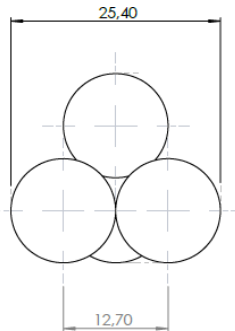
Forma tetraédrica de las esferas.



El espacio mínimo requerido para contener las 4 probetas fijas es de 27.365 mm de diámetro y 12.7 mm de altura.

Figura 11.

Planos SolidWorks de las esferas

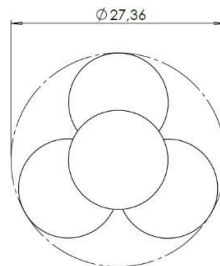


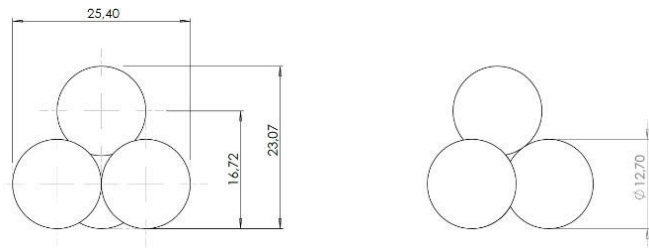
Para permitir una adecuada libertad de movimiento, se consideró un espacio adicional equivalente a dos veces el diámetro nominal de las probetas (25.4 mm) y 1.5 veces su altura (19.05 mm). Esto se debe a la necesidad de asignar espacio adicional para el disco utilizado como centro de las probetas.

En consecuencia, se determinaron las siguientes dimensiones para el interior del contenedor de las probetas: un diámetro de 70 mm y una altura de 17.70 mm. Estas dimensiones permitirán alojar las cuatro probetas en una disposición tetraédrica, garantizando un espacio suficiente para su correcta ubicación y movimiento durante los ensayos.

Figura 12.

Planos SolidWorks de las esferas.





4.4.4 Volumen del Lubricante y/o grasa

Para saber el volumen requerido en el ensayo de las cuatro bolas es necesario ir a la norma ASTM D4172 – 21 que habla sobre las características preventivas del desgaste del fluido lubricante, en la sección 10 referente al procedimiento dice que el lubricante y/o aceite debe estar por lo menos 3 mm por encima de las bolas inferiores. Partiendo desde esta información procedemos a realizar los cálculos de la cantidad de lubricante que se debe usar para cada prueba.

Figura 13.

Vista de sección frontal.



Entonces para saber el volumen total

$$V_{total} = V_c - V_b - V_a$$

Donde;

V_c = volumen de la copa

V_b = volumen de las bolas

V_a = Volumen de la arandela de sujeción

Entonces para hacer el cálculo del volumen de la copa, se parte del principio de que las bolas deben estar sumergidas por lo menos 3 mm de lubricante.

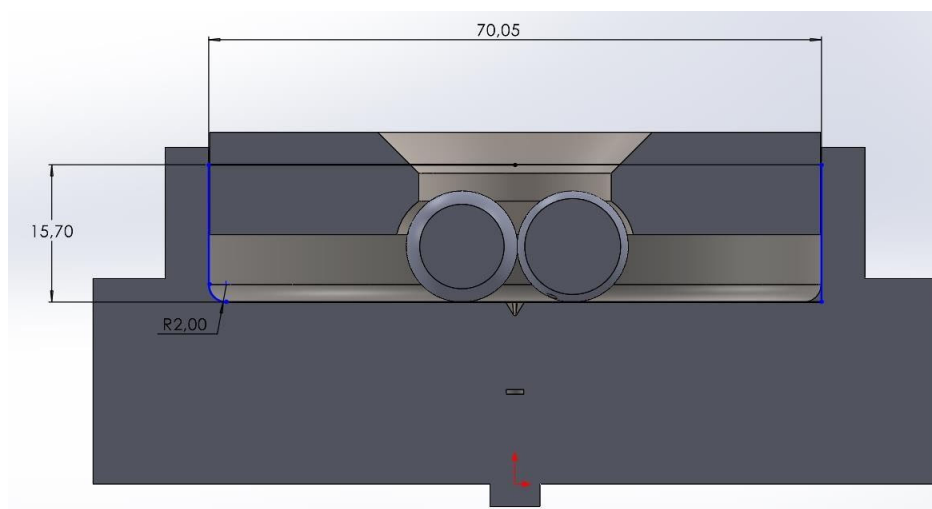
$$\varnothing_{\text{bolas}} = 12.7 \text{ mm}$$

$$h_{\text{copa}} = 12.7 [\text{mm}] + 3 [\text{mm}]$$

$$h_{\text{copa}} = 15.7 [\text{mm}]$$

Figura 14.

Medidas internas de la copa.



4.4.4.1 Volumen de la Copa. Para calcular el volumen de la copa se puede ver que tiene una forma cilíndrica con redondeos en la parte inferior.

$$V_c = V_{\text{cilindro}} - \text{región redondeada}$$

$$V_{\text{cilindro}} = V = \pi r^2 \cdot h$$

Donde;

$$r = 35.025 \text{ [mm]}$$

$$h = 15.7 \text{ [mm]}$$

$$V_{\text{cilindro}} = 60420,68 \text{ [mm}^3\text{]}$$
$$\text{región redondeada} = 186.36 \text{ [mm}^3\text{]}$$

$$V_c = 60234.32 \text{ [mm}^3\text{]}$$

4.4.4.1.1 *Volumen de las Bolas.*

$$V_{\text{Esfera}} = \frac{4}{3} \pi r^3$$

$$V_{\text{Esfera}} = 1072.531 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Como son tres bolas se debe multiplicar por tres para obtener el V_b .

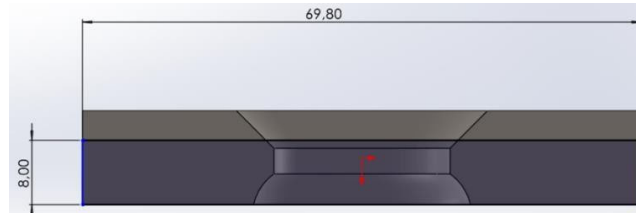
$$V_b = 1072.531 * 3$$

$$V_b = 3217.592 \text{ [mm}^3\text{]}$$

4.4.4.1.2 *Volumen de la Arandela de Sujeción.* En el ensamble la región de la arandela que alcanza a estar en contacto con el lubricante es de 8 mm aproximadamente.

Figura 15.

Dimensiones de la arandela.



Por lo cual hablando sobre el cálculo del volumen de la zona inferior de la arandela. Dado que la altura de la arandela es de 8 mm y parece haber un cambio en su geometría en esa sección, es posible que estemos tratando con una arandela cónica o con forma troncocónica. El cálculo del volumen de una figura troncocónica implica la utilización de una fórmula específica.

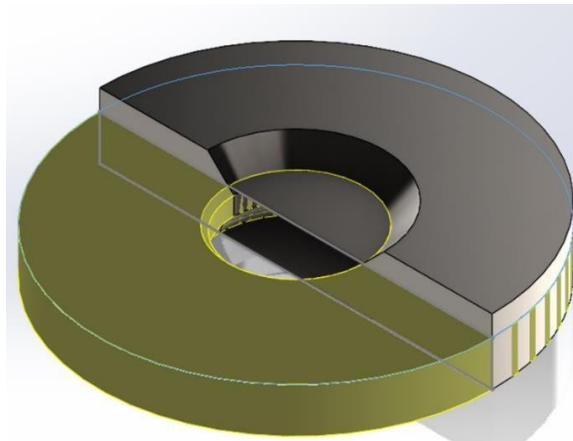
La fórmula general para calcular el volumen de una figura troncocónica es:

$$V = \frac{1}{3}\pi h(R^2 + r^2 + Rr)$$

Donde:

- V es el volumen de la figura troncocónica.
- π es una constante matemática que es aproximadamente igual a 3.14159.
- h es la altura de la figura troncocónica, que en este caso es 8 mm.
- R es el radio de la base mayor de la figura troncocónica.
- r es el radio de la base menor de la figura troncocónica.

Para calcular el volumen de la zona inferior de la arandela, necesitamos conocer los valores de R y r (los radios de las bases). Estos valores pueden variar dependiendo de la geometría específica de la arandela en esa sección. Una vez tengamos esos valores, podremos aplicar la fórmula para calcular el volumen de manera precisa.

Figura 16.*Volumen que ocupa la arandela*

$$V_a = 27098.05 \text{ [mm}^3\text{]}$$

4.4.4.1.3 *Volumen total.*

$$V_{TOTAL} = V_c - V_b - V_a$$

$$V_{TOTAL} = 60234.32[\text{mm}^3] - 3217.592[\text{mm}^3] - 27098.05 [\text{mm}^3]$$

$$V_{TOTAL} = 29918.678 [\text{mm}^3] \approx 30.000 [\text{mm}^3]$$

4.5. Diseño de los Componentes de la Máquina

Este capítulo se habla de los parámetros fijados en la máquina siguiendo la norma, diseño y construcción de la copa para los ensayos; la recopilación de los datos obtenidos y la comparación de las evaluaciones realizadas para los diferentes lubricantes.

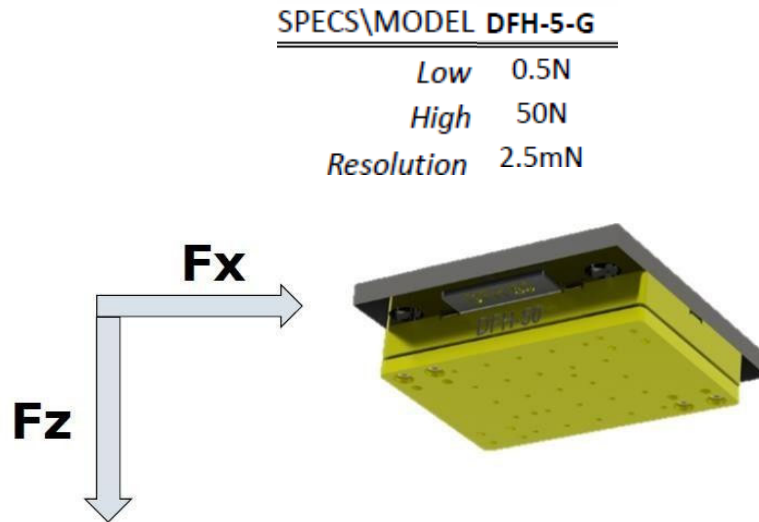
4.5.1 *Adaptación de la Máquina para el Ensayo*

A pesar de la ausencia de una norma estandarizada que defina el procedimiento preciso del montaje de la máquina para este ensayo, se ha establecido un enfoque de montaje de la máquina generalmente aceptado. La implementación de esta prueba requiere una cuidadosa consideración de los parámetros clave y la adaptación para esta máquina. En esta tesis, se examinará a detalle el ensayo de las cuatro bolas, explorando los factores influyentes y proporcionando una guía práctica para el montaje y la ejecución de este esencial en el campo de lubricación y desgaste.

El tribómetro utilizado para el ensayo de las cuatro bolas es un equipo especializado fabricado por la empresa Bruker. Con el fin de realizar el ensayo de la manera más efectiva, se llevó a cabo una adaptación de la máquina siguiendo los siguientes pasos:

4.5.2 Configuración de la Máquina. La configuración adecuada de la máquina tribológica es un aspecto crucial para garantizar resultados precisos y confiables en el ensayo. En este estudio, se siguió un riguroso proceso de calibración y configuración del tribómetro, en línea de las normas ASTM D4172-21 y ASTM D2266, para cumplir con los requisitos establecidos y asegurara una ejecución óptima del ensayo.

En primer lugar, se ejecutaron los parámetros de cargas, velocidad y temperatura de acuerdo con las especificaciones del ensayo. La carga aplicada sobre la bola superior es de gran importancia, ya que determina la precisión de contacto y la magnitud de las fuerzas involucradas. Para lograr la carga consistente y precisa, se usó el sensor DFH-5.0 aunque con este solo podemos garantizar una carga máxima de 50 N. además, se tuvieron en cuenta factores como la geometría de las bolas y la lubricación para garantizar una distribución uniforme de la carga durante el ensayo.

Figura 17.*Sensor de carga*

Nota: Tomada de ((S. f.). Recuperado 25 de septiembre de 2023)

En cuanto a la velocidad de rotación, se estableció una velocidad constante y controlada para cada prueba, asegurando así condiciones de funcionamiento estandarizadas. Esto es esencial para la reproducibilidad de los resultados y la comparación entre diferentes lubricantes y condiciones de prueba. La velocidad de rotación se seleccionó cuidadosamente en función de la aplicación específica y las condiciones operativas a simular. Esto se llevó a cabo con dispositivo rotatorio ROT- DRIVE

Figura 18.*ROT- DRIVER*

Especificaciones técnicas del accionamiento rotativo	
Velocidad	0,1 a 5.000 rpm
máx. Par máx.	>5 Nm a 100 rpm, 2,5 Nm a 5000 rpm
Carga	2.000 norte



Nota: Tomada de ((S.f.). Recuperado 25 de septiembre de 2023)

Además de la carga y la velocidad, la temperatura también desempeña un papel importante en el ensayo de las cuatro bolas. Como la máquina tribológica no cuenta equipado un sistema de control de temperatura que permita mantener una temperatura constante durante del ensayo. Por lo cual se calienta el lubricante en un molde a baño maría con ayuda de una resistencia hasta alcanzar la temperatura deseada con una tolerancia mayor para la recomendada por la norma para evitar que durante el montaje baje la temperatura de 75 grados antes de iniciar la prueba, ya que el material de la copa diseñada es de acero inoxidable y sellada con una tapa lo cual podemos garantizar que la temperatura disipada afecte las condiciones de temperatura establecidas para el ensayo.

Para para calentar el lubricante se usó un recipiente sumergido para desarrollarlo mediante un baño maría junto con un agitador para garantizar que el lubricante se caliente de forma homogénea evitando así gradientes de calor que me puedan comprometer los resultados obtenidos.

4.6. Selección del Lubricante

En las pruebas se usó un lubricante de la empresa lubry de referencia caltek copas roja la cual es se trata de una sustancia grasosa con una textura suave y de un color roja. Esta sustancia se compone principalmente de jabón de calcio, que se obtiene mediante un proceso químico

conocido como saponificación. En dicho proceso, se combinan un ácido graso derivado de la palma con hidróxido de calcio, los cuales se disuelven en bases lubricantes de alta pureza. Además, se ha enriquecido con aditivos que previenen la formación de herrumbre, la corrosión y la oxidación. Producida en consistencia: NLGL 2, esto hace referencia a que tan fluido puede ser este lubricante en este caso es blanda. Recomendada para engrase de equipos automotores, industriales, agrícolas, cojinetes planos, mandriles de máquinas herramientas, resistente al agua, con temperaturas de trabajo que no excedan los 70°C.

4.7. Cálculos

4.7.1. Cicatriz o Huellas Producidas por Desgaste

El ensayo de las cuatro bolas es un método utilizado para evaluar las propiedades de fricción y desgaste de los lubricantes y materiales lubricados. Los resultados obtenidos de este ensayo dependen de varios factores, incluidas las condiciones específicas en las que se realiza la prueba, como la carga aplicada, la velocidad de rotación y la temperatura.

En el ensayo de las cuatro bolas con la medición del diámetro de la cicatriz o huella de desgaste, se persigue principalmente la evaluación de la capacidad intrínseca de un lubricante o material lubricado para resistir el fenómeno de desgaste en condiciones rigurosas de carga y fricción. La cuantificación del diámetro de la cicatriz o huella de desgaste representa una métrica crítica que arroja luz sobre la eficacia del lubricante en términos de su capacidad para preservar la integridad de las superficies metálicas y mitigar el desgaste en entornos caracterizados por altas fuerzas de presión.

Para llevar a cabo esta medición y obtener resultados significativos, se recopilan datos específicos y se realizan cálculos para evaluar el desgaste. Algunos de los aspectos clave que se recopilan y calculan son:

4.7.2. *Diámetro Promedio de la Cicatriz o Huella de Desgaste*

Después de completa el ensayo, se mide el diámetro de la cicatriz o huella de desgaste en el espécimen de muestra utilizando un equipo de medición adecuado, como un calibrador o un microscopio. Este es el resultado principal que se busca obtener.

Entonces para el diámetro promedio de la huella de desgaste se toman las tres bolas inferiores se hace un promedio de cada una de las huellas, como son tres bolas por cada prueba este diámetro se suma las tres y se divide en tres.

$$\varnothing \text{ huella promedio} = \frac{\varnothing 1 + \varnothing 2 + \varnothing 3}{3}$$

4.7.3. *Área de la cicatriz o huella de desgaste*

El área de desgaste se puede calcular el área de la cicatriz o huella de desgaste. Esto puede hacerse utilizando la fórmula para el área de un círculo, ya que la huella generalmente es circular:

$$\text{Area de la cicatriz} = \pi * \left(\frac{\varnothing \text{ huella promedio}^2}{2} \right)$$

Este valor se utiliza para calcular el volumen de desgaste, que a su vez proporciona información importante sobre el rendimiento del lubricante.

4.7.4. *Profundidad de la huella de desgaste*

La profundidad de la cicatriz o huella en el ensayo de las cuatro bolas es una medida promedio de las tres bolas inferiores que indica cuán profundamente el material de las bolas ha sido desgastado o deformado debido a la fricción y la carga aplicada durante el ensayo. Esta profundidad se mide perpendicularmente desde la superficie original no desgastada del material hasta el punto más bajo de la huella de desgaste. Para determinar la altura a la que se encuentra la huella de desgaste se utilizara los datos anteriormente obtenidos de los diámetros promedios en

cada prueba, para así obtener una recta que corta dos puntos de mi circunferencia, basado en este principio se encuentra una línea que se extiende desde una circunferencia en un plano cartesiano, puedes utilizar el teorema de Pitágoras. En este caso, el radio de la circunferencia (r) actúa como la hipotenusa de un triángulo rectángulo, y la distancia desde el centro de la circunferencia hasta la línea es uno de los catetos. La altura que estás buscando será el otro cateto. Esta es la ecuación:

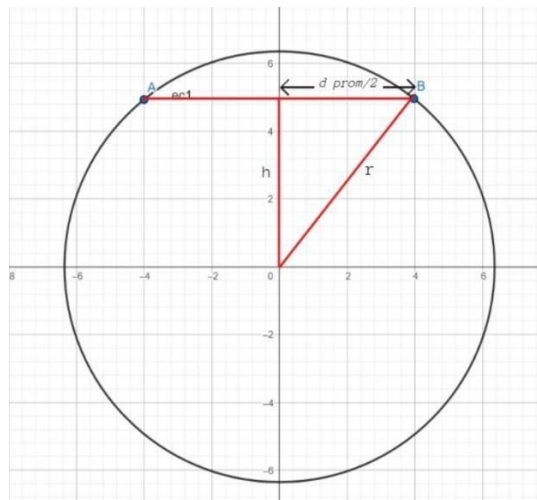
$$x^2 + h^2 = 6.35^2$$

Donde:

- r es el radio de la circunferencia de las esferas de acero al cromo (6.35 mm).
- x es la distancia desde el centro de la circunferencia hasta la línea ($d_{prom}/2$).
- h es la altura que estás buscando.

Figura 19.

Diagrama de Profundidad de huella de desgaste



Entonces la profundidad de la huella de desgaste va a ser:

$$\text{profundidad de huella} = 6.35 - h$$

4.7.5. *Volumen de Desgaste*

El volumen de desgaste en el ensayo de las cuatro bolas es una medida que indica cuánto material ha sido desgastado o removido de una superficie, particularmente de una bola de acero al cromo, debido a la fricción y la carga aplicada durante el ensayo. Esta medida es fundamental para evaluar la capacidad de un lubricante o aceite lubricante para prevenir o reducir el desgaste en condiciones específicas. Donde se utiliza en principio el modelo de Archard para calcular el volumen desgastado.

$$K = \frac{k_a}{H} = \frac{V_d}{S W}$$

$$S = 2N_r \delta$$

Entonces para calcular el volumen desgastado se utilizará la fórmula del volumen de desgaste. Para ello, necesitas medir la profundidad de la cicatriz (que se forma en las bolas inferiores) y el diámetro de las esferas. Utilizaremos la fórmula del volumen de un cilindro:

$$volumen\ desgastado = \pi * \left(\frac{\emptyset\ huella}{2} \right)^2 * \theta$$

Donde:

- \emptyset huella es el diámetro promedio de la cicatriz en las bolas inferiores
- θ es la distancia recorrida

Ahora para poder calcular la velocidad angular (ω) y el tiempo (t) en segundos, puedes calcular el ángulo total recorrido o distancia recorrida (θ) usando la fórmula:

$$\omega = \frac{\theta}{t}$$

Como mencionamos anteriormente, la velocidad angular (ω) se mide en radianes por segundo (rad/s). también se conoce las revoluciones por minuto que se usaron durante los ensayos por lo tanto se aplica la siguiente formula:

Pero tenido como no sabemos los datos completos para hallar por este método, entonces se adapta

esta ecuación con respecto a los datos que ya hemos calculado y para superficies redondas. Es así como llegamos a esta fórmula:

$$V_d = \frac{\pi}{6}h\left(\frac{3d^2}{4} + h^2\right)$$

Donde:

- V_d es el volumen de desgaste
- h es la altura de profundidad
- d es el radio de las esferas (6.35 mm).

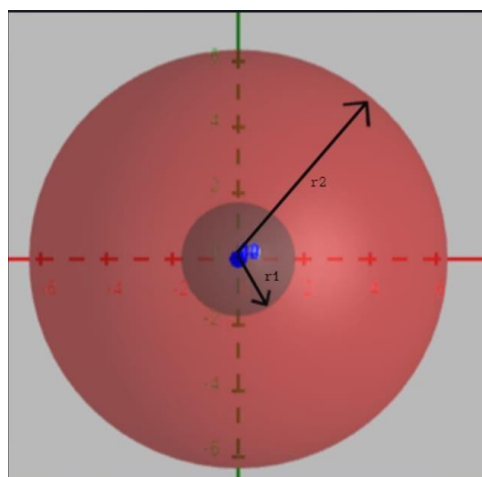
De esta forma obtendremos el volumen desgastado durante cada ensayo.

Otra forma para calcular el volumen desgastado aproximadamente se puede hacer mediante coordenadas cilíndricas. Viendo desde una vista superior la huella de desgaste y la bola de acero al cromo tendríamos una imagen a la que aparece en la figura 24. Esto con el fin de definir los límites de radio.

$$X^2+Y^2=6.35^2$$

Figura 20.

Vista en eje xy del círculo (huella de desgaste)

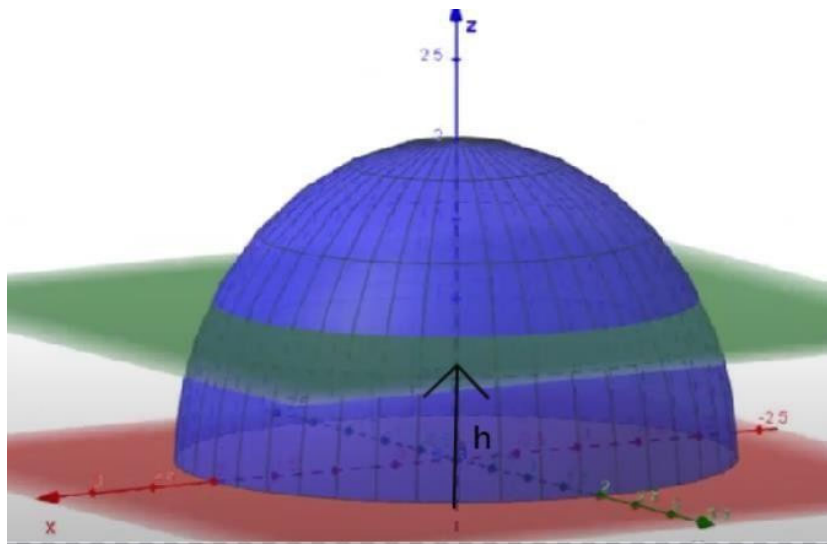


Al transformar a un plano tridimensional obtenemos la ecuación de la esfera $X^2+Y^2+Z^2=6.35^2$ y de un plano $z=h$ que me cortara la esfera, con este plano podemos definir los límites que entre la parte superior de la esfera y el plano z es la altura desde el centro de la esfera hasta el plano de corte.

Ya que la región es simétrica alrededor del eje z . Las coordenadas cilíndricas se definen como r , θ , y z .

Figura 21.

Plano de corte



- r varía desde 0 hasta el radio de la circunferencia de la intersección de la esfera que en este caso es 6.35 y el plano, que es r_1 .
- θ varía desde 0 hasta 2π , ya que estamos considerando una sección completa.
- z varía desde 0 (la base de la esfera) hasta h (la altura del plano de corte donde se interceptan).

De esta obtenemos que para calcular el volumen de desgaste es necesario hacer una integral triple.

$$V = \iiint D \, dV$$

Entonces, la integral triple se vería así:

$$Volumen\ desgastado = \int_0^{2\pi} \int_0^R \int_0^h r \, dr \, d\theta \, dz$$

4.7.6. *Calcular el Índice de Desgaste*

El índice de desgaste es una métrica importante en la evaluación de la capacidad de un lubricante o grasa lubricante para prevenir o reducir el desgaste en condiciones específicas. Este índice proporciona información valiosa sobre la eficacia de un lubricante en la protección de superficies metálicas sometidas a fricción y carga.

Para calcular este índice es muy sencillo se divide el volumen de desgaste por la carga aplicada y la distancia recorrida. La fórmula general es:

$$\text{Índice de Desgaste (mg/Nm)} = \frac{\text{Volumen de Desgaste en mm}^3}{(\text{Carga Aplicada en N} * \text{Distancia Recorrida en m})}$$

Sabiendo que la distancia recorrida es $d = \theta * r$ se reemplaza en la ecuación anterior y queda de la siguiente manera:

$$\text{Índice de Desgaste (mg/Nm)} = \frac{\text{Volumen de Desgaste en mm}^3}{(\text{Carga Aplicada en N} * T)}$$

5. Resultados y Análisis

Este capítulo se trata de la formación de datos a partir de las pruebas realizadas, análisis de las huellas obtenidas por esta misma, la evaluación entre alternativas que cumplieron con los objetivos, la adaptación de la maquina UMT tribolab, el proceso de diseño y construcción de la copa, y la comparación entre los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas con una variación de carga y lubricante.

5.1. Resultados de las Pruebas

La prueba está dividida en cuatro ensayos con diferentes con diferente carga, con o sin lubricante, los cuales se realizará un comparativa de los resultados obtenidos y así tener un criterio sobre la importancia de utilizar lubricantes para disminuir el desgaste y fricción en condición de operación.

A continuación, se mostrará un poco más detallado cada prueba y sus parámetros.

5.1.1. Prueba #1: condiciones sin lubricación

La primera prueba se realizó bajo las siguientes condiciones:

Tabla 3.

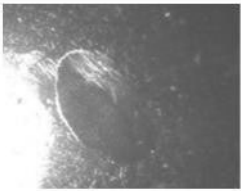

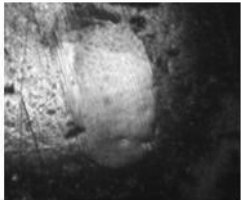
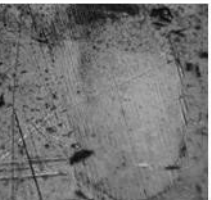
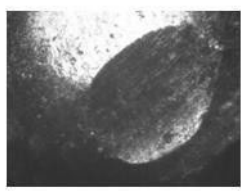
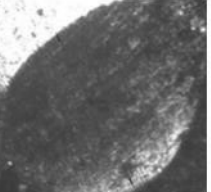
Prueba 1

Carga	10 [N]
Lubricante	No
Tiempo	1 hora
Temperatura	25 °C

De esta primera prueba se obtuvieron los datos de las tres bolas inferiores de acero al cromo. Estas bolas luego de la prueba se limpiaron para eliminar cualquier tipo de residuo y se llevaron a un microscopio, Se preparo la muestra cuidadosamente se colocó la esfera sobre el porta muestras y con ayuda del software uEye Cockpit. Las imágenes de huellas de desgaste con ayuda del microscopio fueron las siguientes:

Tabla 4.

Prueba 1 (fotografías)

ENSAYO	50X	100X
N_°1		
#BOLA1		
#BOLA2		
#BOLA3		

Se observo en las huellas de desgaste que la bola superior con las bolas inferiores, se produjeron unas huellas muy similares en forma y medidas, esto quiere decir, que los puntos de contacto durante la prueba fueron los esperados.

Se tomaron medidas con ayuda de software de uEye Cockpit y se realizó una conversión de unidades para tener los diámetros en micras y los datos obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 5.

Medidas en el microscopio

BOLA	MEDIDAS EN EL MICROSCOPIO
	diametro promedio[μm]
1	430
2	383.5
3	385

5.1.2. Prueba #2: Variación en la carga

La segunda prueba, se incrementó la carga a 15 N sin la aplicación de lubricante. Esto permitió comparar el desgaste en condiciones de carga diferentes con respecto a la prueba anterior, condiciones que podemos observar en la tabla 6.

Tabla 6.

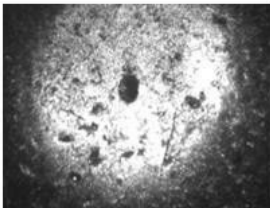
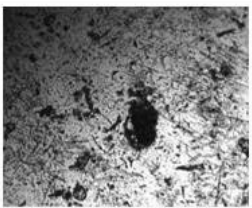
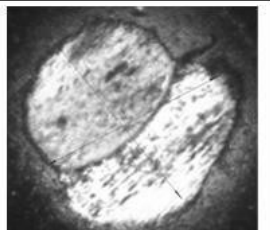
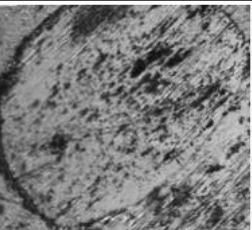
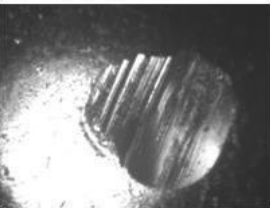

Prueba 2

Carga	15 [N]
Lubricante	No
Tiempo	1 hora
Temperatura	25 °C

Se recopilaron datos detallados y se analizaron las huellas de desgaste para obtener información relevante sobre el comportamiento tribológico. Como se puede apreciar en la tabla 7.

Tabla 7.

Prueba 2 (fotografías)

ENSAYO	50X	100X
N_°3		
#BOLA1		
#BOLA2		
#BOLA3		

Se recopilaron los siguiente datos y medidas de las huellas de desgaste.

Tabla 8.*Medidas en el microscopio*

BOLA	MEDIDAS EN EL MICROSCOPIO
	diametro promedio[μm]
1	655
2	350
3	490

5.1.3. Prueba #3: Evaluación con lubricante

En esta prueba se introdujo el uso de un lubricante específico (“caltek copas roja”) con una carga de 10 N. Se detalla las propiedades y composición de este lubricante y se comparan los resultados con las pruebas anteriores, Como se observa en la tabla 9.

Tabla 9.*Prueba 3*

Carga	10 [N]
Lubricante	SI
Tiempo	1 hora
Temperatura	25 °C

Se realizaron mediciones y análisis de las huellas de desgaste para evaluar la eficacia del lubricante en la reducción de desgaste y fricción.

Tabla 10.

Prueba 3 (Fotografías)

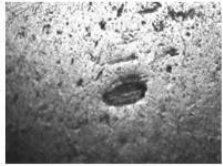
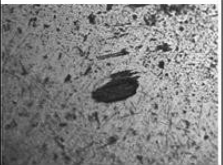

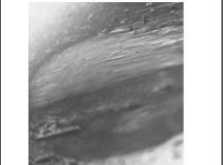

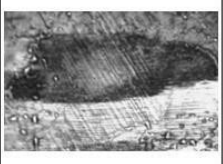
ENSAYO	50X	100X
N_°2		
#BOLA1		
#BOLA2		
#BOLA3		

Tabla 11.

Medidas en el microscopio

BOLA	MEDIDAS EN EL MICROSCOPIO
	diametro promedio[μm]
1	375
2	275
3	85

5.1.4. Prueba #4: Evaluación con lubricante a mayor carga

La cuarta prueba se realizó con el mismo lubricante que la prueba anterior, Esto permitió evaluar el comportamiento del lubricante en condiciones más exigentes. Las condiciones de la prueba se pueden observar en la tabla 12.

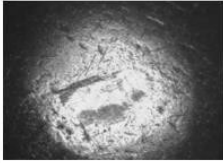
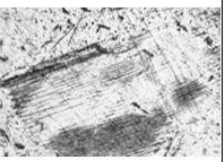

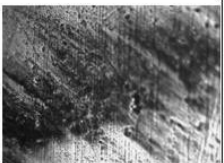
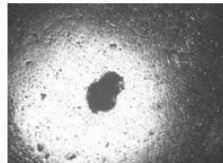
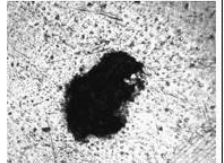
Tabla 12.*Prueba 4*

Carga	15 [N]
Lubricante	SI
Tiempo	1 hora
Temperatura	25 °C

Se llevaron a cabo mediciones y análisis de las huellas de desgaste para determinar la capacidad del lubricante para resistir cargas más elevadas.

Tabla 13.

Prueba 4 (fotografías)

ENSAYO	50X	100X
N_°3		
#BOLA1		
#BOLA2		
#BOLA3		

Se tomaron medidas con ayuda de software de uEye Cockpit y se realizó una conversión de unidades para tener los diámetros en micras y los datos obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 14.

Medidas en el microscopio

BOLA	MEDIDAS EN EL MICROSCOPIO
	diametro promedio[μm]
1	210
2	450
3	85

5.2. Análisis

El arranque de la maquina tribológica de cuatro bolas obligo a la ejecución de numerosas pruebas, que arrojaron los siguientes resultados. Con la cual se obtuvieron los siguientes resultados.

5.2.1. Pruebas con lubricante

De esta prueba se obtuvieron los datos de las tres bolas inferiores de acero al cromo. Estas bolas luego de la prueba se limpiaron para eliminar cualquier tipo de residuo y se llevaron a un microscopio, Se preparo la muestra cuidadosamente se montó la esfera sobre el porta muestras y con ayuda del software uEye Cockpit.

Tabla 15.

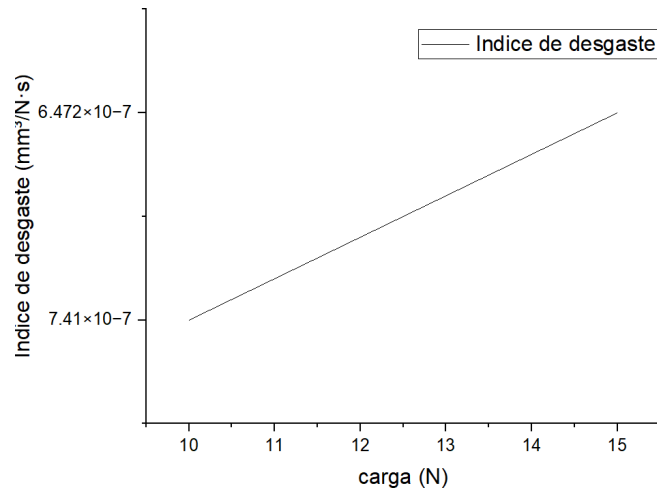
Resultados con lubricante seleccionado

Ensayo	Carga	diámetro <i>prom</i>	Área Profundidad De desgaste	Volumen De desgaste	índice de desgaste	
	<i>N</i>	<i>mm</i>	<i>mm²</i>	<i>mm</i>	<i>mm³/N·s</i>	
#1	10	0.2925	0.0695519	0.0016844	0.00207	5.75×10 ⁻⁸
#2	15	0.3348	0.0784416	0.0022069	0.002482	4.596×10 ⁻⁸

Con dichas condiciones se presentó una resistencia a la carga aplicada como se puede apreciar en las marcas de desgaste.

Figura 22.

Comportamiento del índice de desgaste respecto a la carga



La figura 22. proporcionó una clara visualización entre los valores del índice de desgaste y la carga. se observó que el lubricante se desempeñó de acuerdo con las previsiones, lo que sugiere un resultado satisfactorio en términos de su resistencia bajo carga, ya que significa que el lubricante pudo mantener su eficacia y propiedades lubricantes incluso cuando se sometió a condiciones de estrés. Además, la pendiente positiva indica una relación directa entre la carga aplicada y el índice de desgaste. En otras palabras, a medida que la carga aumenta, también lo hace el desgaste, lo que es coherente con lo que se esperaría en un lubricante sometido a cargas crecientes.

5.2.2. Prueba sin Lubricante

Tabla 16.

Resultados sin lubricante

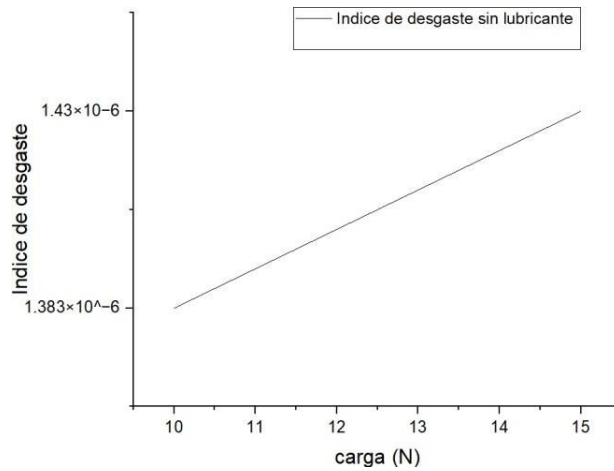
Ensayo	Carga	diámetro <i>prom</i>	Área Profundidad de desgaste	De	Volumen De desgaste	índice de desgaste
#1	10	0.3995	0.124784	0.003142515	0.004978	1.383×10^{-7}
#2	15	0.49833	0.194412	0.004890389	0.0152	1.123×10^{-7}

En este ensayo, al igual que en el anterior, se mantuvieron constantes las condiciones de temperatura, carga y velocidad. La diferencia radica en que en este caso no se aplicó lubricante, con el propósito de evaluar la variación y comportamiento del índice de desgaste en comparación con los resultados obtenidos con el lubricante previamente seleccionado. Asimismo, se procedió a analizar las marcas de desgaste utilizando un microscopio, lo que condujo a la obtención de los siguientes resultados.

Encontrándose un comportamiento lineal visualizado en la figura 23.

Figura 23.

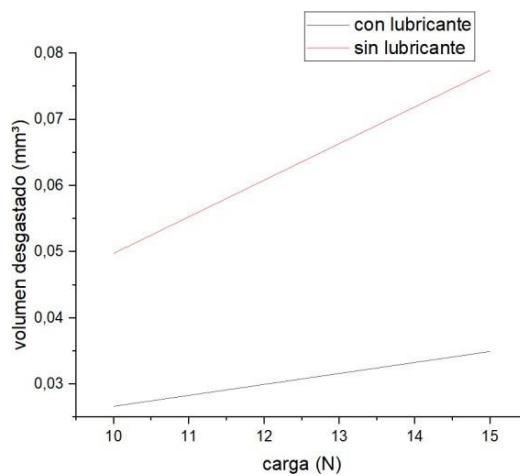
Índice de desgaste sin lubricante



En la figura 23, se representa una comparativa del comportamiento del volumen desgastado vs la carga aplicada durante las pruebas. Haciendo una comparativa de las dos graficas obtenidas se puede apreciar un incremento de la pendiente, lo que indica una menor resistencia al desgaste.

Figura 24.

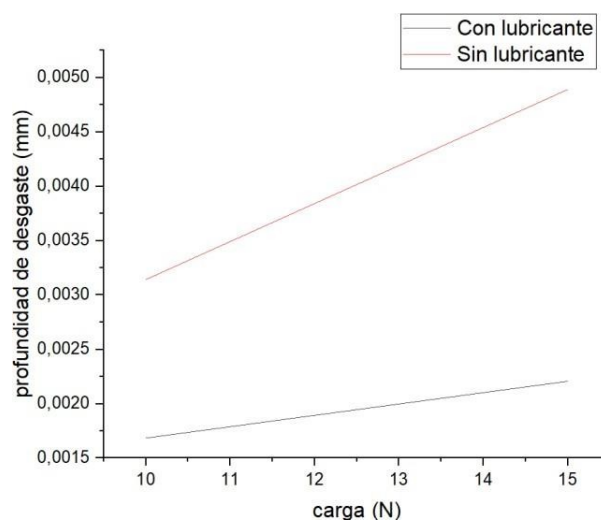
volumen de desgaste vs carga



Finalmente, en la figura 24, se muestra la comparativa del comportamiento de profundidad de desgaste durante las pruebas realizadas a diferente carga. Con estos datos se puede calcular la tasa de desgaste que es una medida que relaciona la cantidad de material desgastado que ocurre en un material o componente durante un período específico de tiempo.

Figura 25.

Profundidad de desgaste vs carga



La gráfica representa la relación entre la profundidad de desgaste y la carga aplicada durante los ensayos. lo que indica una correlación directa entre la carga y la profundidad de desgaste. A medida que la carga aumenta, la profundidad de desgaste también aumenta de manera proporcional

Este comportamiento es consistente con la teoría tribológica, donde se espera que mayores cargas generen una mayor interacción entre las superficies y, por lo tanto, un mayor desgaste. Sin embargo, es crucial destacar que la tasa de aumento no es completamente uniforme, lo que sugiere que otros factores, como la distribución de la carga y las propiedades de los materiales, también pueden estar influyendo.

6. Conclusiones

El prototipo cumple con los estándares, ya que produce huellas de desgaste por ende se pueden realizar estudios sobre el desgaste que se produce en las superficies con y sin lubricante, Estos hallazgos proporcionan una base sólida para la mejora continua de componentes mecánicos y sistemas tribológicos, con el objetivo de optimizar la eficiencia y durabilidad de maquinaria y equipos en diversos contextos industriales.

- La carga aplicada tiene un impacto directo en el desgaste de los componentes. A mayores cargas, se observa un aumento en el volumen de desgaste. Sin embargo, el lubricante de alto rendimiento demuestra una mayor capacidad para resistir estas cargas, lo que limita el aumento del desgaste en comparación con el lubricante convencional.
- El índice de desgaste más elevado ($1.123 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{s}$, prueba realizada a 15N sin lubricante) en el ensayo de las cuatro bolas refleja una menor resistencia al desgaste. Esto significa que las superficies en contacto tienen una mayor susceptibilidad al desgaste bajo esas condiciones particulares. El índice de desgaste, obtenidos en este ensayo, desempeña un papel crucial al evaluar la capacidad de los lubricantes y materiales para resistir condiciones específicas de desgaste.
- A partir de los resultados obtenidos en el ensayo de las cuatro bolas, se ha establecido una relación clara entre la carga aplicada y el desgaste observado. Esta relación proporciona una base sólida para predecir y calcular el desgaste en pruebas futuras con diferentes cargas y en intervalos de tiempo específicos. Es fundamental destacar que estos cálculos de desgaste son aplicables exclusivamente al tipo de lubricante estudiado en este ensayo, es decir, el lubricante Lubry Caltek.
- En conclusión, al analizar el impacto del lubricante en las huellas de desgaste a través de las gráficas y los datos recopilados, podemos afirmar que su eficacia es evidente. Los resultados revelan una reducción significativa, que oscila entre el 16% y el 34%, en el volumen desgastado. Es importante destacar que la magnitud de esta disminución está directamente relacionada con la carga aplicada en el proceso. Esto resalta la importancia de seleccionar el lubricante adecuado para optimizar la vida útil y el rendimiento de los componentes, así como la necesidad de considerar la carga como un factor crucial en la eficacia de esta solución.

7. Recomendaciones

- Para la realización de ensayos con mayores cargas se recomienda la utilizar del sensor de fricción/carga de alto rango DFH-100G el cual cuenta con una capacidad que se encuentra entre 10 a 1000 N, con una resolución de 50 mN, una suspensión de 20 Kg y un adaptador rígido. Con este sensor Prueba de capacidad de carga extrema esto con el fin de evitar el desgaste severo en condiciones de una alta presión. también se puede realizar el ensayo de soldadura se mide la capacidad del lubricante para evitar que las bolas se suelden o adhieran entre sí debido a la fricción y la presión extrema.
- Se recomienda utilizar un calentador por un tubular o en forma de abrazadera, que se pueda controlar con un sistema PID, el calentador se ubicaría en la parte inferior de la copa e implementar un aislante para proteger los demás elementos externos de la máquina para que no sufra algún daño.
- También se recomienda un de un sensor laser infrarrojo, que se pueda acoplar a un lado mandril, con el fin de que este apunte directamente al lubricante y no otras partes de la copa, esto con el fin de tener unas mediciones más precisas.

Referencias Bibliográficas

- AHMAD, Douri, Samarai. (2012). Effect of load and sliding speed on wear and friction of aluminum–silicon casting alloy. Volume 2. http://www.ijsrp.org/research_paper_mar2012/ijsrp-Mar-2012-37.pdf
- ALDANA, Álvarez, López, Leyva, Peña, Suarez. (2021). Análisis tribológico de ceraspirolíticas para su uso como lubricantes. Tema A2a Materiales: Tribología. https://somim.org.mx/memorias/memorias2021/articulos/A2_75.pdf
- ASTM D2266-01(2015). Standard test method for wear preventive characteristics of lubricating grease (four-ball method). <https://www.astm.org/d2266-01r15.html>
- ASTM. (2022). Standard test method for wear preventive characteristics of lubricating fluid (four-ball method). <https://www.astm.org/d4172-21.html>
- ASTM. (2023). D-4172 prueba de desgaste de cuatro bolas. Máquina de prueba universal, Máquina de prueba de impacto. <https://www.hydraulicuniversaltestingmachine.com/es/astm-d-4172-four-ball-wear-test.html>
- ASTM. (2023). Standard practice for determination of precision and bias data for use in test methods for petroleum products, liquid fuels, and lubricants. <https://www.astm.org/d6300-21.html>
- BRUKER. (2015). UMT-TRIBOLAB_MANUAL-20151123. <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/test-and-measurement/tribometers-and-mechanical-testers/umt-tribolab.html>
- CMCLATAM. (2019). La importancia de la resistencia de la película lubricante. Congreso de Mantenimiento y Confiabilidad. <https://cmc-latam.com/2019/01/17/la-importancia-de-la-resistencia-de-la-pelicula-lubricante/?cv=1>
- COURSEHERO. (2020). formas de evitar el desgaste. Buenas prácticas tribológicas para evitar el desgaste de maquinaria. <https://www.coursehero.com/file/71028095/formas-de-evitar-el-desgastedocx/?cv=1>
- D2266. (2022). ASTM. Standard Test Method For Wear Preventive Characteristics Of Lubricating Grease (Four Ball Method). <https://www.savantlab.com/astm-methods/astm->

- D4172, (2022). ASTM. Standard Test Method For Wear Preventive Characteristics Of Lubricating Fluid (Four Ball Method). <https://www.savantlab.com/astm-methods/astm-d4172-wear-preventive-characteristics-lubricating-fluid-four-ball-method/>
- DÍAZ, Castillo, D. (2007). Tribología: fricción, desgaste y lubricación. 5-18.
<https://profefelipe.mex.tl/imagesnew/4/6/9/5/1/TRIBOLOGIA.pdf>
- DÍAZ. (2007). Laboratorio de tecnología de materiales. Tribología: fricción, desgaste y lubricación.
<https://profefelipe.mex.tl/imagesnew/4/6/9/5/1/TRIBOLOGIA.pdf>
- EUROLAB. (2023). Método de prueba estándar ASTM D2596-20 para medir las propiedades de presión extrema de la grasa lubricante (método de cuatro bolas).
[https://www.eurolab.net/es/testler/malzeme-testleri/astm-d2596-20-yaglama-gresinin-asiri-basinc-ozelliklerinin-olcumu-icin-standart-test-yontemi-\(dort-bilyali-yontem\)/](https://www.eurolab.net/es/testler/malzeme-testleri/astm-d2596-20-yaglama-gresinin-asiri-basinc-ozelliklerinin-olcumu-icin-standart-test-yontemi-(dort-bilyali-yontem)/)
- FIGUEROA, Vite. (2009). Manufactura tribología diseño mecánico. 5-28.
https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/7902/1/2400_tesis_Diciembre_2010_1092832157.pdf
- FIGUEROA. (2010). Diseño mecánico integral y manufactura de los componentes mecánicos de maquina tribológica de cuatro bolas para ensayos lubricados. 29-35.
<http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/7902>
- LESKOW. (2021). Fricción - Concepto, causas, estática, dinámica y ejemplos.
<https://concepto.de/friccion/>
- LUDEMA. (1996). friction wear lubrication, 26-28.
https://nitsri.ac.in/Department/Mechanical%20Engineering/Friction_Wear_Lubrication_A_Textbook_in_Tribology_ISBN0849326850.pdf
- OKS. Grasas. (2023). <https://www.oks-germany.com/es/tribologia/tipos-de-lubricantes/grasas/>
- ORTEGA, Manuel. (1989-2006). Lecciones de Física (4 volúmenes). Monytex. Wikipedia. Resistencia a la rodadura.
https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Resistencia_a_la_rodadura&oldid=143090194
- ROMERO. (2019). Nanotec. <https://www.nanotec.es/tribologia/>

SAUCEDA. (2020). Practica 1 lubricación industrial. <https://vsip.info/practica-1-lubricacion-industrial-pdf-free.html?cv=1>

TRIBONET. (2023). Four ball tester. <https://www.tribonet.org/wiki/four-ball-tester/>

XADO. (2022). Desgaste mecánico, XADO México. <https://xado.mx/que-es-el-desgaste-mecanico/>

Apéndices

Apéndice A. Manual de operación

Este manual tiene como objetivo ayudar al operador a realizar pruebas de no extrema presión de manera segura y efectiva, para obtener los mejores resultados posibles.

Preparación de la máquina

Figura A1.

Preparación de la maquina



Retirar la funda del computador.

Realizar una inspección de 360 grados para revisar la integridad física del equipo y detectar algún daño superficial de los componentes.

Encender el computador [3].

Encender el equipo tribológico UMT Tribolab con el botón rojo ubicado en la parte inferior derecha del equipo [1].

Verificar que las puertas estén cerradas correctamente, revisando los contactos magnéticos de este [4].

Encender los motores con el botón blanco ubicado en la parte inferior izquierda del equipo [2].

Ajustes de parámetros de prueba

Los scripts de prueba son, en esencia, algoritmos diseñados específicamente para ejecutar experimentos de manera automatizada. Estos algoritmos se crean considerando condiciones de prueba particulares y se emplean para llevar a cabo experimentos de manera automatizada. Estos procedimientos implican el control del movimiento relativo entre las muestras en condiciones ambientales y de fuerza específicas, al mismo tiempo que se recopilan datos durante todo el proceso. Los comandos utilizados en estos scripts se dividen en secciones llamadas secuencias. Cada secuencia puede incluir uno o varios pasos, dependiendo de su propósito particular. A continuación, se proporcionan detalles sobre diversas secuencias y pasos, junto con las opciones o parámetros pertinentes para la realización de la prueba y la recopilación de datos correspondientes.

Ingresar al programa desde la pantalla de inicio como se muestra en la figura 28.

Figura A2.

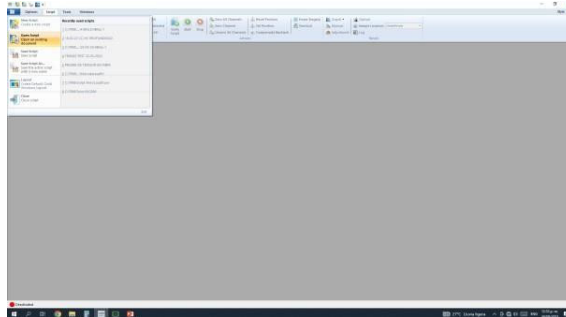
Pantalla principal del computador.



Posterior en el programa nos dirigimos a la barra de herramientas y seleccionamos “Open script”.

Figura A3.

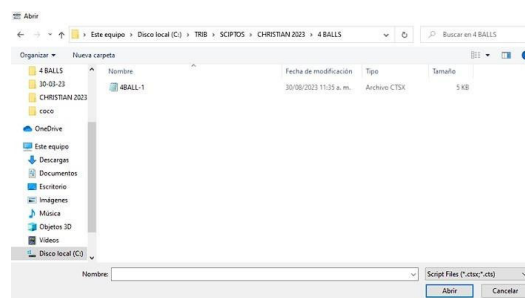
Barra de herramientas UMT.



Buscamos el archivo con el nombre de “4BALL-1”, lo seleccionamos y le damos abrir.

Figura A4.

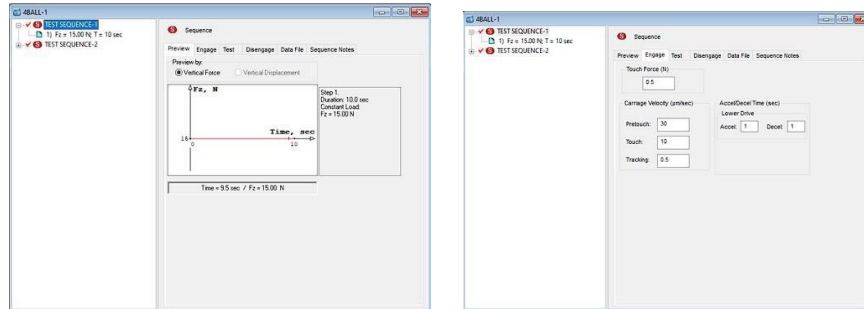
Archivo de script.



se seleccionan los parámetros para generar una precarga en la primera prueba de secuencia el cual llevar el mandril hasta las tres bolas inferiores hasta someterlas a la carga deseada.

Figura A5.

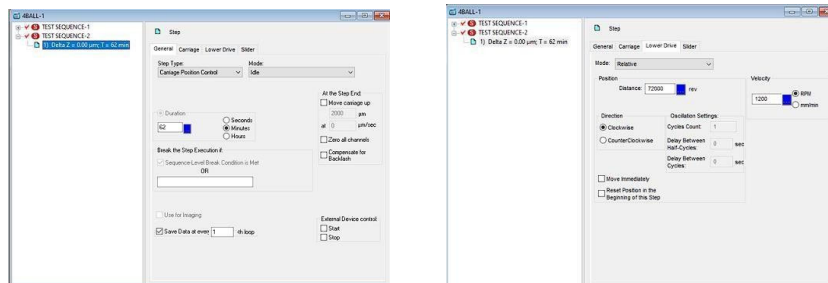
Test sequence-1



Para generar los parámetros de la prueba es importante tener claro los valores que dice según las normas ya mencionadas, como lo son la carga, la velocidad y el tiempo. Los cuales se va a ingresar en la segunda prueba de secuencia como lo podemos ver en la siguiente figura 32.

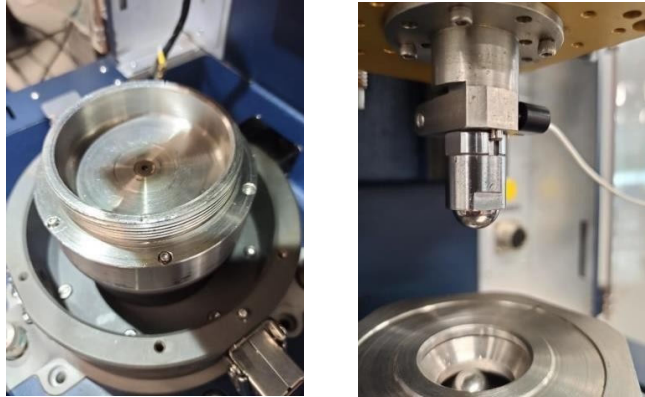
Figura A6.

Test sequence-2



Preparación del recipiente de probetas

Montar la unidad rotatoria ROT-DRIVE según indicaciones del manual de la máquina, sobre este se sujeta el recipiente “copa”.

Figura A7.*Montaje de la copa y mandril*

Limpiar cuidadosamente las cuatro bolas nuevas, como también la copa y la arandela para centrar con un fluido limpiador como antes se mencionó este tiene que ser capaz de limpiar los residuos de la prueba anterior como material pesado y lubricante, este no debe dejar ningún residuo que pueda afectar la prueba, al finalizar hay que secar bien con un paño que no deje pelusas.

Figura A8.*Limpeza de las probetas*

Poner 30000 mm³ de lubricante a ser examinado, previamente calentado a baño maría con ayuda de un recipiente y una resistencia hasta calentarlo a la temperatura deseada, posteriormente colocar las tres esferas inferiores con la arandela para centrar y final mente colocar la tapa

Figura A9.*Aplicación de lubricante*

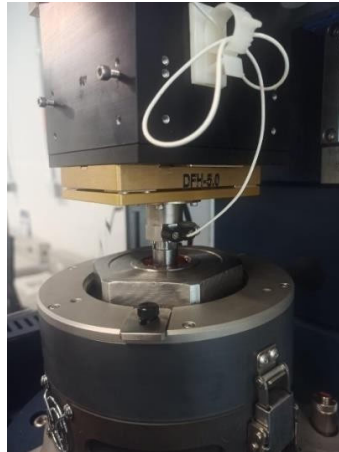
Para que se mantenga una temperatura constante durante la prueba que tarda cada ensayo, se instala una Cámara con aislamiento térmico que se podrá ver en la figura 36.

Figura A10.*Cámara con aislamiento térmico*

Cuando ya todo el montaje fue realizado se procede a ajustar la tapa la cual va a presionar la arandela para centrar logrando así inmovilizar las tres bolas inferiores, así pues, se puede iniciar la prueba, recalando que si las puertas del equipo no están debidamente cerradas no se podrá iniciar la prueba.

Figura A11.

Montaje final



Apéndice B. Análisis de las huellas producidas por desgaste

El ensayo de las cuatro bolas es un método utilizado para evaluar las propiedades de fricción y desgaste de los lubricantes y materiales lubricados. Los resultados obtenidos de este ensayo dependen de varios factores, incluidas las condiciones específicas en las que se realiza la prueba, como la carga aplicada, la velocidad de rotación y la temperatura.

En el ensayo de las cuatro bolas con la medición del diámetro de la cicatriz o huella de desgaste, se persigue principalmente la evaluación de la capacidad intrínseca de un lubricante o material lubricado para resistir el fenómeno de desgaste en condiciones rigurosas de carga y fricción. La cuantificación del diámetro de la cicatriz o huella de desgaste representa una métrica crítica que arroja luz sobre la eficacia del lubricante en términos de su capacidad para preservar la integridad de las superficies metálicas y mitigar el desgaste en entornos caracterizados por altas fuerzas de presión.

Para llevar a cabo esta medición y obtener resultados significativos, se recopilan datos específicos y se realizan cálculos para evaluar el desgaste. Algunos de los aspectos clave que se recopilan y calculan son:

Apéndice C. Diámetro promedio de la cicatriz o huella de desgaste

Después de completa el ensayo, se mide el diámetro de la cicatriz o huella de desgaste en el espécimen de muestra utilizando un equipo de medición adecuado, como un calibrador o un microscopio. Este es el resultado principal que se busca obtener.

Entonces para el diámetro promedio de la huella de desgaste se tomaron los datos anteriores de los diferentes ensayos y se promediaron los diámetros.

Diámetros promedio (μm)

Tabla C1.

Diámetros de huellas.

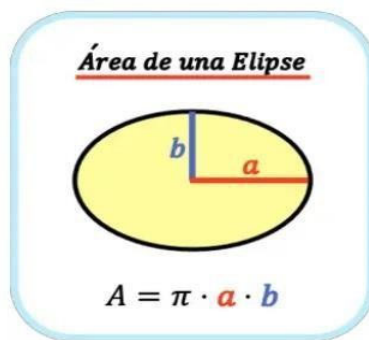
PROMEDIO PRUEBA #1	Horizontal	426.33
	Vertical	372.67
PROMEDIO PRUEBA #2	Horizontal	250
	Vertical	240
PROMEDIO PRUEBA #3	Horizontal	526.67
	Vertical	470

Apéndice D. Área de la cicatriz o huella de desgaste

A partir del diámetro medido, se puede calcular el área de la cicatriz o huella de desgaste. Esto puede hacerse utilizando la fórmula para calcular el área de una elipse ($A=(\pi*a*b)$), donde "a" es uno de los radios (mitad del diámetro horizontal) y "b" es el otro radio (mitad del diámetro vertical).

Figura D1.

Área de una elipse



Nota: Tomado de (Volúmenes, 2021)

Tabla D1.

Áreas promedio de las huellas de desgaste.

		Ø [µm]	r [µm]	
PROMEDIO PRUEBA #1	Horizontal	426.33	213.1667	a
	Vertical	372.67	186.3333	b

$$\text{Área promedio 1} = 124784.235 \mu\text{m}^2$$

		Ø [µm]	r [µm]	
PROMEDIO PRUEBA #2	Horizontal	250	125	a
	Vertical	240	120	b

$$\text{Área promedio 2} = 47123.89 \mu\text{m}^2$$

		Ø [µm]	r [µm]	
PROMEDIO PRUEBA #3	Horizontal	526.67	263.33	a
	Vertical	470	235	b

$$\text{Área promedio 3} = 194412.23\mu\text{m}$$

Prueba #1 sin lubricante 10 N

$$\emptyset_{\text{prom horizontal}} = \frac{(\text{bola h 1.1}) + (\text{bola h 1.2}) + (\text{bola h 1.3})}{3}$$

$$\emptyset_{\text{prom horizontal}} = \frac{550 + 289 + 440}{3}$$

$$\emptyset_{\text{prom horizontal}} = 426.33 \mu\text{m}$$

$$\emptyset_{\text{prom vertical}} = \frac{(\text{bola v 1.1}) + (\text{bola v 1.2}) + (\text{bola v 1.3})}{3}$$

$$\emptyset_{\text{prom vertical}} = \frac{(310) + (478) + (330)}{3}$$

$$\emptyset_{\text{prom vertical}} = 372.67 \mu\text{m}$$

Prueba #2 con lubricante 10 N

$$\emptyset_{\text{prom horizontal}} = \frac{(\text{bola h 2.1}) + (\text{bola h 2.2}) + (\text{bola h 2.3})}{3}$$

$$\emptyset_{\text{prom horizontal}} = \frac{350 + 300 + 100}{3}$$

$$\emptyset_{\text{prom horizontal}} = 250 \mu\text{m}$$

$$\emptyset_{\text{prom vertical}} = \frac{(\text{bola v 2.1}) + (\text{bola v 2.2}) + (\text{bola v 2.3})}{3}$$

$$\emptyset_{\text{prom vertical}} = \frac{400 + 250 + 70}{3}$$

$$\emptyset_{\text{prom vertical}} = 240 \mu\text{m}$$

Prueba # 3 sin lubricante 15 N

$$\varnothing_{prom\ horizontal} = \frac{(bola\ h\ 3.1) + (bola\ h\ 3.2) + (bola\ h\ 3.3)}{3}$$

$$\varnothing_{prom\ horizontal} = \frac{680 + 350 + 550}{3}$$

$$\varnothing_{prom\ horizontal} = 526.67\ \mu m$$

$$\varnothing_{prom\ vertical} = \frac{(bola\ v\ 3.1) + (bola\ v\ 3.2) + (bola\ v\ 3.3)}{3}$$

$$\varnothing_{prom\ vertical} = 680 + 350 + 550$$

$$\varnothing_{prom\ vertical} = 470$$

Área promedio**Prueba #1****Tabla D2.**

Áreas promedio de la prueba #1.

		Ø [µm]	r [µm]	
PROMEDIO PRUEBA #1	Horizontal	426.33	213.1667	a
	Vertical	372.67	186.3333	b

$$\text{Área prom} = \pi * a * b$$

$$\text{Área prom} = \pi * 213.1667 * 186.333$$

$$\text{Área prom} = 124784.235\ \mu m^2$$

Prueba #2**Tabla D3.**

Áreas promedio de la prueba #2.

		Ø [µm]	r [µm]	
PROMEDIO PRUEBA #2	Horizontal	250	125	a
	Vertical	240	120	b

$$\text{Área prom} = \pi * a * b$$

$$\text{Área prom} = \pi * 125 * 120$$

$$\text{Área prom} = 47123.89 \mu\text{m}^2$$

Prueba #3**Tabla D4.**

Áreas promedio de la prueba #3.

		Ø [µm]	r [µm]	
PROMEDIO PRUEBA #3	Horizontal	526.67	263.33	a
	Vertical	470	235	b

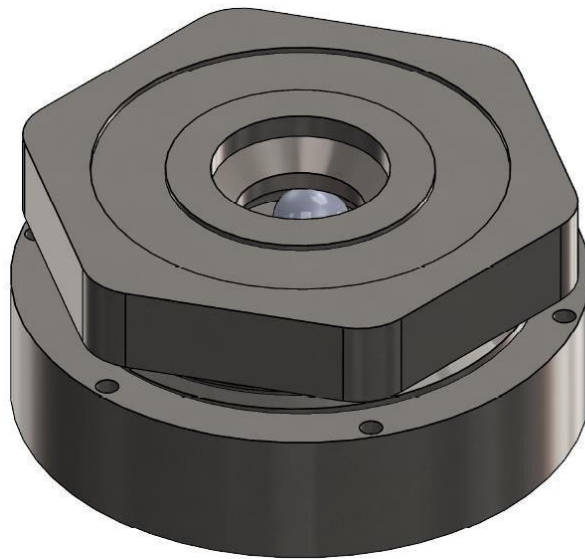
$$\text{Área prom} = \pi * a * b$$

$$\text{Área prom} = \pi * 263.33 * 235$$

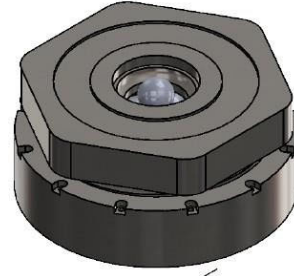
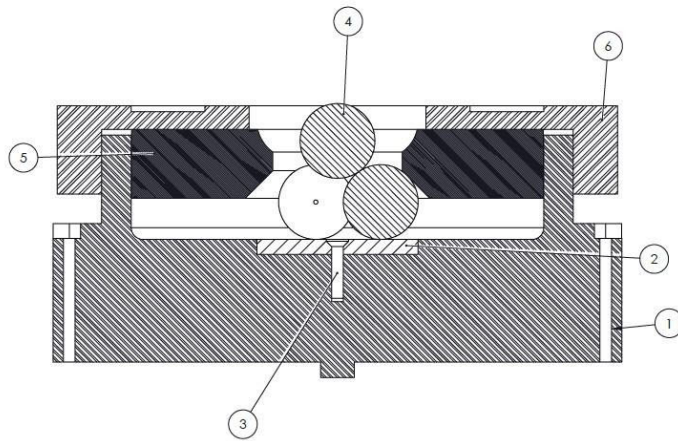
$$\text{Área prom} = 194412.23 \mu\text{m}^2$$

Apéndice E. Planos de la copa

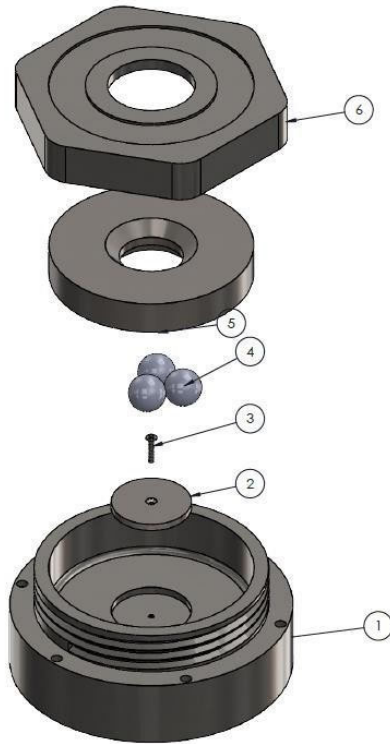
En los planos se puede encontrar detalladamente las medidas, diseño de la copa y demás elementos, que acoplaron a la máquina de tribolab y que sirvió para realizar los diferentes ensayos.



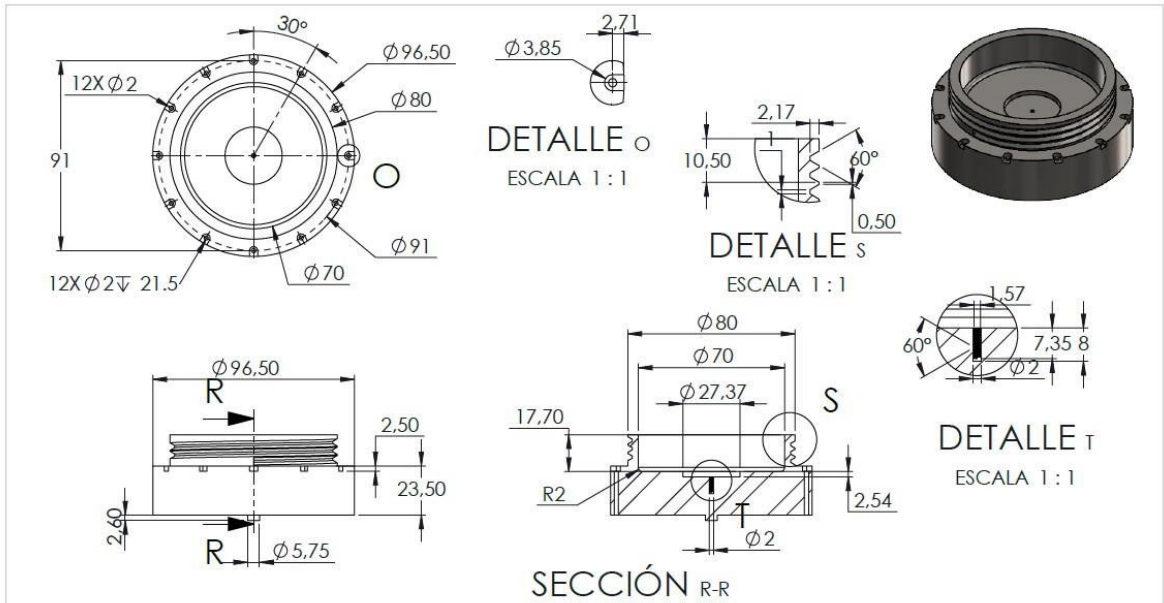
	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FECHA: 2023-03-08	PROYECTO: COFA TRIBOLAB
ESCALA: 1:1	DISEÑO DE LA MQUINA
UNIDADES: mm	PROY: Alvaro Daza Jarama, Steven Robinson, Juan...
A.1	REP: ...



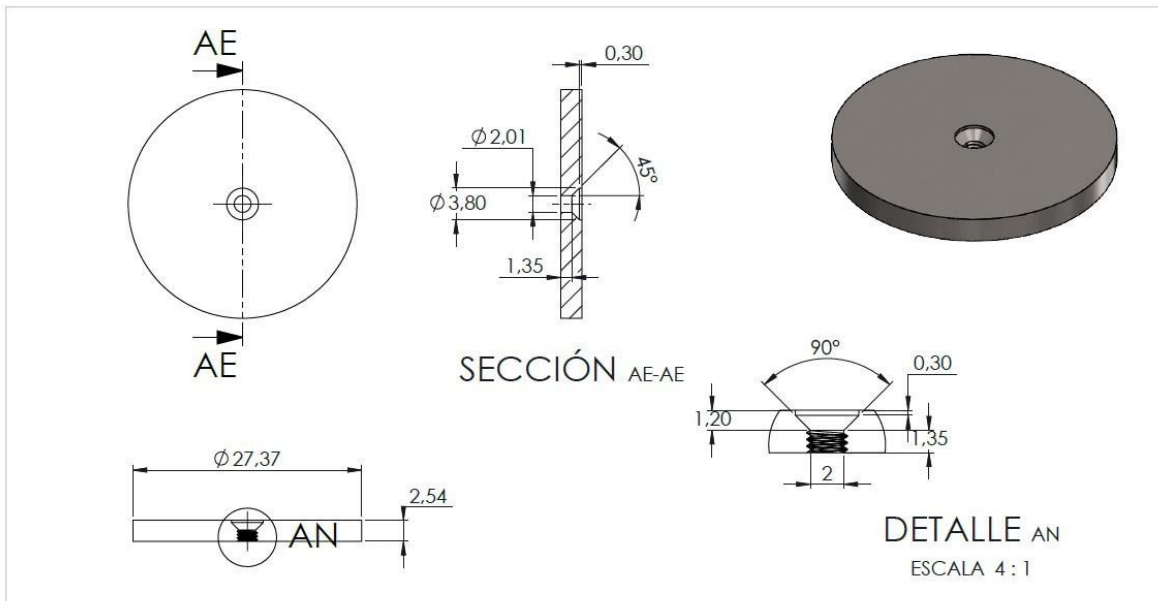
6	TUERCA DE SUJECION	1	ACERO inoxidable
5	ARANDELA SUJECION	1	ACERO inoxidable
4	BOLAS	4	ACERO al cromo
3	TORNILLO M2	1	ACERO al carbono
2	ARANDELA BASE	1	ACERO inoxidable
1	COPA	1	ACERO inoxidable
CÓDIGO PIEZA	NOMBRE DE LA PIEZA	CANT.	ESPECIFICACIÓN: DIMENSIONAL, MATERIAL, REFERENCIA TÉCNICA DE SELECCIÓN, MARCA.
 UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER			
FECHA: 08/06/2023		TÍTULO: COPA EXPLOSIONADO DE LA COPA	
ESCALA: 1:1		AUTOR: AUTOR DEL PROYECTO, GRUPO, SUBGRUPO	
UNIDADES: mm	REVISAR:	ING. ALBERTO PERTUZ	HOJA X/X
A3			



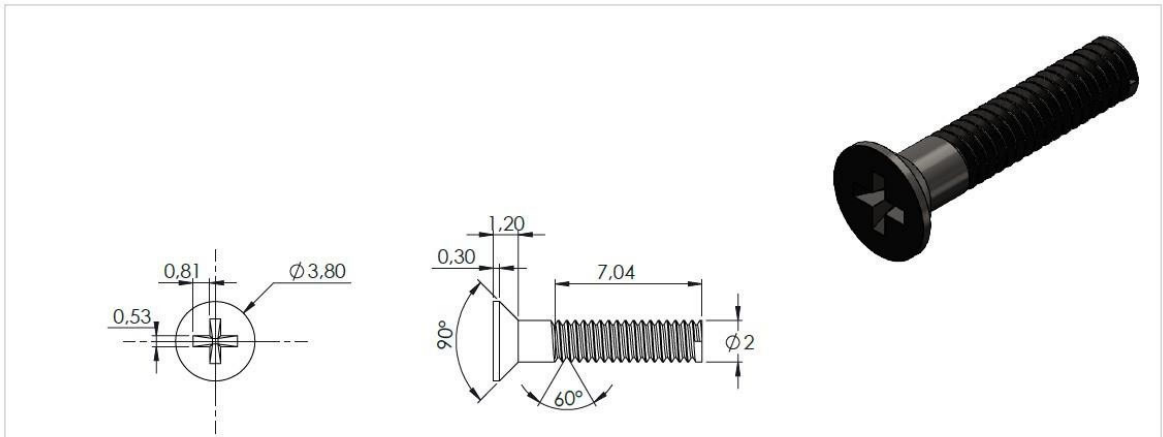
6	TUERCA DE SUJECION	1	Acero inoxidable
5	ARANDELA SUJECION	1	Acero inoxidable
4	BOLAS	4	Acero al cromo
3	TORNILLO M2	1	Acero al carbono
2	ARANDELA BASE	1	Acero inoxidable
1	COPA	1	Acero inoxidable
CÓDIGO PIEZA	NOMBRE DE LA PIEZA	CANT.	ESPECIFICACIÓN: DIMENSIONAL, MATERIAL, REFERENCIA TÉCNICA DE SELECCIÓN, MARCA.
 UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER			
FECHA: 08/06/2023		TÍTULO: COPA EXPLOSIONADO DE LA COPA	
ESCALA: 1:1		AUTOR: Alvarez Diaz Julian, Estevez Maldonado Heron	
UNIDADES: mm		REVISOR: ING. ALBERTO PERTUZ	
A3			HOJA 3/9



DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
Material: Acero inoxidable Tipo de rosca externa: M80x4.0x11 mm Tipo de rosca para el tornillo: M2X0.4x7 mm		
	FECHA: 19/09/22 ESCALA: 1:3 UNIDADES: mm	AUTOR: AUTOR DEL PROYECTO, GRUPO, SUBGRUPO REVISAR: ING.
	A4	HOJA X/X

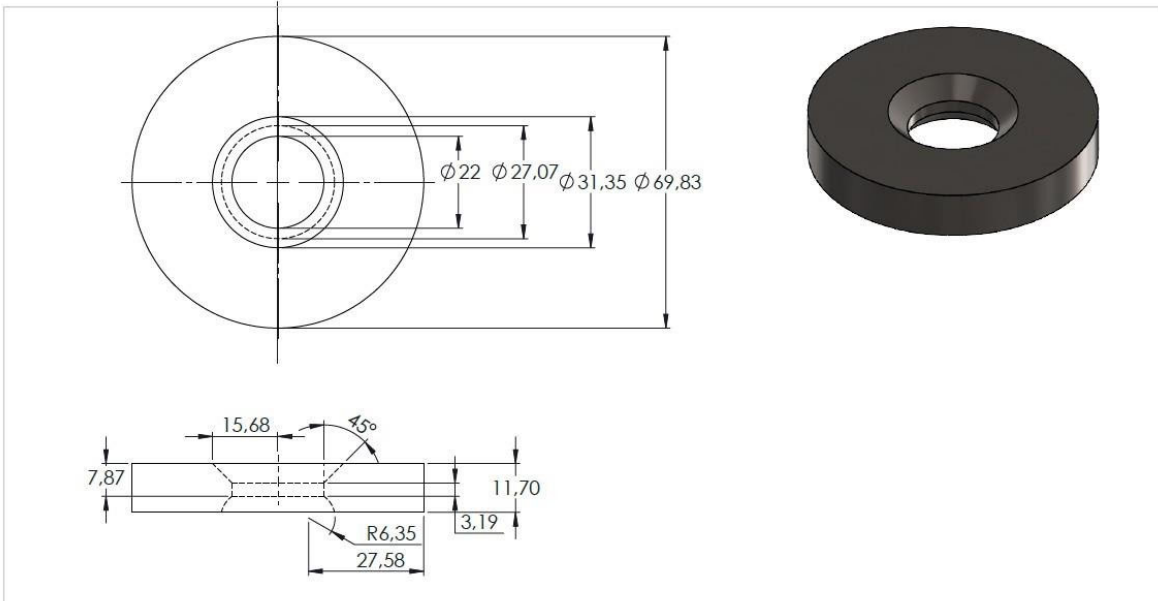


DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN: Material: Acero inoxidable tipo de rosca: M2x0.4x1.35mm	Universidad Industrial de Santander	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
	FECHA: 06/08/23	TÍTULO: TRABAJO DE GRADO PLANO DE ESPECIFICACION CODIGO DE LA PIEZA: 1 - ARANDELA BASE	
	ESCALA: 2:1	AUTOR: Alvarez Diaz Julian , Estevez Maldonado Herson	
	UNIDADES: mm	REVIS: ING.	HOJA 5/9

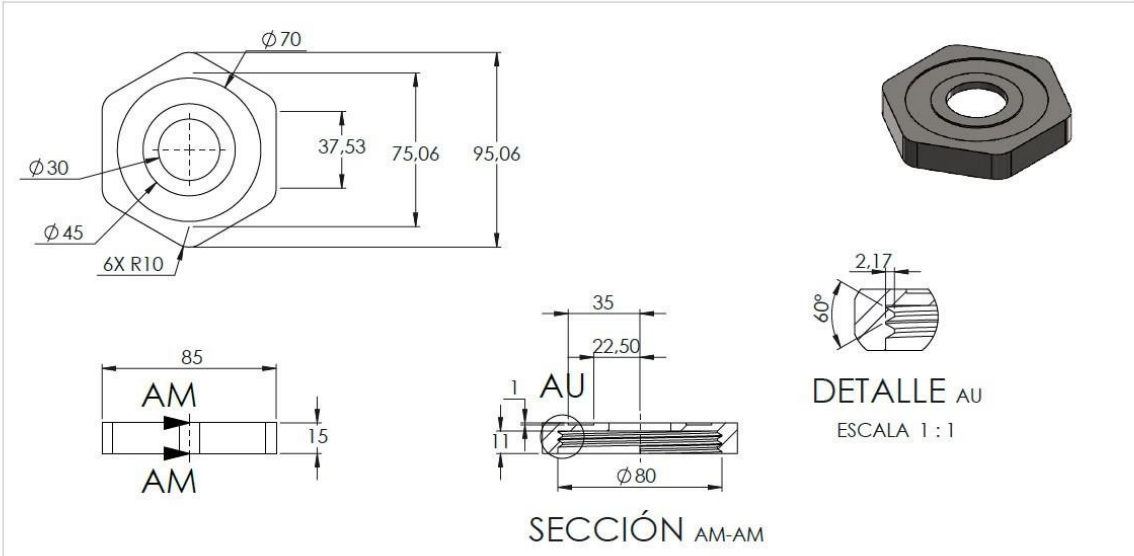


DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:	 	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
Acero al carbono scr Denominacion de tornillo cabeza avellanada M2X10mm paso: 0.4 mm b min: 25 mm dk max: 3.8 mm dk min: 3.5 mm k max: 1.2 mm Diámetro agujero de broca: 1.57 mm	FECHA: 08/06/23	TITULO: TRABAJO DE GRADO PLANO DE ESPECIFICACION CODIGO DE LA PIEZA: 1 - TORNILLO M2*04	
	ESCALA: 5:1	AUTOR: Alvarez Diaz Julian , Estevez Maldonado Herson	
	UNIDADES: mm	REVISIA: ING,	
	A4		HOJA 6/9

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN: Acero inoxidable		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FECHA: 06/08/23	TÍTULO: TRABAJO DE GRADO PLANO DE ESPECIFICACION CODIGO DE LA PIEZA: 1 - Arandela sujecion	
ESCALA: 1:1	AUTOR: Alvarez Diaz Julian . Estevez Maldonado Herson	
UNIDADES: mm	A4	REVIS: ING.
PRODUCTO SOLIDWORKS EDUCATIONAL. SOLO PARA USO EN LA ENSEÑANZA.		HOJA 8/9



DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
Acero inoxidable Tipo de rosca interna: M80x4.0x11 mm	FECHA: 08/06/23	TÍTULO: TRABAJO DE GRADO PLANO DE ESPECIFICACION CODIGO DE LA PIEZA: 1 - TUERCA DE SUJECION
	ESCALA: 1:2	AUTOR: Alvarez Diaz Julian . Estevez Maldonado Herson
	UNIDADES: mm	REVISOR: ING.
	A4	HOJA 9/9



DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:	 	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
Hierro produccion: Se realizo en torno CNC			
	ESCALA: 1:2	AUTOR: Alvarez Diaz Julian , Estevez Maldonado Herson	
	UNIDADES: mm	REVISIA: ING.	HOJA 1/1
	A4		