

Tema A2a Materiales: Tribología

“Caracterización del desgaste y desempeño lubricante de un cojinete combinado”

Andrés López Velázquez^a, Carmen Yuliana Rojas Murrieta^a, Rosario Aldana Franco^a, Ervin Jesús Álvarez Sánchez^a

^aUniversidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Campus Xalapa, Circuito Dr. Gonzalo Aguirre Beltrán S/N, Zona Universitaria, Xalapa, C.P. 91000, México

*Andrés López Velázquez. Dirección de correo electrónico: andlopez@uv.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta una caracterización del desgaste y desempeño lubricante de un cojinete combinado. La caracterización se realiza mediante ensayos tribológicos de laboratorio de acuerdo con las normas ASTM G-99-05 y ASTM D2509. Adicionalmente, también se realiza una simulación del cojinete, basada en el método interacción fluido-estructura (FSI) de una sola vía, mediante el empleo del software ANSYS CFD & MECHANICAL -ANSYS. De los resultados obtenidos, se determinó que el desgaste alcanzado con el aceite lubricante del cojinete de carga resultó ser el doble del obtenido con el aceite del cojinete guía. Por otro lado, se determinó que el mejor desempeño del aceite lubricante fue para el aceite del cojinete guía, ya que en ambos ensayos Timken, su temperatura final fue inferior a las alcanzadas con el aceite del cojinete de carga. Los resultados de la simulación del cojinete mostraron que el cojinete sufre un desgaste equivalente a 6 micras en su pared interna, lo que demuestra que el desempeño del aceite si afecta al equipo.

Palabras Clave: Desgaste, Cojinete de deslizamiento, Cojinete de carga, Cojinete combinado, Tribología.

ABSTRACT

This paper presents a characterization of wear and a combined bearing lubricant performance. Characterization is done by testing tribological laboratory according to ASTM D2509 and ASTM G-99-05. Additionally, also performed a simulation of bearing, based on the method of interaction (FSI) fluid-structure of a single via, using software ANSYS CFD & MECHANICAL - ANSYS. Of the results obtained, determined that wear reached with load bearing lubricating oil turned out to be the double of the retrieved with the oil of the guiding bearing. On the other hand, was determined to the best performance of lubricating oil for oil bearing guide, in both trials, Timken, its final temperature was lower than those achieved with load bearing oil. The results of the simulation of bearing showed bearing suffers wear equivalent to 6 microns in its inner wall, which shows that the oil performance affects the equipment.

Keywords: Wear, Sliding Bearing, Load Bearing, Combination Bearing, Tribology.

1. Introducción

La fricción está relacionada con la fuerza de rozamiento entre dos superficies en contacto. Toda fuerza de fricción se opone a la dirección del movimiento relativo [1-3]. El desgaste consiste en la pérdida de material de la *intercara* de dos cuerpos, en presencia de un movimiento relativo, bajo la acción de una fuerza [4]. En general, los sistemas de ingeniería implican el movimiento relativo entre componentes fabricados a partir de metales y no metales, y se han identificado seis tipos principales de desgaste, como sigue: desgaste adhesivo, desgaste abrasivo, desgaste por

ludimiento, desgaste por fatiga superficial, desgaste corrosivo y desgaste por impacto.

El desgaste de materiales es una de las principales fuentes, no solo de la pérdida de eficiencia de los equipos, sino de grandes pérdidas económicas [5].

La estrategia inmediata para disminuir la fricción y, por ende, el desgaste, es la lubricación. La lubricación ayuda a soportar la presión generada entre las superficies. La capa o película de lubricante colocada para separar las superficies en contacto puede ser un sólido, un líquido o un gas. Los lubricantes líquidos son los más utilizados para evitar el desgaste de superficies, donde el parámetro más importante que se debe controlar es el coeficiente de fricción, el cual se

define como la oposición al deslizamiento que se produce entre las superficies de dos cuerpos [6].

El tipo de desgaste adhesivo ocurre cuando dos superficies se deslizan una contra otra bajo presión [7]. Los puntos de contacto, proyecciones microscópicas o la aspereza de la unión en la interface donde ocurre el deslizamiento debido a los altos esfuerzos localizados, se tiene una elevada deformación plástica, lo que pudiera llevar a que las fuerzas de deslizamiento fracturen la unión, presentándose o no, desprendimiento de material de alguna de las superficies y transfiriéndolo a la otra, lo que puede ocasionar posteriormente mayor daño.

Uno de los sistemas mecánicos que presenta este tipo de desgaste son los cojinetes.

Un cojinete de deslizamiento es un elemento mecánico cuya función es permitir el movimiento relativo de dos elementos que deslizan; éste puede ser una película sólida adherida a la superficie fija del eje, la cual proporciona una barrera al contacto directo entre el elemento deslizante y el eje [8].

Un cojinete de carga o empuje es un tipo particular de cojinete giratorio. Al igual que otros cojinetes que permiten la rotación entre las partes, pero están diseñados para soportar una alta carga axial mientras el muñón gira.

Un cojinete combinado consiste de un cojinete de deslizamiento y un cojinete de carga.

Un ejemplo práctico de la aplicación de estos tipos de cojinetes son las turbinas hidráulicas, en donde, los cojinetes de empuje o carga soportan cargas axiales y los cojinetes de deslizamiento o guía soportan las cargas radiales del eje, para guiarlo en su movimiento. Dependiendo de la orientación del eje, el cojinete puede ser horizontal o vertical. [9].

En este trabajo se realiza una caracterización del desgaste y desempeño lubricante de un cojinete combinado mediante ensayos tribológicos de laboratorio del tipo perno sobre disco y Timken, ambos en condiciones de lubricación, acorde a las normas ASTM G-99-05 y ASTM D 2509, respectivamente. [10,11].

1.1. Descripción del sistema

El objeto de estudio se ubica en una central hidroeléctrica, en donde las turbinas se encuentran acopladas aún generador por medio de un eje, cuyo principal soporte es un cojinete. Los cojinetes usados para la turbina son el cojinete guía superior (colocado encima del rotor), y el cojinete de carga o empuje que soporta el peso de las partes rotatorias y el empuje hidráulico de la turbina. En el caso del generador, se emplea un cojinete guía superior y un cojinete combinado, cada uno de los cojinetes es provisto de un reservorio de aceite y utiliza intercambiadores de calor para enfriar el aceite, usando agua como refrigerante. El cojinete combinado está constituido por un cojinete guía inferior y uno de empuje, en este cojinete se centra nuestro caso de estudio.

El aceite utilizado en la lubricación de los cojinetes es un aceite mineral grado ISO VG 68, mismo del cual se tomaron las correspondientes muestras para la realización de los ensayos tribológicos.

En las figs. 1 y 2, se muestran los cojinetes de la turbina referida. En la fig. 1, se observa en detalle el acoplamiento del cojinete guía, cuya función principal es mantener alineado el eje. En la fig. 2, se aprecian algunas zonas afectadas por el desgaste del cojinete de carga.



Figura 1 – Cojinete Guía de una turbina hidráulica de eje vertical

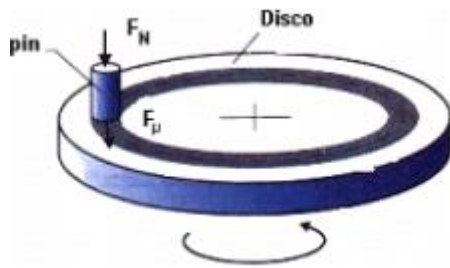


Figura 2 – Cojinete de Carga de una turbina hidráulica, en donde se aprecian las zonas de desgaste

2. Metodología

2.1. Ensayos perno sobre disco

El método empleado para estos ensayos fue Pin-On-Disk (perno sobre disco) bajo la Norma ASTM G99-05. En términos generales la prueba consiste de un perno, el cual se coloca perpendicularmente a la otra probeta, generalmente un disco circular plano, que gira por la acción de un motor a una velocidad angular determinada. El perno se presiona



contra el disco, debido a la acción de una carga específica. El equipo, permite que el disco gire y el perno presione el disco, en consecuencia, se obtiene un surco o marca de desgaste sobre el disco. La Fig. 3 muestra el principio de funcionamiento del método Pin-On-Disk.

Figura 3 – Configuración esquemática del método perno sobre disco.

Las probetas para este ensayo se prepararon de la siguiente manera: El perno consistió de un cilindro de acero AISI 1045 con dimensiones de 4 mm de diámetro y 35 mm de largo, acabado superficial pulido espejo. El disco, se preparó de acero inoxidable AISI 316, con las siguientes dimensiones 29 mm de diámetro y 3.5mm de espesor, con un pulido espejo. Los materiales utilizados en estos ensayos sólo se consideran como referencia, debido a que no fue posible disponer del material original.

Los ensayos se realizaron a las condiciones de operación máximas, permitidas en el equipo de laboratorio, las cuales correspondieron a una velocidad de 1000 rpm y una carga de 100 N y bajo una condición lubricada, con el aceite proveniente de los cojinetes en estudio, aceite lubricante mineral grado ISO VG 68.

2.2. Ensayos Timken

Los ensayos Timken se realizaron acorde a la norma ASTM D2509. El equipo utilizado fue una máquina Timken de la marca KILL A WATT (ver Fig. 4). Se emplearon esferas de acero inoxidable AISI 420 grado 1000, las cuales se limpiaron con hexano para la eliminación de impurezas. Estos ensayos permitieron evaluar el desempeño y resistencia de la película lubricante de los aceites lubricantes utilizados en la lubricación de los cojinetes referidos. Para ello, se realizaron dos tipos de ensayos:

- A) Ensayos de desempeño lubricante y
- B) Ensayos de rompimiento de película.

Los diferentes ensayos se realizaron para evaluar el aceite lubricante en condición de nuevo, para el aceite lubricante del cojinete de carga y el aceite lubricante del cojinete guía.

A) Ensayos de desempeño lubricante: Para la realización de estos ensayos se utilizaron 10 ml de aceite lubricante para llenar el reservorio de la máquina, realizado esto, se colocó una esfera de acero inoxidable en un extremo del brazo y se

opera el equipo unos segundos para que se lubrique el disco de la máquina con el aceite lubricante de prueba. En el otro extremo del brazo, se colocaron pesas con un total de 10 kgf durante 10 minutos a una velocidad de 800 rpm, para evaluar los diferentes desempeños del lubricante y sus diferentes desgastes; se toma la medición de la temperatura inicial y la temperatura final en punto de contacto de interés, mediante el empleo de un termómetro infrarrojo.

B) Para la realización de estos ensayos se utilizaron 10 ml de aceite lubricante para llenar el reservorio de la máquina, realizado esto, se colocó una esfera de acero inoxidable en un extremo del brazo y se opera el equipo unos segundos para que se lubrique el disco de la máquina con el aceite lubricante de prueba. En el otro extremo del brazo, se colocó una carga inicial de 13.6 kgf y después de cada minuto, se fue incrementando la carga en intervalos de 1.360 kgf, hasta provocar el rompimiento de la película lubricante. Justo en el momento de la ruptura de la película, se registra la carga máxima, la temperatura alcanzada, sí hubo o no presencia de humos y el tiempo en llegar a la ruptura.

La velocidad de la máquina, durante el ensayo se mantuvo en 800 rpm.

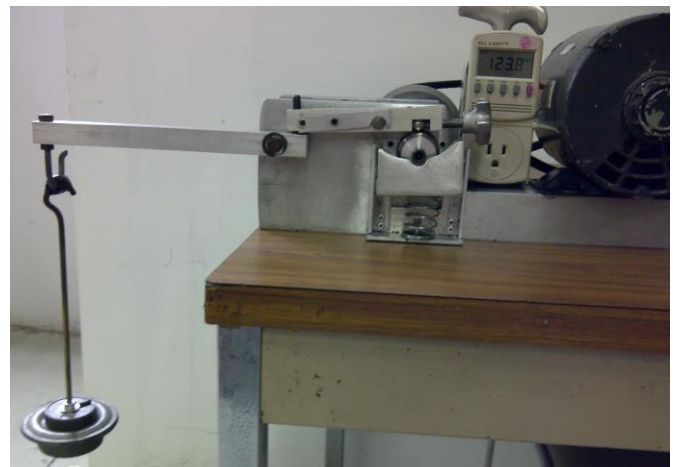


Figura 4 – Máquina Timken empleada para evaluar el desempeño y resistencia de la película lubricante.

2.3. Simulación con ANSYS CFD & Mechanical - ANSYS

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), es una herramienta que proporciona soluciones de campo de flujo sobre superficies sólidas, y, por otro lado, el solucionador de elementos finitos calcula las deformaciones ó temperaturas en los sólidos con base en los resultados obtenidos en CFD. Esto es muy útil cuando interesa realizar un análisis en una interacción fluido-estructura (FSI). Las superficies sólidas deformadas a su vez constituyen un nuevo límite para el cálculo por CFD, que puede resultar en una variación de presión o de carga térmica. Por lo tanto, el análisis FSI a veces requiere de una solución de dos vías (two-way) y una

solución iterativa totalmente acoplada en cada punto de tiempo, que puede ser computacionalmente costoso.

Sin embargo, el método one-way FSI es una alternativa que puede ser utilizada fácilmente, para comprobar la validez del modelo, el mapeo de superficies, exactitud de transferencia de carga, y una buena estimación de la respuesta estructural. En muchos casos, la solución one-way se necesita porque las soluciones de líquidos y sólidos son ligeramente acoplados.

Para el diseño y modelado del cojinete de deslizamiento de eje vertical mediante CFD y técnicas FSI a través del programa ANSYS WORKBENCH 15.0, primero se procedió con la configuración de la CFD para la simulación en ANSYS Fluent, en este caso el fluido elegido fue un aceite mineral con una densidad de 853 kg/ m³ y una viscosidad de 0.037 kg/m. s. y se establecieron las siguientes condiciones de frontera para cada una de las paredes en la geometría diseñada, para este caso, se definió el eje como una pared móvil que gira a 11 rad/s, el cojinete como una pared fija, la velocidad de flujo másico a la entrada de 3.08 kg/s y la salida a presión atmosférica estándar. Posteriormente, obtenido el análisis del fluido, el perfil de presiones es importado y se procede a resolver al modelo estructural en Ansys Mechanical y así, obtener el estado de esfuerzos en el cojinete.

3. Resultados

3.1. Resultados: Ensayos Tribológicos Perno sobre disco

Los resultados obtenidos en el tribómetro perno sobre disco para el desgaste de los diferentes aceites lubricantes evaluados, se presentan en las tablas 1 y 2 para el aceite lubricante del cojinete de carga y el aceite lubricante del cojinete guía.

Tabla 1 – Resultados de desgaste con el aceite del cojinete de carga.

Probeta	Carga (N)	Velocidad (Rpm)	Volumen desgastado (mm ³)
AA	100	1000	0.7571
AB	100	1000	0.7595
AC	100	1000	0.7619

Tabla 2 – Resultados de desgaste con el aceite del cojinete guía.

Probeta	Carga (N)	Velocidad (Rpm)	Volumen desgastado (mm ³)
BA	100	1000	0.25477707
BB	100	1000	0.37738854

BC	100	1000	0.37738854
----	-----	------	------------

De los resultados, se observa que bajo estas condiciones del ensayo, el desgaste alcanzado al utilizar el aceite lubricante proveniente del cojinete de carga, prácticamente, fue el doble del obtenido al utilizar el aceite lubricante del cojinete guía, lo cual podría ser una indicación del grado de degradación alcanzado en el aceite debido a la combinación de altas cargas y alta temperatura, derivada esta última de la fricción y desgaste presentados en el cojinete de carga, tal como lo muestra la fig. 2.

3.2. Resultados: Ensayos Timken

Los resultados obtenidos en la máquina timken, para el desempeño lubricante y resistencia de la película lubricante, de los aceites lubricantes del cojinete de carga y el cojinete guía, se presentan en las tablas 3 y 4, respectivamente.

Tabla 3 – Resultados del desempeño del lubricante.

Tipo de aceite	Temperatura inicial [°C]	Temperatura final [°C]	Emisión de vapores
Aceite Nuevo	24	79.8	NO
Aceite cojinete carga	24	80.3	NO
Aceite cojinete guía	24	67.1	NO



Figura 5 – Desgaste obtenido con (A) aceite nuevo; (B) aceite cojinete de carga y (C) aceite cojinete guía.

De los resultados obtenidos en la Tabla 3, para el desempeño lubricante del aceite lubricante utilizado en el cojinete de carga, nuevamente, se aprecia que tanto el desgaste (ver fig. 5) y la temperatura alcanzada al final del ensayo, son más elevados, en relación a lo correspondiente, en el aceite lubricante del cojinete guía. Lo cual, refleja un desempeño lubricante más eficiente del aceite del cojinete guía.

Tabla 4 – Resultados del rompimiento de película lubricante.

Tipo de aceite	T° inicial [°C]	T° final [°C]	Emisión de vapores	tiempo [Minutos]	Carga [Kgf]
Aceite Nuevo	21	73.2	SI	5	24.5
Cojinete Carga	21	91.5	SI	2.06	13.6
Cojinete Guía	21	48.6	SI	2.1	13.6



Figura 6 – Rompimiento de Película Lubricante: (A) aceite nuevo; (B) aceite cojinete de carga y (C) aceite cojinete guía.

En la Tabla 4, se observa que el rompimiento de la película lubricante tanto para el aceite lubricante del cojinete de carga, como para el aceite del cojinete guía, se presentó a las mismas condiciones de carga y tiempo de: 13.6 Kgf y 2 minutos; sin embargo, la temperatura final alcanzada al rompimiento en el aceite lubricante del cojinete de carga fue, prácticamente, el doble de la temperatura alcanzada por el aceite del cojinete de guía, además, el desgaste ocasionado en la esfera correspondiente, fue más agresivo, tal como se aprecia en la figura 6B.

3.3. Resultados: simulación del cojinete

Para el análisis del fluido, se creó un nuevo sistema de proyecto considerando un flujo laminar y se obtuvo la geometría de estudio, misma que se muestra en la fig. 7.

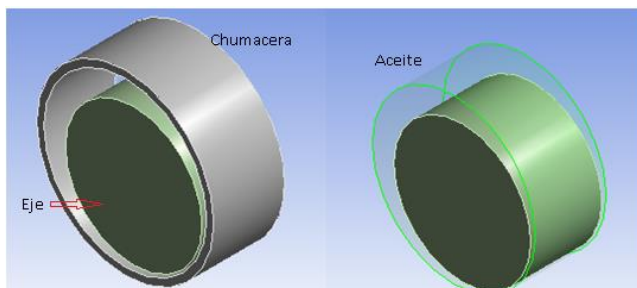


Figura 7 – Geometría del cojinete en 3D.

Posteriormente, se ejecutó la etapa de mallado correspondiente; pero se suprimieron los sólidos (chumacera y eje) porque en esta etapa, solo se analizó el comportamiento del aceite lubricante. Los resultados del análisis del fluido se muestran en la fig. 8: Perfil de velocidades y de presiones del aceite lubricante.

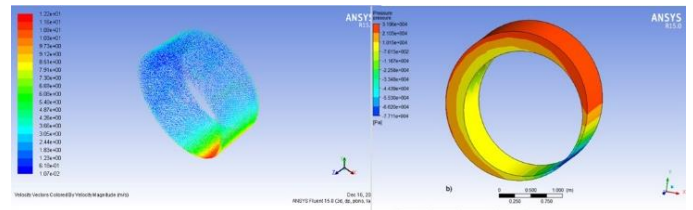


Figura 8 – Perfil de velocidades y presión en el aceite del cojinete

La solución del fluido se ligó al set up del módulo static – estructural. Los nodos eran coincidentes, así que, solo se abrió el modelo en Ansys Mechanical y el mallado se generó solo para el sólido, suprimiendo el fluido. Esto permitió importar el perfil de presiones que genera el aceite lubricante sobre la pared interna del cojinete, tal como lo muestra la fig. 9.

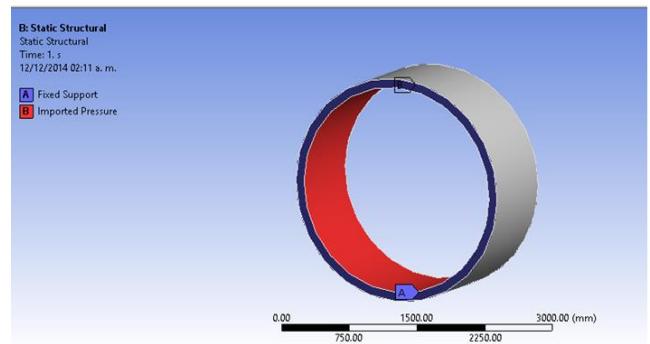


Figura 9 – Importación del perfil de presiones sobre la superficie interna del cojinete.

Una vez importado el perfil de presiones, se resolvió el modelo estructural, obteniéndose los esfuerzos en el cojinete, los cuales se muestran en la fig. 10. El desgaste provocado en el cojinete debido a la presión del aceite lubricante durante su desempeño fue de 6 micras.

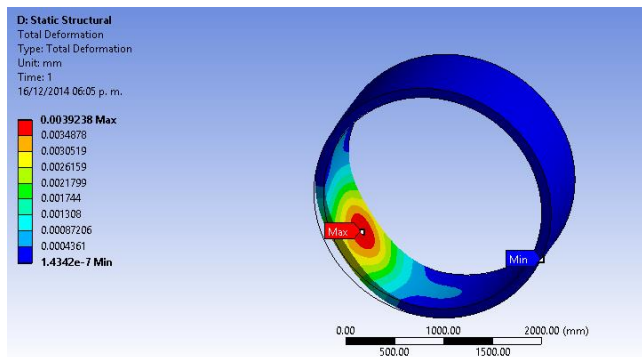


Figura 10 – Desgaste total en el interior del cojinete debido a la presión del aceite lubricante.

4. Conclusiones

- De los ensayos tribológicos, del tipo perno sobre disco, realizados se determinó que el desgaste alcanzado con el aceite lubricante del cojinete de carga (0.76 mm^3) resultó ser equivalente a dos veces el correspondiente al obtenido con el aceite lubricante del cojinete guía (0.37 mm^3).
- Los ensayos Timken reflejaron un desgaste más agresivo y una correspondiente temperatura elevada, al final de los ensayos, al utilizar el aceite lubricante del cojinete de carga; lo cual indica un desempeño lubricante deficiente en la lubricación del cojinete. El comportamiento del aceite lubricante en el cojinete de carga es crítico ante un incremento en la temperatura del mismo, dado que pudiese llegar al rompimiento inminente de la película lubricante, trayendo como consecuencia un desgaste catastrófico y el fallo de la máquina.
- Se diseñó y modeló un cojinete de deslizamiento de eje vertical mediante CFD y técnicas FSI a través del programa ANSYS WORKBENCH 15.0. Los resultados mostraron que el cojinete sufre un desgaste de 6 micras en la pared interna, esto

debido al efecto provocado por el propio aceite lubricante durante su desempeño.

Agradecimientos

Al Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías-Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato, por el apoyo y asesoría recibidos para la simulación del cojinete mediante CFD y técnicas FSI a través del programa ANSYS WORKBENCH 15.0.

REFERENCIAS

- [1] G. E. Álvarez, *Tribología, Fricción, Desgaste y Lubricación*. Ediciones UCLV. (1992).
- [2] K. C. Ludema, *Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology*. CRC press. (2010).
- [3] K. C. Ludema, *Definition of friction. CRC Handbook of Lubrication: Theory and Practice of Tribology*, Volume II: Theory and Design, 2, 31. (2010).
- [4] D. H. Mesa, *Principios de Tribología con énfasis en desgaste*. Universidad Tecnológica de Pereira, 305. (2007).
- [5] D. H. M. Grajales & A. Sinatora, *El desgaste de materiales, enfrentarlo o dejarlo de lado y asumir los riesgos*. Scientia et Technica, 2(22). (2003).
- [6] C. Kuo, *Tribology-Lubricants and lubrication*. Croacia: InTech. (2011).
- [7] J. L. Tristancho, O. F Higuera & L. C. Florez *Evaluación del desgaste adhesivo del acero AISI-SAE 1020*. Scientia et Technica, 4(36). (2007).
- [8] J. E. Shigley, R. G., Budynas & C. R. Mischke, *Mechanical Engineering Design*. Mc Graw Hill. (2004).
- [9] Comisión Federal de Electricidad. *Guía de mantenimiento mecánico para centrales hidroeléctricas*. México. (2010).
- [10] ASTM G99 *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*. ASTM International, West Conshohocken, PA. (2010).
- [11] ASTM D2782-02(2014) *Standard Test Method for Measurement of Extreme-Pressure Properties of Lubricating Fluids (Timken Method)*.