



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO.**



FACULTAD DE INGENIERÍA.

**“DETERMINACIÓN DEL PROTOCOLO PARA LA OBTENCIÓN DE
CURVAS STRIBECK EN ENSAYO TRIBOLÓGICO CILINDRO
SOBRE BLOQUE.”**

TESIS

**Que para obtener el título de:
INGENIERO MECÁNICO.**

Presenta:

SERGIO EDUARDO LUNA GALAVIZ

Director de tesis:

DR. RAFAEL SCHOUWENAARS FRANSSENS

CIUDAD UNIVERSITARIA, 2015

AGRADECIMIENTOS.

A mis padres, por el apoyo y la paciencia que me han brindado para continuar mis estudios.

A mis profesores, por haberme impartido una avidez de conocimiento que me permitió continuar hasta donde he llegado.

A mis amigos, por aquellas palabras de aliento que me brindaron en los momentos que lo necesité y reforzaron mi camino.

A las instituciones donde formé mi conocimiento educativo, por su interés en los estudiantes y las herramientas que han puesto a nuestra disposición que nos han permitido explorar más áreas de conocimiento y encontrar nuestra vocación.

A las personas cuyas experiencias a mi lado o sus anécdotas me brindaron coraje y sabiduría para continuar esta experiencia de la vida de forma inesperada. Aunque algunas no sepan de la importancia que tuvieron y quizás no lean estas palabras también reconocerles su participación.

Especiales agradecimientos para aquellas personas que, en los momentos de necesidad, me facilitaron recursos y otras formas de apoyo para poder dedicar más mi atención a éste recurso.

Decido agradecer a todas y cada una de las personas de esta forma debido a que sus participaciones e influencias han sido en diferentes proporciones o calidades, sin embargo, eso no exime a nadie de haber tomado participación en el camino que he seguido.

ÍNDICE DE CONTENIDO.

Objetivos.	iv
Prólogo.	v
1. Introducción.	1
1.1. Tribología	
1.2. Tribometría.	
2. Antecedentes.	4
2.1. Ramas de la tribología.	
2.1.1. Fricción.	
2.1.2. Desgaste.	
2.1.3. Lubricación.	
2.2. Análisis adimensional y el Teorema II.	
2.3. Curva de Stribeck.	
2.4. Estado del arte en la obtención de curvas de Stribeck.	
3. Rediseño del sistema	14
3.1. Condiciones iniciales del sistema.	
3.2. Inconvenientes a sperar.	
3.2.1. Desalineamiento del eje.	
3.2.2. Movimiento del mecanismo.	
3.2.3. Desgaste inadecuado de la muestra.	
3.3. Restricciones de diseño.	
3.4. Selección, diseño e implementación de aditamentos.	
3.4.1. Selección y diseño de aditamentos.	
3.4.1.1. Para reducir la desalineación entre elementos coaxiales.	
3.4.1.2. Para evita el deslizamiento del mecanismo.	
3.4.1.3. Para realizar ensayos con área aparente uniforme.	
3.4.2. Implementación de aditamentos.	
4. Desarrollo experimental.	23
4.1. Determinación del factor de multiplicación <i>del mecanismo de aplicación de carga.</i>	
4.2. Obtención del valor medio de la rugosidad.	
4.3. Determinación de los parámetros de referencia para los ensayos.	

4.4.	Procedimiento originalmente planteado para la obtención de curvas de Stribeck en tribómetro cilindro sobre placa.	
4.5.	Ensayos a velocidad constante.	
5.	Resultados.	29
5.1.	Curva de Stribeck.	
5.2.	Análisis de muestras ensayadas a velocidad constante.	
5.2.1.	Superficie de las muestras ensayadas.	
5.2.1.1.	Mediante microscopía óptica.	
5.2.1.2.	Mediante microscopía electrónica de barrido .	
5.2.1.3.	Mediante microscopía de fuerza atómica.	
5.2.2.	Microestructura de las muestras ensayadas.	
6.	Discusión.	44
6.1.	Diagnóstico de las pruebas realizadas.	
6.1.1.	Observaciones con respecto a las adaptaciones realizadas.	
6.1.2.	Observaciones acerca del funcionamiento del tribómetro.	
6.1.3.	Observaciones acerca del funcionamiento del mecanismo.	
6.2.	Recomendaciones para obtener curvas de Stribeck mediante un tribómetro perno sobre bloque.	47
6.2.1.	Normas relacionadas con un tribómetro perno sobre bloque.	
6.2.2.	Diseño conceptual de un tribómetro perno sobre bloque.	
6.2.3.	Herramientas de cálculo necesarias para el post-procesamiento de datos.	
7.	Conclusiones.	50
	Referencias.	51
	Anexo 1: Planos.	
	Anexo 2: Código desarrollado.	

Objetivos.

1. Determinar, diseñar y elaborar los aditamentos necesarios para mejorar el funcionamiento del sistema actual de tribometría cilindro sobre bloque.
2. Identificar los parámetros críticos de operación para apreciar las diferentes regiones de lubricación en diferentes materiales.
3. Diseñar el protocolo de ensayos de desgaste perno sobre placa lubricada que permita obtener resultados en forma de curva de Stribeck.
4. Generar mediante ensayo tribológico de cilindro sobre bloque zonas de mezcla mecánica en los materiales en estudio.
5. Caracterizar metalográficamente la zona de desgaste obtenida durante el ensayo tribológico utilizando microscopía electrónica de barrido.

PRÓLOGO.

El movimiento entre diversas piezas de sistemas mecánicos se ve afectado por la fricción entre ellas, produciendo pérdidas energéticas y económicas si la fricción entre cuerpos es elevada. Las fuerzas de fricción pueden reducirse con la aplicación correcta de lubricantes y el establecimiento de adecuadas condiciones de operación del mecanismo que pueden ser determinadas mediante la curva de Stribeck.

En el presente trabajo se buscó obtener experimentalmente la curva de Stribeck mediante el equipo instalado encontrándose que las condiciones actuales del contacto cilindro sobre bloque no cumplen los requerimientos para tener una adecuada oportunidad de trabajar con curvas de Stribeck como herramientas de investigación.

El proceso para obtener las curvas de operación incluyó un diagnóstico preliminar de las condiciones del equipo instalado y el desarrollo y adaptación de equipamiento auxiliar, así como las pruebas de desgaste correspondientes que buscaron validar el procedimiento planteado. Debido a la diferencia entre los resultados obtenidos en la presente investigación e investigaciones externas se presenta un diagnóstico de los resultados y las recomendaciones para la continuación del proyecto desde un enfoque diferente.

En el primer y segundo capítulo se presenta la información básica y los antecedentes del área tribológica, respectivamente. Estos antecedentes se remiten al conocimiento básico para el desarrollo de este proyecto y la investigación base que impulso el presente trabajo.

Las condiciones iniciales del sistema, la identificación de la problemática que éstas plantean se presentan en el tercer capítulo. Se incluyen también las soluciones propuestas y la implementación de las mismas en el sistema.

En el cuarto capítulo se describe el procedimiento usado para obtener un valor experimental para el factor de multiplicación del mecanismo de carga. También se realizan los cálculos para obtener un rango de operación para obtener curvas Stribeck. Por último, se describe el procedimiento usado para la realización de las pruebas.

El quinto capítulo se destinó a explicar los resultados obtenidos del análisis de los datos medidos en los ensayos. También se realiza el análisis por microscopía óptica (MO), microscopía electrónica de barrido (MEB) y microscopía de fuerza atómica (MFA) de las superficies y microestructuras de las muestras ensayadas.

En el sexto capítulo se presenta una discusión de los temas de importancia respecto a la condición del sistema y se elaboran recomendaciones para mejorar el presente trabajo a partir del diseño de un nuevo tribómetro.

El último capítulo indica las conclusiones obtenidas para la continuidad del presente proyecto.

Por último, se incluyen anexos referentes a los aditamentos elaborados y al código de computación desarrollado para la presente investigación.

1. INTRODUCCIÓN.

Hoy en día, la subsistencia de una entidad económica se basa en obtener la mejor relación costo-beneficio. Esos costos pueden ser por manejo de personal, por reparación y adquisición de materiales, consumo energético y tiempo demandado para las operaciones. A pesar de que dichas ganancias pueden verse afectadas por uno o más de estos costos, recientemente, ha aparecido otra complicación: la existencia de crisis financieras, energéticas, ecológicas y materiales que el creciente ritmo de vida mundial ha producido. Debido a estas afectaciones muchas empresas han optado por seguir conductas que ayuden a disminuir aún más los costos energéticos y de mantenimiento.

Una de las estrategias para combatir los costos por mantenimiento se ha venido enfrentando en la maquinaria desde hace siglos, siendo el resultado el uso de lubricantes para reducir la fricción, así como el uso de materiales resistentes a la fricción en elementos de maquinarias en contacto y con movimiento relativo entre ellos. En los Estados Unidos, un estudio del Departamento de Comercio (2009) indica que las fallas de los materiales por efectos mecánicos le cuestan a su sociedad entre el 3% y el 5% del producto interno bruto.¹

Con el objetivo de atender esta necesidad económica, junto con la demanda de conocimiento sobre el funcionamiento de los fenómenos relacionados con el daño sufrido por los materiales, diversos frentes de investigación se han construido dentro de la comunidad científica. Uno de dichos frentes, la tribología, pretende entender los mecanismos de desgaste a los que se enfrentan materiales en un ambiente lubricado con fricción.

1.1. Tribología.

La tribología (del griego *τριβω tribō*, "frotar o rozar") es un campo de la ciencia que aplica un análisis operativo a una serie de problemas de mayor significancia económica como mantenimiento, fiabilidad y desgaste, desde aplicaciones caseras hasta aeroespaciales, explorando la influencia del coeficiente de fricción y la lubricación en el desgaste de las piezas.²

En 1964 Peter Jost notó el efecto del incremento de la fricción en las máquinas y sus consecuencias, iniciando investigaciones que dieron lugar a esta disciplina.³ La creciente importancia de las investigaciones de estos fenómenos resultaron en la aprobación de la tribología como un nuevo campo de la ciencia en 1967 por un comité de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD por sus siglas en inglés).²

Estos fenómenos o ramas de la tribología son la fricción, la lubricación y el desgaste y se pueden describir como:

- a) Fricción: es la oposición al movimiento producida por el contacto entre superficies de dos cuerpos.
- b) Lubricación: es la aplicación de una sustancia para reducir la fricción entre dos superficies.
- c) Desgaste: es la modificación de la superficie que fue sometida a fricción.

Estos fenómenos han sido utilizados o se ha buscado evitarlos para diferentes aplicaciones, según sea el caso, a pesar de que hasta ahora no se han desarrollado modelos que expliquen completamente su comportamiento.

1.2. Tribometría.

Una de las disciplinas que permite mejorar el entendimiento de la tribología es la tribometría. La tribometría se encarga de cuantificar el rozamiento entre cuerpos a partir de herramientas llamadas tribómetros.

La American Society for Testing Materials (ASTM)⁴ establece como definición de tribómetros:

1. Un instrumento para medir las fuerzas normales y de fricción por el movimiento relativo de superficies.
2. Cualquier instrumento capaz o construido para medir la fricción, la lubricación y el comportamiento del desgaste de materiales o componentes.

Se reconoce como el primer tribómetro al dispositivo para medir la fuerza de fricción estática ideado por C. A. Coulomb.⁵ Este consiste en la unión de dos masas por un cable que pasaba sobre una polea como se muestra en la figura 1.3. Para determinar la fuerza de fricción se variaba la masa del cuerpo suspendido en el cable hasta lograr mover el cuerpo apoyado sobre una superficie.

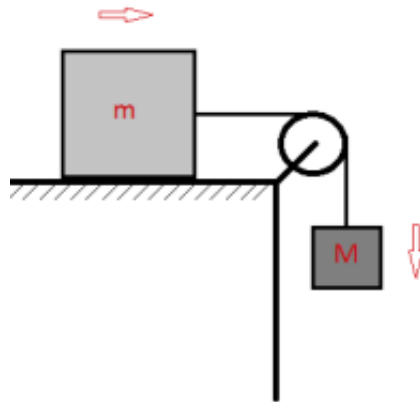


Figura 1.1 Tribómetro de Coulomb.⁵

Sin embargo, la palabra tribómetro fue asignada por Musschenbroek a un instrumento que él inventó para medir la fricción dinámica entre metales en el siglo XVIII.⁶ El instrumento consistía en un eje de acero endurecido que pasaba a través de una pieza de madera cilíndrica. El final del eje descansaba sobre cachas semicilíndricas pulidas de diferentes metales. La fuerza de fricción se estimaba mediante una masa suspendida por un hilo de seda colgado sobre el cilindro de madera.

La evolución que han tenido los tribómetros desde entonces es enorme y puede observarse según su clasificación. Los tribómetros pueden clasificarse en comerciales y de investigación.

Los tribómetros comerciales son diseñados preparados para satisfacer las necesidades de diversos clientes. Algunos ejemplos de tribómetros comerciales son: Triple Roller Machine (TRM)⁷, Multifunctional (MFT)⁸ y Universal Material Tester (UMT)⁹. Los tribómetros de investigación son desarrollados para atender necesidades específicas en base a la investigación planteada. Algunos ejemplos de tribómetros de investigación son: tribómetro coaxial⁵, tribómetro de cilindros cruzados¹⁰ y tribómetro de cuatro bolas.¹¹



Diagrama 1.1 Diferenciación de características entre tribómetros comerciales y de investigación.

Aunque no se encontró una empresa mexicana de tribómetros, se encontró que varias universidades si han desarrollado proyectos de elaboración de tribómetros, entre ellas están: la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)^{5, 12, 13}, el Instituto Politécnico Nacional (IPN)^{11, 14, 15} y la Universidad Veracruzana (UV).^{10, 16-18}

El tribómetro ubicado en la Facultad de Ingeniería de la UNAM se encuentra en fase de evaluación ante las reconfiguraciones que se han realizado recientemente.^{5, 13} Como parte de esa fase de evaluación se busca conocer su alcance para funcionar en diferentes configuraciones de contacto y establecer diferentes protocolos de investigación para generar una mayor penetración en el sector de investigación del campo de la tribología.

2. ANTECEDENTES.

2.1 Ramas de la tribología.

Como previamente se señaló, la tribología se divide en el estudio de la fricción, el desgaste y la lubricación. Para poder tener un mejor entendimiento del trabajo presentado se amplía la explicación del campo de investigación de cada una de estas ramas.

2.1.1 Fricción.

Las primeras investigaciones científicas en la tribología comenzaron con los postulados de Leonardo da Vinci acerca de la relación entre la fricción y el peso y la desvinculación del área de contacto con el coeficiente de fricción para dos materiales en contacto; posteriormente fueron reformulados dichos postulados por Guillaume Amontons y revisados e incrementados por Charles-Augustin de Coulomb¹⁹, resultando los postulados finales como sigue:

1. La fuerza de fricción es proporcional a la carga normal aplicada.
2. La fuerza de fricción no depende del área aparente de contacto.
3. La fuerza de fricción cinética no depende de la velocidad y es menor que la fuerza de fricción estática.

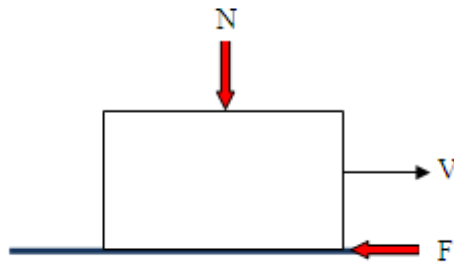


Figura 2.1 Diagrama de un cuerpo en movimiento, donde N representa el peso del cuerpo, F la fuerza de fricción y V la velocidad requerida para moverlo.

La fricción es una fuerza tangencial que se opone al movimiento pero que es dependiente de la fuerza normal que sufra la superficie de contacto en común. Dicha relación se manifiesta como el coeficiente de fricción μ que define cual fracción de la carga normal N es la que se opone al movimiento con la fuerza de fricción F:

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (2.1)$$

Se puede apreciar que si la velocidad es cero, el cuerpo permanece estático y como consecuencia la fuerza de fricción y el coeficiente de fricción toman los mismos valores.

Sin embargo, el coeficiente de fricción no adopta un único valor. Generalmente se consideran dos situaciones: principio del movimiento de un cuerpo y continuación del movimiento.

Cuando un cuerpo está quieto, el contacto de la superficie del cuerpo con aquella superficie en la que está apoyado permite que exista una unión entre las asperezas de ambas superficies. La fuerza aplicada para mover el cuerpo provocará que las asperezas traten de abrirse camino entre aquellas a las que están unidas, generando deformaciones que pueden culminar en la ruptura de algunas de esas asperezas.²⁰ Al coeficiente de fricción que se presenta al inicio del movimiento se le conoce como coeficiente de

fricción estático y es mayor que el que se presenta al perpetuar el movimiento, pues el fenómeno descrito no se presenta.

Actualmente, se desarrollan esfuerzos para mantener el coeficiente de fricción controlado para las funciones que se espera realice determinado objeto. En las juntas de los mecanismos se busca mantener un bajo coeficiente de fricción debido a que elevados coeficientes de fricción incrementan la temperatura de contacto en las superficies. Dado que la fricción es la principal causa del desgaste y de la disipación de energía no deseada es necesario realizar diseños que mantengan las fuerzas de fricción bajas. Sin embargo, no para todos los elementos un coeficiente de fricción bajo es deseable. El calzado, los neumáticos y las bandas transportadoras son algunos ejemplos de elementos que demandan un elevado coeficiente de fricción debido a sus diferentes necesidades.

2.1.2. Desgaste.

La lubricación y el desgaste son fenómenos con una relación muy estrecha pero el entendimiento científico de ellos no ocurrió paralelamente. Fue necesario el uso de elementos que estuvieran sometidos a grandes movimientos o muy repetitivos para generar el desgaste o entender que los fluidos reducen este fenómeno.

El fenómeno del desgaste es inherente al movimiento relativo entre superficies por contacto directo o por efecto del fluido entre ellas que busca disminuir el efecto de dicho roce. El desgaste es reconocido como el principal fenómeno de remoción de material en la superficie debido a la interacción con una superficie de contacto. Gran cantidad de máquinas pierden su durabilidad y precisión debido al desgaste. Sin embargo, existen diferentes fenómenos de desgaste pues los efectos abarcan desde pérdida de material hasta el cambio de geometría o de propiedades de los materiales sin pérdida de masa.

Un mejor entendimiento del desgaste de materiales permitirá desarrollar tecnología que permita tener un mejor control del fenómeno.²⁰ Dado que el desgaste no se presenta bajo un único mecanismo esto atrae la necesidad de analizarlo con mayor profundidad. Abundantes esfuerzos se han dirigido a la tribología y sus nuevos sistemas resultando en innovaciones con alta resistencia al desgaste pero que arrastran dudosa confiabilidad durante grandes periodos de tiempo.²¹ Este fenómeno se ha catalogado en 4 tipos principales: desgaste adhesivo, desgaste abrasivo, desgaste por fatiga y desgaste corrosivo.

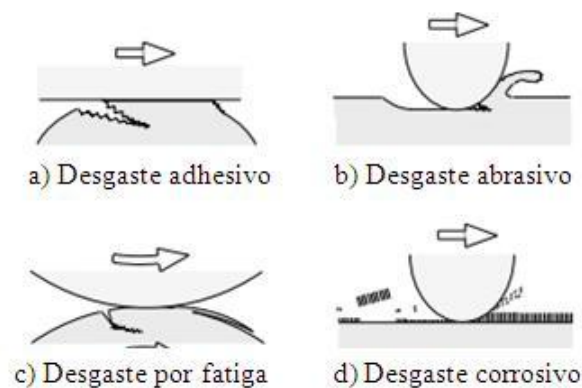


Figura 2.2 Mecanismos de desgaste principales.²⁰

a) Desgaste Adhesivo.²²

Un material se compara con los diferentes fenómenos de desgaste que presentan características muy notorias. Si la muestra tiene un desgaste diferente a los otros fenómenos de desgaste se dice que es

desgaste adhesivo. En éste fenómeno no existe pérdida de material en el sistema pero puede haber transferencia de masa entre los elementos, es decir, uno de ellos gana la masa que el otro pierde. La transferencia de material ocurre porque el elemento que cede su masa se agrieta en la superficie por efecto de la deformación plástica y, si se formaron enlaces con el otro material, los fragmentos agrietados se desprenden para formar parte del otro cuerpo del sistema.

b) Desgaste Abrasivo.²²

Está caracterizado por la participación de partículas duras forzadas en un movimiento deslizando sobre alguna superficie provocando un daño creciente que produce nuevas partículas que aumentan ese daño. Generalmente son dos superficies las que fuerzan dichas partículas contra éstas, provocando daños en ambas, siendo la que posee menor dureza la superficie más afectada por efectos como la velocidad de movimiento, la fuerza de contacto, las condiciones ambientales, entre otros.

c) Desgaste por Fatiga.²²

Demanda la aplicación de cargas cíclicas. La principal manifestación de dichas cargas cíclicas ocurre en piezas de contacto rodante. Estas piezas sufrirán fracturas por fatiga debido a la repetición de aplicación de carga. Debido a que las grietas ocurren del sustrato hacia la superficie, es difícil identificar éste tipo de desgaste en condiciones tempranas por lo que diseños adecuados de las condiciones superficiales de los elementos, tales como la rugosidad y los tratamientos superficiales, entre otros, son determinantes en la durabilidad de los elementos.

d) Desgaste Corrosivo.²²

Es cualquier mecanismo de desgaste que está acompañado por corrosión. La participación conjunta de dichos fenómenos genera pérdidas mayores de material en los elementos pudiendo provocar pérdidas totales. La participación de agentes corrosivos en forma paralela a los mecanismos de desgaste tiene mayor efectividad en el deterioro del material. El modo dominante de desgaste no es constante en el proceso y puede modificarse por cambios en las propiedades del material en la superficie y las respuestas dinámicas debido al calentamiento por la fricción, la formación de una tribocapa y el mismo desgaste, así como por las condiciones de trabajo a las que estén sujetas las superficies en contacto.²⁰

Debido a la gran influencia que tienen los materiales, la atmósfera, las condiciones de operación, el calentamiento del sistema, la transformación de mecanismos de desgaste y la ausencia de la identificación acerca del momento de ocurrencia, analizar el desgaste que sufre un sistema no puede resolverse con facilidad y demanda una investigación avanzada.

2.1.3. *Lubricación.*

Lubricar es la aplicación de un medio, en cualquier estado de agregación, donde se espera que ocurra el contacto entre dos superficies, con el objetivo de reducir los esfuerzos cortantes entre dichas superficies sólidas, lo que se logra mediante la separación de las superficies en movimiento. Debido al uso de lubricantes, la energía que sin ellos podría ser absorbida por transferencia de calor y generar una deformación plástica, se aprovecha en el sistema de interés, reduciendo las pérdidas energéticas.^{23, 24}

El campo de los lubricantes hoy en día es muy amplio en el área comercial y de investigación. Aunque casi todas estas áreas están dominadas por lubricantes derivados del petróleo, existe una gran variedad de lubricantes, como lubricantes sólidos, grasas y lubricantes mucho menos viscosos como el agua.

Se sabe que no solo basta con aplicar dicho medio a las zonas con roces de intensidad indeseable. También se ha aprendido que el lubricante debe ser aplicado con la abundancia adecuada y con las

características óptimas para el rango de condiciones de operación de la maquinaria que se pretende utilizar.

Existen diferentes propiedades que pueden tener mayor importancia según la necesidad impuesta por el uso del lubricante, como la viscosidad, punto de inflamación, la prevención de la corrosión, alta difusión de calor o la compatibilidad química. Sin embargo, debido a que las condiciones de operación de algún elemento mecánico suelen variar, los lubricantes han sido modificados continuamente para evitar el desgaste que pudieran sufrir los elementos mecánicos si estos estuvieran en contacto. Las modificaciones más comunes son el uso de aditivos que inician su función en determinado rango de temperaturas o que crean películas protectoras de los elementos que continúen brindando protección en caso de que el lubricante pierda efectividad. Por estos motivos la selección de los lubricantes en maquinaria adquiere mucha importancia en cuestión de la protección del sistema y del costo del lubricante elegido.

2.2. Análisis adimensional y el Teorema Pi.

El análisis adimensional es una particularidad del análisis dimensional. Este requiere que en ambos lados de la igualdad las dimensiones puedan simplificarse hasta llegar a la unidad. Para entender esto de una mejor manera es necesario recordar que esas dimensiones son mediciones de cantidades físicas expresadas en unidades fundamentales y unidades derivadas, donde las unidades fundamentales están representadas por normas establecidas y las derivadas son definidas en términos de las fundamentales. De ésta forma, al lado izquierdo de la igualdad (donde se expresa la cantidad dependiente) las dimensiones serán resultado del producto de las unidades fundamentales y/o unidades derivadas que posean las cantidades independientes. El análisis adimensional demanda que se agrupen las variables de tal manera que cada grupo tenga dimensión 1.



Diagrama 2.1 Trayectoria al análisis adimensional.

Edgar Buckingham, ²⁵ en 1914, mostró con el teorema Π que cualquier ecuación física que expresara una relación entre un número n de cantidades podía ser expresado en términos de productos de potencias de dichas cantidades, es decir:

$$Q_1 = F Q_2, Q_3, \dots, Q_n$$

podía reescribirse como:

$$\Pi_1 = F \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_i$$

Buckingham estableció que el número de factores necesarios para dicha construcción se determina con la ecuación:

$$i = n - k$$

donde k es el número mínimo de unidades fundamentales requeridas para describir las n cantidades involucradas.²⁵

Este método ya había sido usado por Lord Rayleigh, e incluso Buckingham afirmó que Riabouchinsky fue el principal desarrollador en 1911. Sin embargo, fue a partir de que Buckingham lo utilizó que el método recibió gran aceptación. Desde entonces se ha venido empleando para múltiples aplicaciones, principalmente en el área de la mecánica de fluidos, y ha contribuido en el análisis adimensional.²⁵

El desarrollo del número de Stribeck o parámetros de operación derivados de él requirieron el uso de éste teorema, que además puede contribuir al desarrollo de nuevos parámetros de operación, según las conveniencias del investigador.

Expresiones como la del número de Stribeck para el cálculo de coeficientes de fricción en cojinetes han sido desarrolladas cuando no se tiene un completo entendimiento del fenómeno. Para ese desarrollo se toman varias consideraciones para la inspección del problema. Un planteamiento ²⁵ ya utilizado para determinar el coeficiente de fricción para un cojinete toma las siguientes consideraciones:

1. Funcionamiento isotérmico. El cambio de temperatura en el sistema es bajo para un funcionamiento de bajo desgaste.
2. Sin lubricación forzada. En un cojinete se suelen usar cámaras de lubricante o grasas los cuales se consideran de lubricación natural.
3. Operación isobárica. A presión atmosférica o en una atmósfera controlada no se esperan grandes variaciones de presión.
4. Los cuerpos sólidos del sistema no son deformables. Para simplificar los cálculos se considera que la geometría de los cuerpos es constante.
5. Viscosidad constante. En un sistema isotérmico e isobárico la viscosidad es uniforme.

Esto establece que el coeficiente de fricción f es únicamente dependiente de la velocidad U_s , la carga por unidad de área W , el diámetro del cojinete D y la viscosidad ν como se muestra en la ecuación 2.1:

$$f = f(D, U_s, W, \nu) \quad (2.2)$$

Es posible que la lista de variables tenga más de las necesarias, pero tras efectuar el análisis dimensional las variables sobrantes dejarán de tomar parte en la función planteada, sin embargo, si la lista de propuestas es incompleta se puede llegar a resultados y conclusiones imprecisas.

Dado que el primer miembro de la igualdad no posee dimensiones, el segundo miembro debe ser una combinación de potencias de factores que permita que la ecuación sea adimensional.

$$1 = L^a \frac{1}{t}^b \frac{M}{L t^2}^c \frac{M}{L t}^d \quad (2.2)$$

$$\text{Para M:} \quad 0 = c + d \quad (2.3)$$

$$\text{Para L:} \quad 0 = a - c - d \quad (2.4)$$

$$\text{Para t:} \quad 0 = -b - 2c - d \quad (2.5)$$

Debido a que el sistema de ecuaciones contiene una ecuación menos que la cantidad de variables requeridas, realizando una serie de iteraciones con valores enteros para a se observa que con $a=0$ se satisface el sistema con $b=1$, $c=-1$ y $d=1$. De ésta forma el coeficiente de fricción queda expresado en la forma:

$$f = f \frac{U_s v}{W} \quad (2.6)$$

De esta forma el coeficiente de fricción queda expresado en función del número de Stribeck. Se observa que el diámetro salió de la ecuación, con lo que se comprueba que no debe haber preocupación por agregar cantidades innecesarias. Sin embargo, esta función puede ser modificada manteniendo la homogeneidad dimensional como lo hicieron Sommerfeld y Kingsbury²⁵ en un principio y Rapoport et. al.,²⁶⁻²⁹ Tanaka et. al.,^{30,31} y Gelinck et. al.^{32,33} en estudios más recientes.

2.3. Curva de Stribeck.

La curva de Stribeck muestra las condiciones de lubricación a las que está sujeto un sistema tribológico (tribosistema). Fue nombrado en honor a Richard Stribeck (1861-1950) por sus experimentos a principios del siglo XX acerca de los límites de la lubricación hidrodinámica que le permitieron ser el primer investigador en reconocer que un lubricante puede operar en diferentes regiones de lubricación para el mismo par de superficies, debido a que dichas regiones de lubricación son dependientes de la carga, la velocidad, la viscosidad del lubricante, la geometría de contacto y la rugosidad de una o ambas superficies.^{2,34} Estos resultados relacionan dos números adimensionales, el coeficiente de fricción μ y un parámetro de operación, lo cual permite visualizar que tipo de lubricación se encuentra operativa en el tribosistema a partir de las variaciones del coeficiente de fricción obtenido a partir de las mediciones.

Los regímenes de lubricación se definen por la capacidad de carga que tiene el lubricante en determinadas condiciones de operación. La capacidad de carga que tiene un lubricante se manifiesta con la reducción del contacto entre superficies y la reducción de la fricción que ocurre entre ellas.³⁵ Los regímenes de lubricación existentes son:

- a) Lubricación de frontera: La lubricación no depende de la viscosidad del lubricante, depende de las capas de materiales mixtos formadas en las superficies en contacto por fisisorción y quimisorción de las superficies con el lubricante.

Fisisorción y quimisorción son dos mecanismos diferentes de adherencia de átomos ajenos a un cuerpo. Se conoce como fisisorción a la unión por medio de enlaces de Van der Waals entre átomos, la cual se manifiesta ante la ausencia de fuertes quimisorciones, debido a la baja energía de enlace de las fuerzas de Van der Waals. Quimisorción es el término adjudicado a los procesos de adsorción que involucran una reacción química entre la superficie y los elementos anexos; dicha reacción química se manifiesta en la creación de enlaces covalentes o iónicos entre los átomos. Debido a la

diferencia de fuerzas de enlace, las capas formadas por quimisorción son más duraderas y estables que aquellas generadas por fisisorción.³⁶

El coeficiente de fricción es elevado en la lubricación de frontera en comparación con los sistemas de lubricación con película de lubricante pero menor que los coeficientes de fricción sólida registrados en materiales sin películas de óxidos que se hayan formado por la reacción de los materiales con el ambiente.

- b) **Lubricación mixta-elastohidrodinámica:** Se manifiesta cuando el espesor de la película del lubricante es muy pequeño, generando un incremento en la presión en el lubricante, produciendo deformaciones elásticas en las asperezas. La lubricación mixta se presenta cuando algunas asperezas de uno o ambos materiales poseen tal altura que pueden tocar el otro material, comenzando a ser insuficiente el soporte que el lubricante provee. Mientras algunos autores consideran la lubricación elastohidrodinámica y la lubricación mixta como regiones diferentes, otros autores la consideran un único régimen de lubricación porque la transición de la lubricación elastohidrodinámica puede ser instantánea y reversible.

Los efectos de la lubricación permiten encontrar en la región elastohidrodinámica los menores coeficientes de lubricación. Sin embargo, el descenso es limitado por el aumento de presión en el lubricante y la existencia de las asperezas de los materiales.

- c) **Lubricación hidrodinámica:** Se presenta por la existencia de una película de lubricante que evita el contacto entre las superficies sólidas. Es la región de operación principalmente usada en los elementos mecánicos debido a que se pueden obtener bajos coeficientes de fricción, aunque no los menores a lo largo de la curva de Stribeck. Hasta ahora es aceptado hablar de coeficientes y fuerzas de fricción en esta región pese a que la capa de lubricante es capaz de evitar el contacto entre las superficies. Es esta región existe una mayor facilidad de obtención de bajos coeficientes de fricción debido a que el rango de valores permitidos tiene mucha mayor amplitud que las regiones de frontera y elastohidrodinámica.

Debido a que el comportamiento de esta región es más estable y requiere de menos mecanismos, Petroff ² a finales del siglo XIX estableció que de cumplirse las características de la región hidrodinámica a lo largo de toda la curva de Stribeck se obtendría un comportamiento lineal y el coeficiente de fricción directamente proporcional al número de Sommerfeld podría alcanzar un valor nulo.

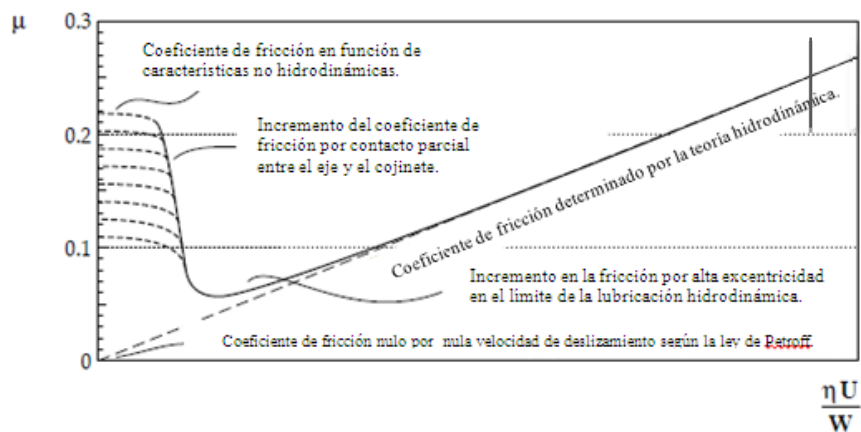


Figura 2.3 Representación de una curva de Stribeck.²

El coeficiente de fricción se presenta en el eje de las ordenadas como función de un número adimensional adecuado a las necesidades experimentales. Esta representación reduce los costos de experimentación, interpretación y aplicación de resultados.²⁵

Se mencionó que las asperezas de un material son los primeros elementos en establecer contacto con el otro material. Con el fin de evitar dicha ocurrencia, el lubricante debe ser capaz de soportar la carga aplicada entre los cuerpos, lo que implica una distancia entre dichos cuerpos. Esa distancia varía en toda la extensión de la superficie debido a la rugosidad de cada superficie, por lo que el valor de importancia es la mínima distancia entre superficies que evita el contacto entre ellas y se conoce como mínimo espesor de película h_0 . Thalian³⁷ le dio mayor significancia a dicho valor al usarlo para definir el parámetro λ , el cual relaciona el inicio del daño en las superficies en contacto con los límites de la lubricación elastohidrodinámica. Dicho parámetro se expresa como el cociente del mínimo espesor de película dividido por la rugosidad compuesta por las dos superficies en contacto:

$$\lambda = \frac{h_0}{R_{ms_A}^2 + R_{ms_B}^2} \quad (2.7)$$

donde R_{ms_A} es la rugosidad media cuadrática del cuerpo A y R_{ms_B} es la rugosidad media cuadrática del cuerpo B.

Se han encontrado valores generales para λ que identifican en que régimen de lubricación opera el lubricante.^{2, 35, 37} Estos son:

- a) Para lubricación de frontera se ha encontrado $\lambda \leq 0.5$. Fue observado que la superficie se mancha o sufre deformaciones y puede sufrir desgaste.
- b) Los valores dentro del rango $0.5 \leq \lambda \leq 3$ permiten una lubricación de película delgada que suele coincidir con un régimen de lubricación mixta. Se presenta un agrietamiento y efecto reflejante en la superficie el cual disminuye a medida que el valor λ aumenta.
- c) Para valores de dentro del rango $3 \leq \lambda \leq 5$ se encuentra un régimen elastohidrodinámico. Para todos los valores de λ mayores a 3 se considera que existe lubricación completa. Las superficies no tienen contacto entre ellas.
- d) El régimen hidrodinámico se manifiesta cuando $\lambda \geq 5$. En ésta condición se manifiesta una película gruesa de fluido.

Otro método para analizar el comportamiento del lubricante es utilizar las curvas de Stribeck. Al ser el coeficiente de fricción dependiente del parámetro de operación, el gráfico revelará cambios en las fuerzas tangenciales medidas y, si la orientación de la curva se modifica, será posible distinguir el valor del parámetro para el que ocurre la transición de un régimen de lubricación a otro. Hersey²⁵ plantea el procedimiento para la obtención de expresiones semejantes al número de Sommerfeld, desde el planteamiento del problema hasta la formulación y aplicación del teorema π y, teniendo la fórmula adimensional correspondiente, se pueden sustituir los valores necesarios para calcular el valor del parámetro de operación donde ocurre la transición.

El número de Sommerfeld se define como el cociente del producto de la viscosidad dinámica del lubricante ν por la velocidad angular U_s a la que gira el eje, en revoluciones por segundo, entre la presión de contacto W que existe entre los elementos:

$$S = \frac{\nu U_s}{W} \quad (2.8)$$

Dicho parámetro de operación, comúnmente usado en la evaluación de cojinetes, adquirió una mayor significancia al ser multiplicado por el cuadrado del cociente del radio r del eje entre la holgura radial c , quedando otra forma el parámetro S definido como sigue:

$$S = \frac{\nu U_s}{W} \frac{r}{c}^2 \quad (2.9)$$

El número de Schipper, introducido por Raimondi y Boyd en 1955 como “variable Kingsbury”,²⁵ es una derivación del número de Stribeck que considera, en lugar de la velocidad angular del eje, la velocidad de deslizamiento en el punto de contacto de ambas superficies U_z y añade el valor de la media aritmética de las alturas medidas de la superficie de mayor dureza R al parámetro de operación:

$$Z = \frac{\nu U_z}{WR} \quad (2.10)$$

En la expresión anterior, el parámetro R ha sido variado por diversos autores, por parámetros de forma semejantes al mencionado, pero manteniendo la característica adimensional del parámetro. Dichos parámetros son los siguientes:³⁸

- Rugosidad por máxima cresta y máximo valle R_{max} : Es la distancia normal al sustrato que existe entre el punto más bajo del valle más profundo y el punto más elevado de la cresta más alta.
- Rugosidad media R_a : Es la variación promedio de los puntos medidos, sea para crestas o valles, respecto a la elevación media del perfil.
- Rugosidad media cuadrática R_{ms} : Es el cociente de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de cada altura o profundidad medida, dividida entre la longitud sobre la que se realizó la medición. Hoy en día, este valor es el más aceptado en la comunidad científica como aquel que representa mejor las características superficiales a lo largo de una longitud dada.

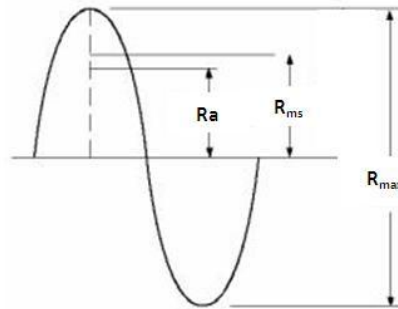


Figura 2.4 Representación de la diferencia de alturas para diferentes parámetros de rugosidad.

2.4. Estado del arte en la obtención de curvas de Stribeck.

Rapoport²⁶⁻²⁹ dirigió una serie de investigaciones que tenían, entre otros fines, conocer el comportamiento de desgaste y de fricción del cobre bajo diferentes condiciones de lubricación. Para lograr diferenciar las condiciones de lubricación utilizó la curva Stribeck debido a que permite observar el cambio del coeficiente de fricción durante un ensayo con base en parámetros controlados.

Para cumplir estos objetivos fue necesaria la construcción y puesta en marcha de un tribosistema acero AISI 51100 en contacto con cobre puro (99.98 wt. %) lubricado con aceite PAO-4. Se estableció un contacto deslizante mediante el uso de un sistema bloque sobre anillo con suministro de lubricante por goteo automático.²⁶⁻²⁹

Los resultados indicaron que para las condiciones experimentales, si $3 \times 10^{-3} < Z < 6 \times 10^{-3}$ se podía encontrar la región de lubricación mixta, que se dividió en una fase estable y otra inestable. El régimen de lubricación de frontera fue observado en valores menores al rango indicado, mientras que la región de lubricación elastohidrodinámica arrojó valores mayores al mismo.

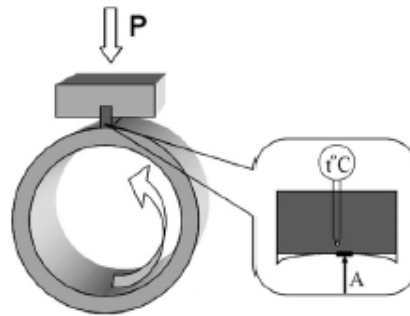


Figura 2.5 Esquema del sistema bloque sobre anillo.²⁶

Entre otros resultados se encontró también:²⁶⁻²⁹

- La formación de canales en la superficie de las muestras por elevados coeficientes de fricción.
- La formación de canales en la superficie de las muestras de cobre producen en las inmediaciones de ellos una estructura laminar en la dirección de rozamiento.
- La dureza de las capas superficiales alcanza valores semejantes a valores de dureza de cobre con estructura nanocristalina generada en procesos de deformación plástica severa.
- La operación en régimen elastohidrodinámico permite la formación de tribocapas que son responsables de los bajos coeficientes de fricción reportados; por otro lado, el régimen de frontera remueve continuamente el material provocando nuevas exposiciones de material metálico

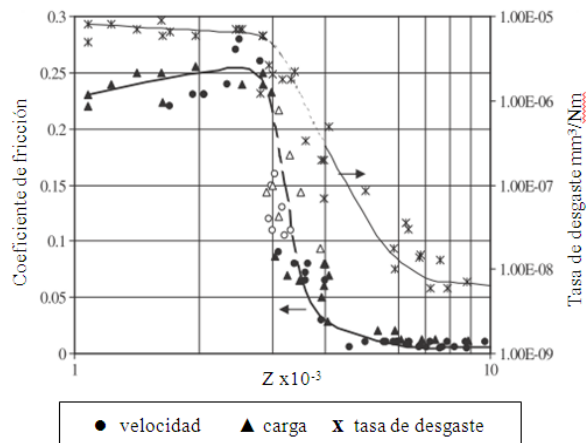


Figura 2.6 Curva de Stribeck y curva de desgaste obtenidas.²⁶⁻²⁹

3. REDISEÑO DEL SISTEMA.

El tribómetro coaxial construido por Lara⁵ y el prototipo elaborado por Barral y Cruz¹³ cumplieron los objetivos planteados; sin embargo, la unión del tribómetro y el mecanismo prototipo no permite la elaboración de ensayos satisfactorios. Debido a esto, diversos elementos tuvieron que ser diseñados y construidos para reducir o eliminar las dificultades que se explicaran a continuación.

3.1. Condiciones iniciales del sistema.

El tribómetro actualmente utilizado en la Facultad de Ingeniería de la UNAM es resultado del desarrollo de diferentes estudiantes de la facultad para ampliar las áreas de investigación posibles por parte de la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM). El diseño inicial limitó las pruebas a ensayos coaxiales de fricción sólida con una carga máxima de 1500 N.¹² El rediseño se enfocó en la disminución de peso para hacerlo portátil y ampliar la instrumentación para tener un mejor control sobre las mediciones realizadas.⁵

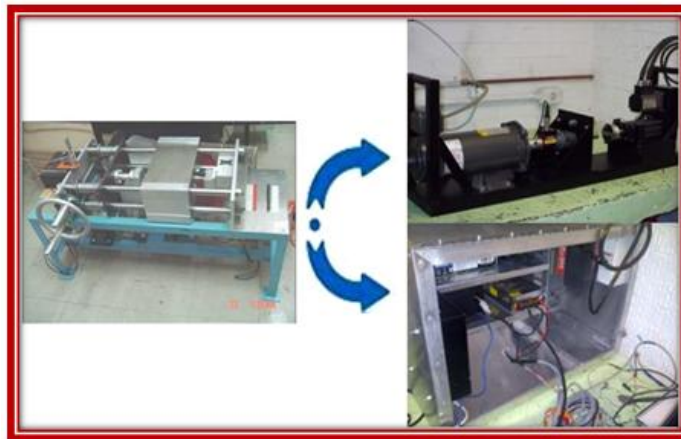


Figura 3.1 Evolución del tribómetro de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.^{5,12}

La siguiente modificación en el tribómetro se diseñó para realizar ensayos de cilindro sobre bloque. La modificación consiste en la adición de un mecanismo para aplicar carga radialmente. El mecanismo funciona mediante un sistema de palancas que aumenta la carga aplicada por un conjunto de pesas.¹³



Figura 3.2 Mecanismo para contacto cilindro sobre bloque.¹³

Las características actuales del diseño permiten realizar pruebas con velocidad angular entre 0 a 1750 rpm delimitada por el motor y con cargas máximas radiales y axiales de 20 y 150 N respectivamente, así como un torque máximo de 10 N-m.

3.2. Inconvenientes a superar.

3.2.1. Desalineamiento del eje.

La configuración del tribómetro, en su función de tribómetro coaxial, requiere que el perno de desgaste sea sujetado como una barra empotrada. En el momento en que se utiliza el mecanismo prototipo para ensayos tribológicos anillo sobre placa¹³ cambian las sollicitaciones a las que está sujeto el mecanismo como se puede observar en la figura 3.3:

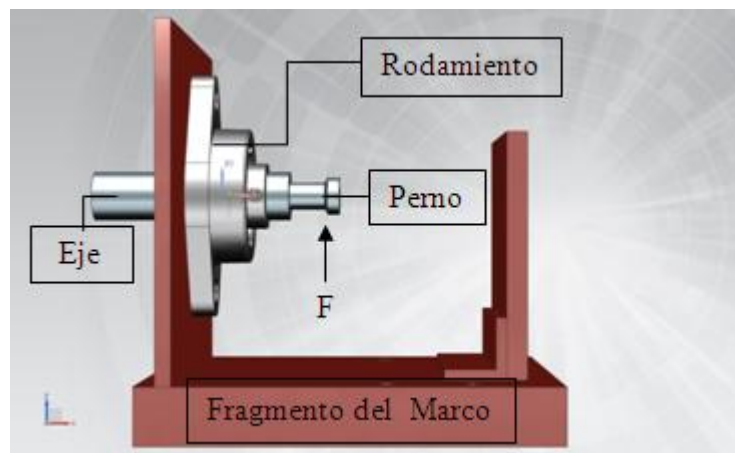


Figura 3.3 Esquema de la condición original en que operaría el tribómetro tras la inclusión del mecanismo de carga.¹³

donde F representa la fuerza radial que el mecanismo utiliza para aplicar carga ejerce sobre el perno y el indicador Eje indica que dicho elemento representa el eje del motor coaxial en su conexión hasta la unidad de rodamientos de soporte.

Debido a que el tribómetro fue diseñado para operar únicamente en configuración coaxial, el acoplamiento 1, el acoplamiento 2, el sensor de torque y la unidad de rodamientos (Figura 3.4) pueden sufrir daños según sea la fuerza F (Figura 3.3) que el mecanismo aplique.

Lara⁵ considero que el acoplamiento 1 y el acoplamiento 2 debían ser flexibles. Esta consideración se usó para proteger al sensor de torque en caso de que llegara a existir un desalineamiento del eje por el uso del tribómetro en su configuración coaxial. Debido al uso de acoplamientos flexibles por Lara⁵ en el diseño del tribómetro coaxial, la fuerza F (Figura 3.3) aplicada por el mecanismo desarrollado por Barral & Cruz¹³ produce un mayor desalineamiento del eje. Esto ocurre porque, después del acoplamiento 2, el eje se sujetó únicamente por la unidad de rodamientos (Figura 3.4). El uso de ese único soporte permite que la aplicación de la fuerza F genere una rotación en el sentido opuesto al giro de las manecillas del reloj (rotación positiva) por parte del eje sujeto por la unidad de rodamientos (Figura 3.4).

El efecto que tuvo el desalineamiento del eje sobre las muestras en las que se realizaron ensayos de desgaste fue un desgaste con una geometría no uniforme. Se atribuyó este efecto a la posibilidad de que

la carga aplicada en el contacto no fuera constante durante la duración del ensayo, lo cual encontraba sustento en las vibraciones del mecanismo y las inestabilidades del portamuestras del mecanismo durante el ensayo, los cuales eran mayores si la velocidad de giro era mayor. Se concluye que la desalineación en los elementos del eje producida por la carga aplicada por el mecanismo es la causante de las vibraciones y el desgaste no uniforme por lo que se hizo evidente la necesidad de modificar el tipo de sujeción del perno.

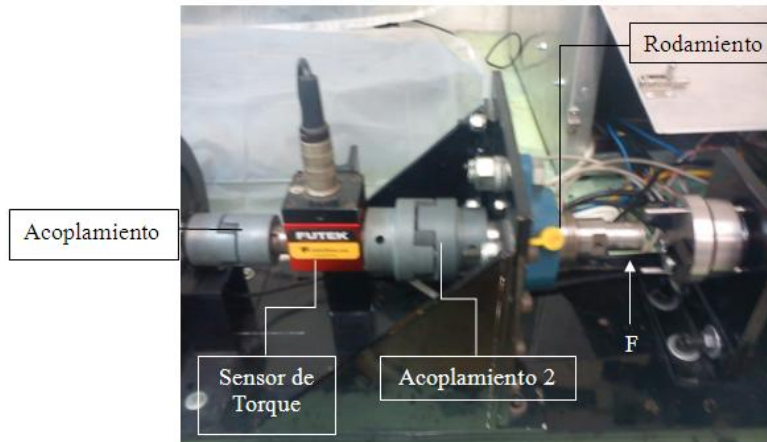


Figura 3.4 Elementos susceptibles de daño por aplicación de la fuerza vertical.

3.2.2. Deslizamiento del mecanismo.

El mecanismo diseñado por Barral & Cruz¹³ con la intención de desarrollar ensayos tribológicos anillo sobre placa ha demostrado que permite acelerar el desgaste que una muestra sufriría al aplicar la carga si no existiera el efecto multiplicativo. Las muestras que se utilizaron fueron láminas cuadradas de 18 mm por lado y espesor variable.

Sin embargo, para realizar las pruebas del funcionamiento del mecanismo se utilizaron soportes no considerados en el diseño para alcanzar la altura que permitiera el contacto de la muestra con el perno. Se observó que al hacer contacto el perno en movimiento con la muestra, el mecanismo se deslizaba sobre el soporte usado o el soporte se deslizaba sobre el marco estructural del tribómetro. Esto fue solucionado con el auxilio de soportes laterales aumentando los elementos improvisados utilizados para poner a prueba el funcionamiento del mecanismo.

3.2.3. Desgaste inadecuado de la muestra.

El tipo de muestra seleccionado (láminas cuadradas), las cuales fue útil para la obtención de curvas de Stribeck. Para que éstas sean útiles es necesario mantener constante el área de contacto con el fin de variar únicamente el parámetro de interés, sin importar si es la fuerza aplicada o la velocidad relativa.

El contacto inicial del perno con las muestras es, macroscópicamente, a lo largo de una línea. En realidad, esta línea es un área que se adapta a la curvatura del perno y aumenta de dimensiones a medida que las condiciones del ensayo lo permiten (mayor duración, mayor carga, mayor velocidad del motor y menor lubricación). Si se realizara un ensayo con valores excesivamente grandes en tiempo, carga y velocidad, el desgaste de la muestra sería tanto que podría provocarse una cavidad y afectar el

portamuestras del mecanismo. Este caso debe considerarse porque al desconocer la tasa de desgaste de la muestra no se puede prevenir el instante en el que podría perforarse la muestra.

Como se puede apreciar en los casos 1, 2 y 3 de la figura 3.5, a mayor desgaste, mayor es el área con la que interactúan las superficies del perno y de la muestra. Ante la necesidad de mantener los parámetros de los ensayos con el mayor control posible se decidió que era necesario buscar una nueva geometría para las muestras con las que se busca generar curvas de Stribeck.

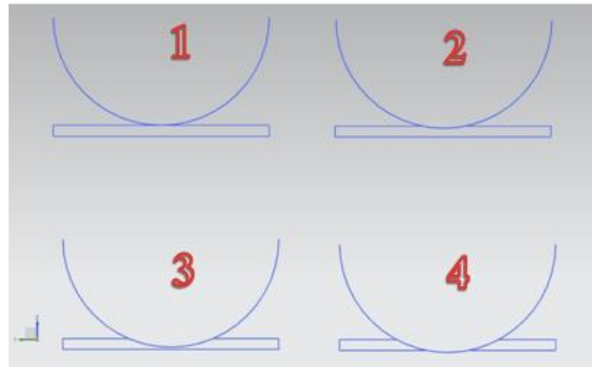


Figura 3.5 Representación de la evolución del desgaste de la muestra por efecto del contacto con el perno en la configuración actual desde el inicio del contacto (1) hasta el caso hipotético de perforación (4).

Debido a los puntos señalados se propuso realizar modificaciones al sistema, lo cual podría realizarse con modificaciones permanentes al tribómetro y al mecanismo prototipo o con adaptaciones removibles. Debido a que el tribómetro coaxial y el mecanismo prototipo son de reciente manufactura y a la importancia de conservar su integridad, la única opción viable consistió en diseñar y fabricar los elementos necesarios.

3.3. Restricciones de diseño.

Los proyectos elaborados por Lara⁵ y Barral & Cruz¹³ son de reciente manufactura. Su reciente manufactura y el hecho de que los instrumentos se encuentran en periodo probatorio por ser nuevos proyectos obligó a considerar los equipos como “intocables” para modificaciones permanentes.

La sección donde los nuevos elementos podían ser colocados se encuentra entre las placas verticales del tribómetro coaxial mostradas en la figura 3.4. Esa sección tiene como elementos removibles el perno, el portamuestras y la celda de carga para ensayos coaxiales. El portaperno está conectado con el acoplamiento 2 por lo que no debe ser removido. Tras remover el perno, el portamuestras y la celda de carga se encontró que la longitud disponible para adición de elementos colineales con el eje del tribómetro es menor a 90 milímetros.

Los elementos diseñados deben ser geometrías sencillas para disminuir costos de manufactura pero el conjunto debe poderse ensamblar con un procedimiento sencillo y poseer la rigidez adecuada para contrarrestar las vibraciones que se puedan generar por la adición de los nuevos elementos.

3.4. Selección, diseño e implementación de aditamentos.

3.4.1. Selección y diseño de aditamentos.

3.4.1.1. Para reducir la desalineación entre elementos coaxiales.

Se anexó un segundo rodamiento. La presencia de un segundo rodamiento permite tener un sistema de

barra empotrada de ambos lados en rotación. Se seleccionó una unidad de rodamientos con base en las características de diseño de la unidad instalada en el tribómetro (FYTBI1TF).⁵ Las opciones disponibles permiten elegir entre unidades de pared o de pie. Debido a las restricciones de diseño del espacio disponible para implementación de aditamentos se seleccionó el modelo SY25TF³⁹ Con ésta selección se descarta la implementación de una unidad de pared que requeriría la instalación de una placa que reduciría en mayor medida el espacio disponible.

Fabricación de un soporte para el segundo rodamiento. Los rodamientos comerciales cuentan con características específicas en su diseño. Dado que la unidad de pie seleccionada no cuenta con la altura necesaria para que el rodamiento sea concéntrico con el rodamiento de la unidad de pared se necesitó un soporte que se adaptara tanto al marco estructural del tribómetro como a la unidad de pie. El soporte se diseñó tipo corredera con barrenos laterales con cuerda para tornillos ISO de 10 mm de diámetro y barrenos superiores de fijación para la unidad de rodamientos de pie. (Figura 3.6)

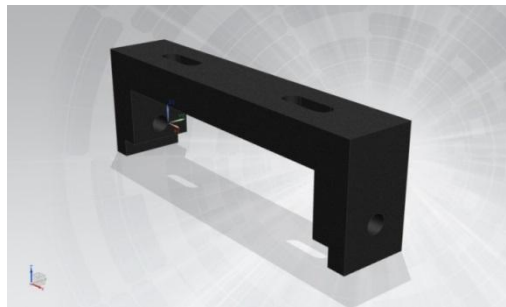


Figura 3.6 Soporte tipo corredera diseñado para la unidad de rodamientos seleccionada.

Fabricación de pernos con un nuevo diseño. Se necesitan nuevos pernos para poder tener dos puntos de sujeción, uno en el rodamiento de pie seleccionado y otro en el portaperno del tribómetro⁵. El diseño (Figura 3.7) incluye una mejora del sistema de sujeción del perno adaptada a cada punto de sujeción para evitar posibles daños al perno por una sujeción deficiente de los prisioneros del portaperno y de la unidad de rodamientos. Los pernos serán manufacturados del material que los originalmente utilizados (AISI 9840)¹².

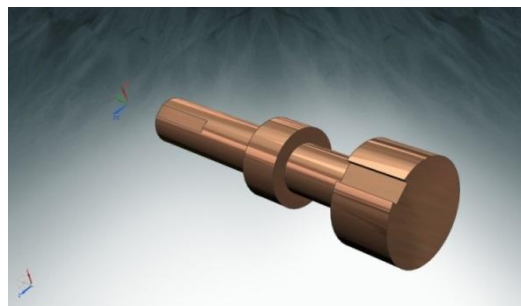


Figura 3.7 Nuevo diseño del perno. La sección central no ranurada es la sección de contacto con la muestra.

3.4.1.2. Para evitar el deslizamiento del mecanismo.

Diseño de un soporte para el mecanismo. Este soporte tipo corredera (Figura 3.8) coloca a la altura necesaria el mecanismo para que su condición de trabajo permita el contacto de la muestra con la zona de trabajo del perno. Cuenta con barrenos con cuerda para tornillos ISO de 10 mm de diámetro para asegurar los brazos de sujeción.

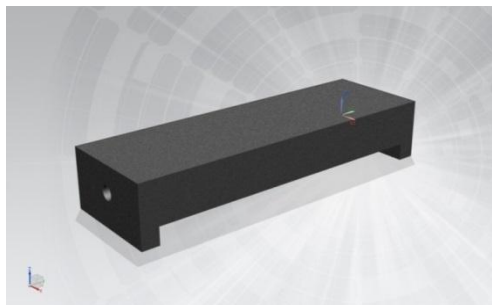


Figura 3.8 Soporte tipo corredera para el mecanismo de aplicación de carga.

Brazos de sujeción. El ancho del mecanismo es mayor al del marco estructural, esto demanda unas extensiones para evitar el deslizamiento horizontal previamente mencionado. Los brazos de sujeción soportan a ambos extremos el mecanismo para evitar el deslizamiento del mismo y sirven como elemento de conexión entre el soporte del mecanismo y el soporte de la unidad de rodamientos. Esta conexión provee de mayor rigidez al conjunto de elementos diseñados para solucionar los inconvenientes indicados en los puntos 3.2.1. y 3.2.2.

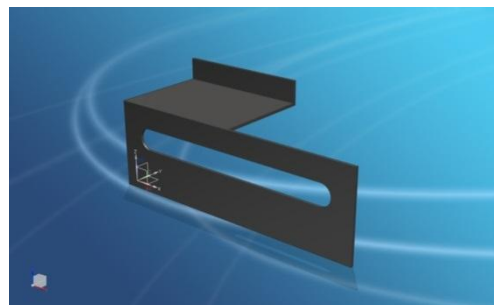
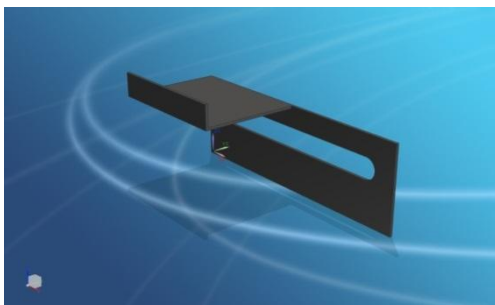


Figura 3.9 Brazos de sujeción.

Ensamblando la nueva propuesta las afectaciones a los componentes a los elementos rotativos señalados desaparecen al no existir una desalineación del eje producto de la fuerza aplicada.

3.4.1.3. Para realizar ensayos con área aparente uniforme.

Se decidió que la geometría de la superficie de trabajo del perno debe ser alcanzada por la muestra en algún momento del ensayo y mantenida hasta la culminación del ensayo. Para que esto ocurriera la longitud mayor de la superficie de contacto debería ser menor que el diámetro de la superficie de trabajo del perno. Debe notarse que cuánto más se aproxime dicha magnitud al diámetro del perno, mayor altura debe tener la muestra y el tiempo requerido para que la superficie de la muestra sea conforme con la del perno. La propuesta consistió en reducir de dimensiones la lámina y que el área de apoyo fuera el espesor de la lámina.

Las muestras deben tener geometría rectangular de 8.9 mm de altura y una anchura menor a 7.5 mm. El espesor podía encontrarse entre 0.5 mm y 4 mm. Dichas dimensiones permiten una variante para el control de la presión de contacto además de permitir variar la duración del ensayo sin agotar el rango de desgaste permitido en la muestra (≈ 2 mm).

Debido a la inestabilidad que puede tener la lámina durante el ensayo es necesario utilizar un método de sujeción que proporcione la estabilidad necesaria. La propuesta final consistió en construir una prensa

con sistema de presión de tuerca y tornillo. Dicha propuesta debía adaptarse a las dimensiones del portamuestras del mecanismo y que la geometría de la prensa no obstaculizara el ensayo.

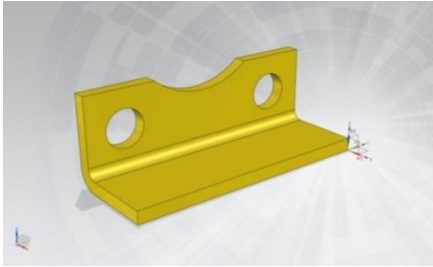


Figura 3.10 Mordaza de la prensa.

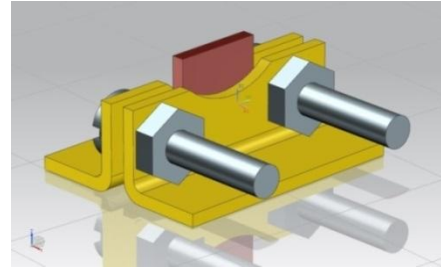


Figura 3.11 Representación del ensamble de la prensa sujetando una muestra.



Figura 3.12 Representación de una sección del tribómetro, prototipo de mecanismo para aplicación de carga y aditamentos en posición de operación.

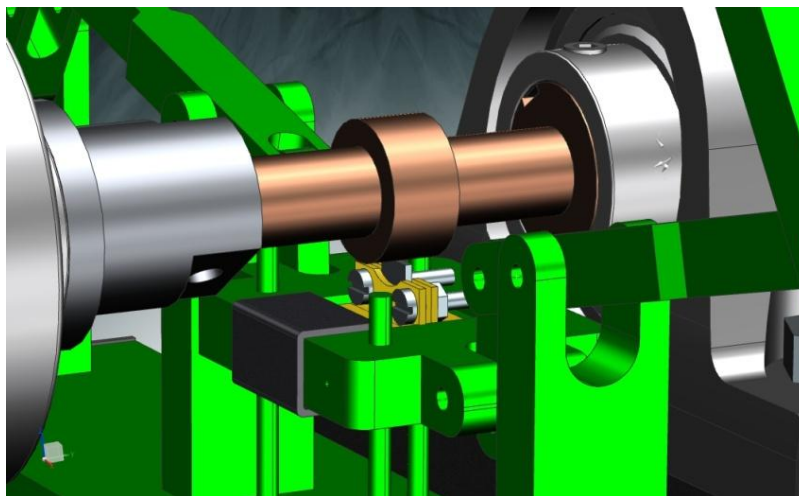


Figura 3.13 Detalle de la “Figura 3.12” para visualización de la prensa con muestra en posición de trabajo.

3.4.2. Implementación de aditamentos.

- a. Colocar una capa muy delgada de polietileno de baja densidad debajo de los soportes para disminuir las vibraciones que los elementos pueden transmitir a la estructura.

- b. Ensamblar los conectores, el soporte y el peldaño con los cuatro tornillos de 2.5 cm de largo de tal forma que las superficies en contacto con la cara inferior del mecanismo sean coplanares, al igual que las bases del peldaño y el soporte.



Figura 3.14 Ensamble de los soportes diseñados.

- c. Colocar el conjunto sobre la estructura del tribómetro.
- d. Desensamblar del mecanismo el sujetador de guías y la guía móvil, los pernos de las correderas y retirar el portapesas.



Figura 3.15 Imagen del mecanismo parcialmente desensamblado.

- e. El mecanismo queda apresado por los brazos de sujeción para reducir las vibraciones. Se debe colocar de tal forma que el barreno para la guía removida quede alejado de la computadora y cercano al portaperno.
- f. Introducir el perno en el balero de la chumacera por el lado donde se encuentran los prisioneros hasta el otro extremo del balero. Centrar la chumacera y alinear el perno.

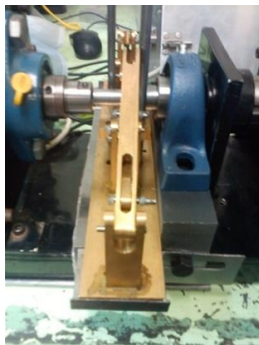


Figura 3.16 Vista lateral del perno antes de estar sujeto.

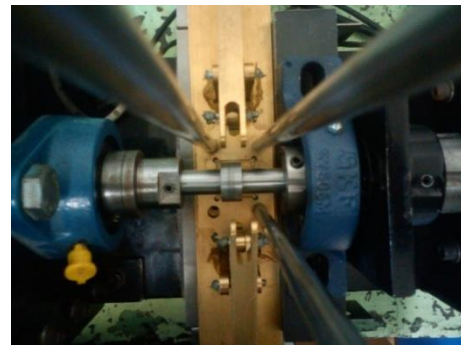


Figura 3.17 Vista superior del perno tras su sujeción.

- g. Hacer coincidir la ranura del perno con un prisionero en cada rodamiento y sujetarlo con todos los prisioneros

- h. Las muestras serán colocadas al centro de la prensa y la base de las muestras debe ser coplanar con las superficies inferiores de la prensa. Colocar la prensa en el portamuestras, reforzar con el clip y volver a ensamblar el mecanismo.



Figura 3.18 Prensa sujetando una muestra.

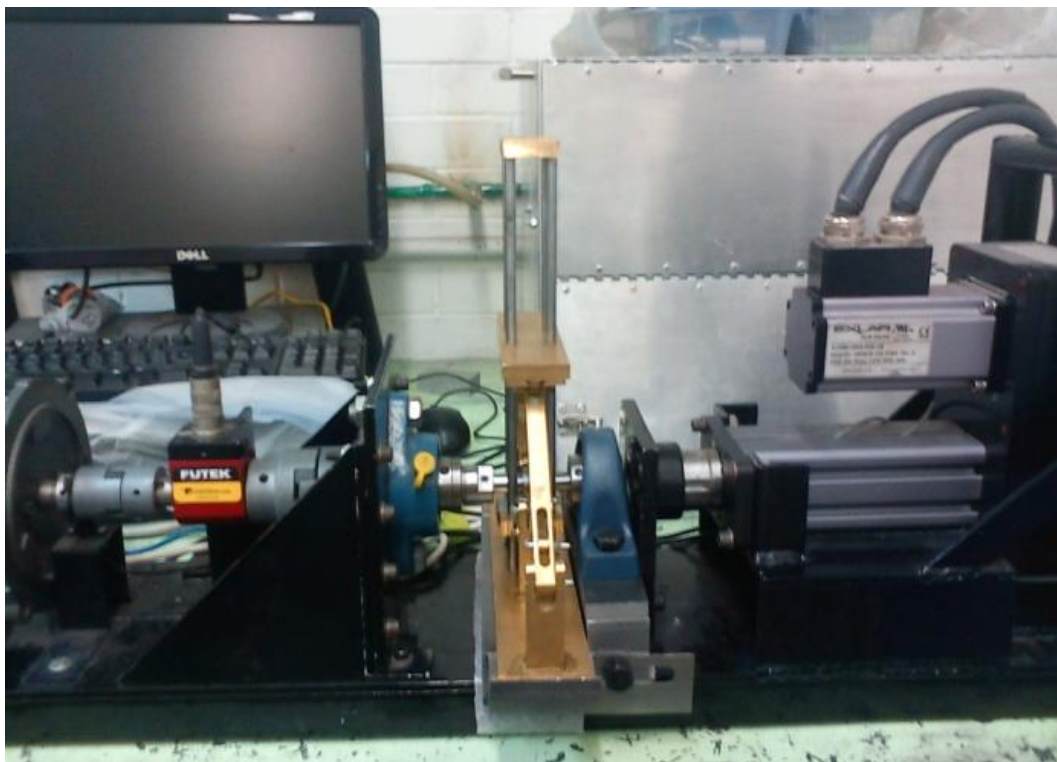


Figura 3.19 Vista lateral del equipo y aditamentos.

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

Antes de realizar las pruebas es necesario investigar las características que teóricamente pueden proveer los resultados deseados y tener una certeza del comportamiento del equipo que se utilizará. Se investigó el factor de multiplicación del mecanismo prototipo y el rango de valores requeridos para alcanzar el rango de valores del número de Schipper Z que permitieron a Rapoport et. al.²⁶⁻²⁹ apreciar la transición de la región de lubricación mixta-elastohidrodinámica a la de lubricación de frontera.

4.1. Determinación del factor de multiplicación del mecanismo de aplicación de carga.

Los cálculos teóricos desarrollados para evaluar el factor de multiplicación del mecanismo indican un valor de 22.75. Sin embargo, dichos cálculos no fueron concluyentes y las mediciones experimentales, incluyendo aquel en el que se usó una galga extensométrica, han determinado diferentes valores de carga dispersos y que no han sido corroborados posteriormente.¹³ Para conocer un valor más preciso del factor de multiplicación se desarrolló un experimento en el que se aplicaron diferentes masas en el portamuestras para determinar la carga que vence el efecto de la masa colocada en el portapesas del mecanismo.

Se apoyó el mecanismo en soportes desde los extremos para dejar desocupada la sección ubicada por debajo del portamuestras y colocar una carga de nivelación sujeta al portamuestras.

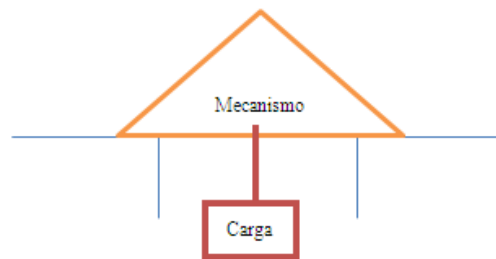


Figura 4.1 Esquema del mecanismo para el diagnóstico de la fuerza que ejerce el portamuestras.

Se armó un circuito abierto conectando un led, la batería y el alambre conductor como lo indica el siguiente diagrama. Un extremo de un fragmento del alambre conductor fue pegado al portapesas y otro fragmento al portamuestras del mecanismo. Los alambres se colocaron a una distancia menor a un milímetro entre ellos.

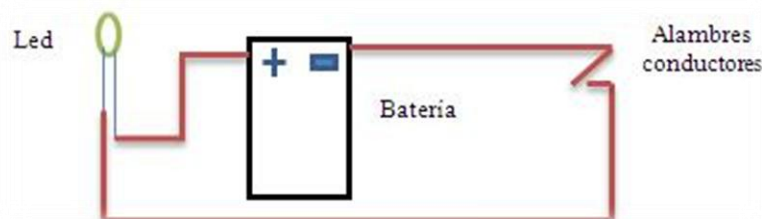


Figura 4.2 Diagrama del sensor improvisado.

Los extremos libres de los alambres fueron colocados de tal forma que al menor movimiento del portamuestras se cerrara el circuito y el led se encendiera. Se obtuvo el factor de multiplicación (fm)

como el cociente de la masa levantada por el portamuestras (M_{pm}) entre la masa colocada en el portapesas (M_{pp}):

$$fm = \frac{M_{pm}}{M_{pp}} \quad (4.1)$$

Se definió como el factor de multiplicación real (FMR) el valor medio de los factores de multiplicación de los ensayos realizados:

Tabla 4.1 Resultados de la medición experimental de la carga ejercida por el portamuestras.

Ensayo	M_{pp} kg	M_{pm} kg	Fm
1	0.45	13.56	30.1
2	0.462	16.79	36.3
3	0.478	18.28	38.2
4	0.516	16.075	31.1
5	0.53	18.575	35.0
6	0.558	16.985	30.4
7	0.578	19.794	34.2
8	0.604	18.935	31.3
9	0.638	17.51	27.4
10	0.674	21.22	31.4
11	0.712	23.324	32.7
12	0.734	21.92	29.8

Con los resultados obtenidos el valor del factor de multiplicación real es $FMR=32$.

4.2. Obtención del valor de medio de rugosidad.

Se obtuvo el perfil superficial para una sección cuadrada de 1 mm^2 de una muestra no ensayada y los valores de rugosidad en dirección perpendicular a la dirección de deslizamiento que se aplica en el ensayo. Se encontró que la rugosidad media cuadrática a lo largo de la línea central del perfil era mayor que la reportada por Rapoport²⁶⁻²⁹ (más de cinco veces mayor). Se consideró $R_a=0.72 \times 10^{-6} \text{ m}$ para el postprocesamiento de los datos de cada ensayo obtenida por el software Mechanical 3D[®] tras obtener el perfil superficial con un perfilómetro óptico.

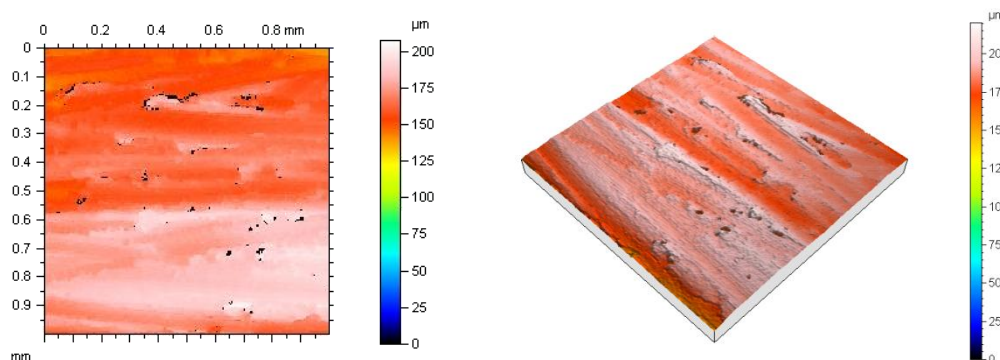


Figura 4.3 Vistas 2D superior (izquierda) y 3D isométrica (derecha) del perfil superficial medido.

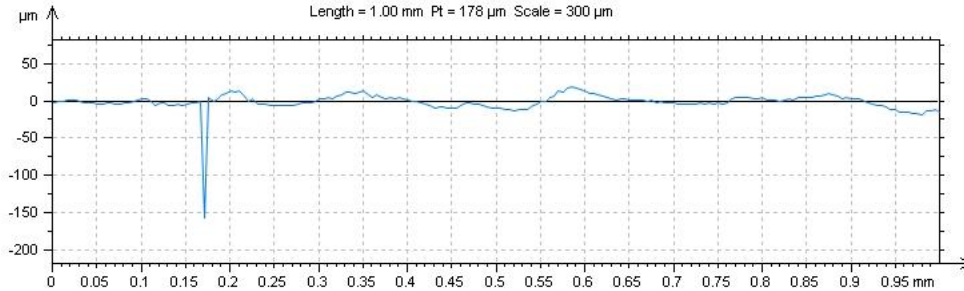


Figura 4.4 Perfil de rugosidad perpendicular a la dirección de deslizamiento.

ASME B46.1			
2D Parameters			
Ra	0.721	µm	Gaussian filter, 0.025 mm
Rmax	2.03	µm	Gaussian filter, 0.025 mm
Rq	3.28	µm	Gaussian filter, 0.025 mm
Rt	61.5	µm	Gaussian filter, 0.025 mm

Tabla 4.2 Parámetros de rugosidad de la Figura 4.3 bajo la norma ASME B46.1

4.3. Determinación de los parámetros de referencia para los ensayos.

Previamente fue señalado que diferentes investigaciones dentro del campo de la tribología que han presentado sus resultados mediante curvas de Stribeck. Los elementos de trabajo disponibles no son iguales a los utilizados en la investigación de Rapoport et. al.²⁶⁻²⁹, de tal forma que se debe prestar atención a las modificaciones operativas necesarias si se desean obtener resultados semejantes.

Las condiciones de operación reportados por Rapoport²⁶⁻²⁹ son:

- Temperatura: 25 °C.
- Humedad: 50%.
- Sistema anillo sobre bloque.
- Anillos de acero AISI 51100, dureza HRC= 60, $R_a=0.12 \mu\text{m}$.
- Bloques de cobre puro (99.98wt%), tamaño de grano promedio $25\pm 10 \mu\text{m}$, dureza Vickers: $800\pm 50 \text{ MPa}$, $R_a=0.2 \mu\text{m}$.
- Velocidad de deslizamiento variada en el rango de 0.1-1 m/s para ensayos con presión constante de 10.3 MPa. La velocidad sufre decrementos de 0.05 m/s cada 40 minutos.
- Fuerza aplicada dentro del rango de 90-420 N (~5-22 MPa) para ensayos con velocidad de deslizamiento constante de 0.35m/s. La presión de contacto se modifica con incrementos de 1 MPa aproximadamente cada 20 minutos.
- Lubricante: aceite sintético PAO-4 ($\nu=18 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ a 40 °C).
- Tiempo de rodaje: 160 min.
- Si durante el periodo del intervalo no se alcanzaba un valor de fricción constante, se mantenían las condiciones hasta que se lograra.

Los datos presentados muestran la presencia de una atmósfera controlada, capacidad de controlar el suministro de lubricante, capacidad de controlar con precisión la variación de carga y velocidad, disponibilidad de tiempo para uso del equipo (500 a ~1000 minutos por ensayo).

Rapoport ²⁶⁻²⁹ estableció la relación entre el valor Z y diferentes elementos, como el coeficiente de fricción, temperatura, rugosidad y dureza indicando también los rangos del valor Z para las diferentes regiones de lubricación. De esto se extrae que para encontrar resultados semejantes, es de suma importancia identificar como producir valores de $3 \times 10^{-3} \leq Z \leq 4 \times 10^{-3}$ por ser el intervalo donde el coeficiente de fricción incrementa drásticamente.

El equipo con el que se trabajó tiene un sistema de medición de velocidad que realiza un registro por segundo y las lecturas realizadas se presentan como múltiplos de 7.5 rpm. Respecto al sistema de carga, el mecanismo se ve afectado por vibraciones mecánicas que no permiten ejercer una carga constante y no está instrumentado, de forma tal que no se puede llevar un registro continuo sobre la carga aplicada. Además, no posee un sistema de goteo automatizado ni cuenta con sistemas para controlar la atmosfera o proveer una realimentación para mantener la velocidad o la carga constantes.

Conociendo el rango de valores determinantes de la transición de lubricación mixta a lubricación de frontera, se sustituyen los valores necesarios en la ecuación para la obtención del número de Schipper. Se presenta un ejemplo a continuación:

Datos.

1. Masa $m=0.45$ kg (masa del portapesas)
2. Gravedad $g=9.78$ m/s²
3. Factor de multiplicación $FMR=32$
4. Área $A_n=36 \times 10^{-6}$ m² (4 láminas calibre 18 de 7.5 mm de largo)
5. Viscosidad cinemática $\nu_c=35.3$ cSt (Mobil ATF D/M)
6. Densidad $\rho=863.7$ kg/m³
7. Rugosidad $R_a=0.721$ μm
8. Radio del perno $r=0.01$ m
9. Velocidad angular $0 < U_s < 1000$ rpm

Para determinar la velocidad de deslizamiento:

$$U_z = \frac{2U_s r \pi}{60} \quad (4.2)$$

Para determinar la viscosidad dinámica:

$$\nu = \nu_c \rho \quad (4.3)$$

Para determinar la presión de contacto nominal:

$$W = \frac{m g F.M.R.}{A_n} \quad (4.4)$$

Para determinar el número de Schipper:

$$Z = \frac{U_z \nu}{W R_a} \quad (4.5)$$

Evaluando para $U_s=50$ rpm como propuesta de valor de cambio constante.

$$U_z = \frac{2\pi \ 50 \text{ rpm} \ 0.01 \text{ m}}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} = 0.05 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\nu = 35.3 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad 863.7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 30.5 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s m}}$$

$$W = \frac{0.45 \text{ kg} \ 9.78 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \ 32}{36 \times 10^{-6} \text{ m}^2} = 3912000 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \text{ m}}$$

$$Z = \frac{0.05 \frac{\text{m}}{\text{s}} \ 30.5 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s m}}}{3912000 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \text{ m}} \ 0.72 \times 10^{-6} \text{ m}} = 2.83 \times 10^{-3}$$

Al evaluar dentro del intervalo de variación de la velocidad angular $0 < U_s < 1000 \text{ rpm}$ se produce una tabla que muestra un rango amplio para poder observar la transición de lubricación mixta a lubricación de frontera como se muestra a continuación:

Tabla 4.3 Cambio de régimen de lubricación en función de la velocidad de giro del motor.

Velocidad angular rpm.	Número de Schipper.	Régimen de lubricación esperado.
$1000 < U_s < 112.5$	$5.7 \times 10^{-2} < Z < 6.4 \times 10^{-3}$	Lubricación elastohidrodinámica
$105 < U_s < 6$	$6 \times 10^{-3} < Z < 3.4 \times 10^{-3}$	Lubricación mixta
$52.5 < U_s < 7.5$	$3 \times 10^{-3} < Z < 4.3 \times 10^{-4}$	Lubricación de frontera

4.4. Procedimiento para la obtención de curvas de Stribeck en tribómetro cilindro sobre placa.

Las curvas Stribeck relacionan paraméricamente el coeficiente de fricción con el parámetro de operación. Por ende, su generación depende de los registros realizados de números adimensionales y del postprocesamiento de dichos datos. Esto demanda establecer un procedimiento para la obtención de dichos parámetros así como para su evaluación. A continuación se describe el protocolo experimental.

- 1) Ajuste de las conexiones mecánicas del tribómetro.
- 2) Conexión del sistema de medición para el primer ensayo.
- 3) Se elaboró un programa que permita recopilar la información adquirida por el sensor de torque al inicio de los ensayos. Este programa incluía los siguientes componentes:
 - a) Un elemento de adquisición de datos periódico.
 - b) Un elemento que permita guardar en un archivo los datos adquiridos.
 - c) Un elemento de visualización en tiempo real de los valores medidos.
- 4) Se colocó una gota lubricante al centro de la superficie a ensayar. Posteriormente se posicionó el

mecanismo evitando el contacto entre el perno y la muestra.

- 5) Se colocó la bureta sobre el perno, con el intervalo de aplicación de lubricante establecido, pero sin que suministrara la dosis (1 gota) hasta cumplir un periodo de medición con duración $n=30$ s.
- 6) Inicio del ensayo: Se arrancó el motor y reguló la velocidad al inicio del ensayo a la velocidad de rodaje establecida $U_s=1000$ rpm.
- 7) Desarrollo del ensayo.
 - a) Dejar funcionar el motor sin carga durante la duración del intervalo establecido para hacer un registro de las variaciones inherentes del sistema al inicio del ensayo.
 - b) Al inicio del siguiente intervalo se aplicó la carga ($F=140.8$ N) y se reguló la velocidad a la establecida.
- 8) Al inicio del siguiente intervalo se modificó la velocidad (reducción de ≈ 50 rpm) según lo establecido por los incrementos de interés definidos para el ensayo. Este inciso se repitió para todas las mediciones restantes según el diseño del ensayo.
- 9) Tras realizar la última variación del parámetro y al inicio del siguiente intervalo, retirar la carga sin apagar el motor y permitir el funcionamiento del motor en vacío durante la duración de un intervalo.
- 10) Apagar el motor y guardar los datos de velocidad.
- 11) Utilizar el algoritmo computacional diseñado en Mathematica[®] para el cálculo de las variables parametrizadas que formarán la curva Stribeck. Dicho algoritmo contiene las indicaciones a seguir para saber las características del ingreso de datos mediante cuadros de diálogo.

Las características que éste algoritmo contiene son la lectura de datos, realizar un filtro de los mismos mediante la aplicación de un promedio de ellos para los intervalos de medición, generar gráficas de las fuerzas normal y de fricción, del coeficiente de fricción, número de Sommerfeld y la curva de Stribeck.

4.5. Ensayos a velocidad constante.

Se desarrollaron ensayos en muestras de aluminio y de acero a velocidad ($U_s=200$ rpm), carga ($F=140.8$ N) y lubricación (1 gota de lubricante cada 30 s) constantes. Se programó que la duración de los ensayos sería de 5 minutos para cada muestra. Con estos ensayos se podrá comparar el efecto del ensayo perno sobre bloque en materiales y condiciones de lubricación diferentes. Se comparará el efecto del ensayo tribológico tanto en la superficie como en la microestructura de las muestras. Para identificar las muestras ensayadas se desarrolló la nomenclatura mostrada en la tabla 4.5. Para diferenciar las micrografías por obtener se consideró diferenciarlas agregando la letra S, para imágenes tomadas de la superficie desgastada por el ensayo, T para las micrografías tomadas de la sección transversal de la muestra y L para las obtenidas de la sección longitudinal.

Tabla 4.4 Nomenclatura para identificación de muestras.

	Sin lubricación	Con lubricación
Acero 1018	Ac1	Ac2
Aluminio puro	Al1	Al2

5. RESULTADOS.

Se presentan dos grupos de resultados. En primer lugar se presenta un ejemplo de los resultados obtenidos por el análisis de los datos obtenidos de los ensayos tribológicos. En segundo lugar se presentan las imágenes obtenidas por microscopía óptica (MO), microscopía electrónica de barrido (MEB) y microscopía de fuerza atómica (MFA) para el análisis superficial y microscopía electrónica de barrido para el análisis microestructural.

5.1. Curva de Stribeck

Los resultados de los ensayos realizados con el procedimiento para obtener curvas de Stribeck no son similares a los esperados. Se presentan los gráficos del torque y velocidad angular medidos por los sensores del tribómetro y el gráfico correspondiente a la curva de Stribeck resultante del postprocesamiento de los datos registrados.

El programa desarrollado en Mathematica[®], para generar las curvas de trabajo, considera la viscosidad, el área nominal, la carga y la rugosidad constantes. Debido a que la velocidad se mantiene aproximadamente constante a lo largo de cada periodo, es necesario encontrar el valor medio de la velocidad así como del torque medidos. Con éstas características, el programa ha generado gráficos que en su mayoría no son compatibles con la geometría de la curva de Stribeck ya reportada en la literatura y/o el rango adecuado.

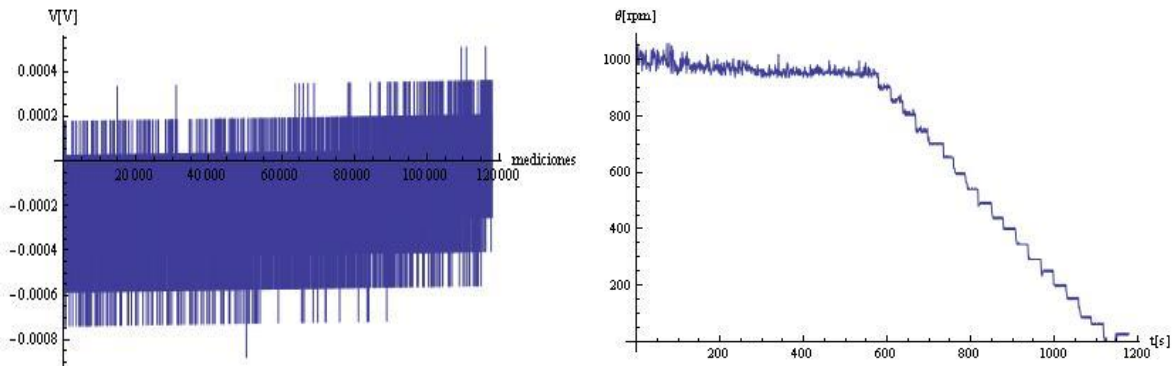


Figura 5.1 Gráficos de torque (izquierda) y velocidad (derecha). Presión de contacto ≈ 3.92 MPa.

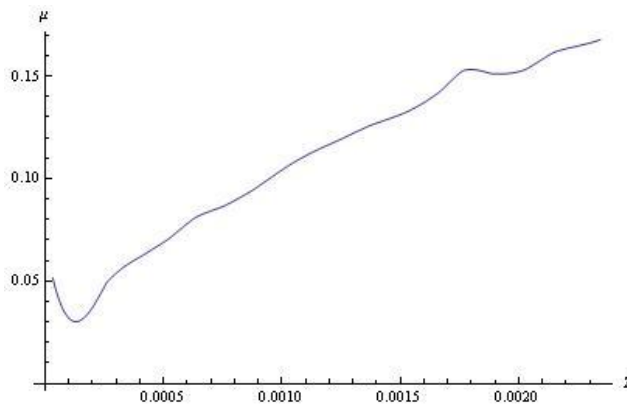


Figura 5.2 Curva de Stribeck. Presión de contacto ≈ 3.92 MPa.

Se observa un coeficiente de fricción mínimo de 0.03 para $Z=1.2 \times 10^{-3}$. Rapoport ²⁶⁻²⁹ reportó un coeficiente de fricción similar para $Z=4 \times 10^{-3}$ y coeficientes de fricción menores para $4 \times 10^{-3} < Z < 10 \times 10^{-3}$. El rango de valores de Z presentados en la Figura 4.4 son mucho más bajos que los reportados por Rapoport a pesar de que las adecuaciones realizadas buscaban encontrar resultados similares. Para el rango de valores de Z presentados el coeficiente de fricción es notoriamente bajo. El rango de valores de Z corresponde al coeficiente de fricción para un sistema con lubricación de frontera. Esto se considera el principal indicador de que el procedimiento utilizado no cumple el objetivo de obtener curvas de Stribeck precisas y que permitan diferenciar los diferentes regímenes de lubricación.

Los ensayos realizados mostraron complicaciones para mantener una velocidad constante del motor en el inicio del ensayo. Para comprobarlo se realizó una prueba en vacío y se registró la velocidad medida por el disco encóder. Esta variación consistió principalmente en una reducción en la velocidad durante los primeros 12 minutos, siendo más acentuada en los primeros 3 minutos como se muestra en la figura 4.1.

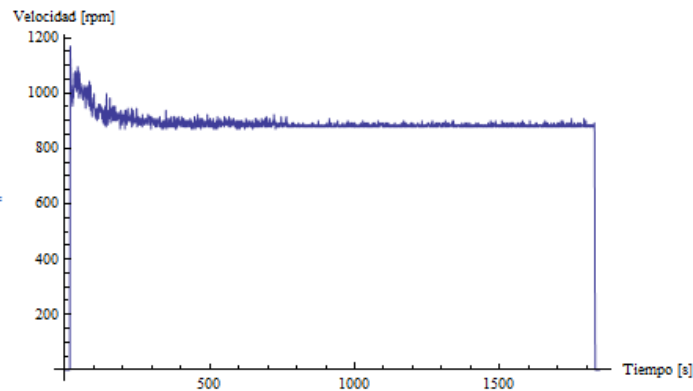


Figura 5.3 Cambio en la velocidad de giro del motor.

5.2. Análisis de las muestras ensayadas a velocidad constante.

Las muestras sometidas a ensayos con parámetros constantes tuvieron un comportamiento significativamente diferente durante los ensayos. El desgaste de las muestras ensayadas sin lubricación fue significativamente mayor y a una velocidad de desgaste superior a la de las muestras a las que se les aplicó lubricante. Para las muestras ensayadas sin lubricante se tuvo que detener la prueba antes de cumplir dos minutos de iniciado el ensayo por el excesivo desgaste sufrido, mientras que las muestras donde se aplicó el lubricante completaron el ensayo sin alcanzar el mismo nivel de desgaste.

Para evitar modificar las superficies ensayadas en las muestras, éstas fueron colocadas en un baño de acetona y se realizó una limpieza ultrasónica. La limpieza realizada eliminó la película de lubricante formada en la muestra y los residuos sobrepuestos en la superficie ensayada.

5.2.1. Superficie de las muestras ensayadas.

5.2.1.1. Mediante microscopía óptica.

El uso de esta técnica permite comparar macroscópicamente el daño sufrido por las superficies de las muestras. A través de dicha inspección se pudo apreciar la diferencia en la profundidad de los surcos

formados. Se observa que los surcos son más acentuados en las superficies sin lubricar que en las superficies donde se utilizó lubricante. Se observa que el daño sufrido por la muestra de acero donde no se aplicó lubricante es el mayor producido entre las muestras analizadas.

Existen surcos más marcados en la muestra de acero que en la muestra de aluminio para ensayos sin lubricante. Esto señala que el deslizamiento sin lubricante entre dos materiales muy semejantes, como es el caso del acero del perno y el acero de la muestra, puede producir un mayor daño a las superficies de materiales similares que el deslizamiento sin lubricante entre dos materiales diferentes, como el caso del acero del perno y el aluminio de la muestra.

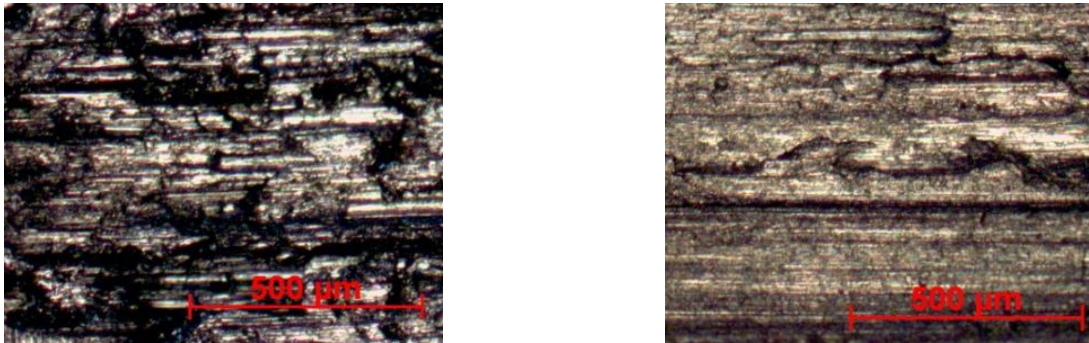


Figura 5.4 Sección central de la superficie desgastada a 50X De izquierda a derecha: a) Ac1, b) Al1

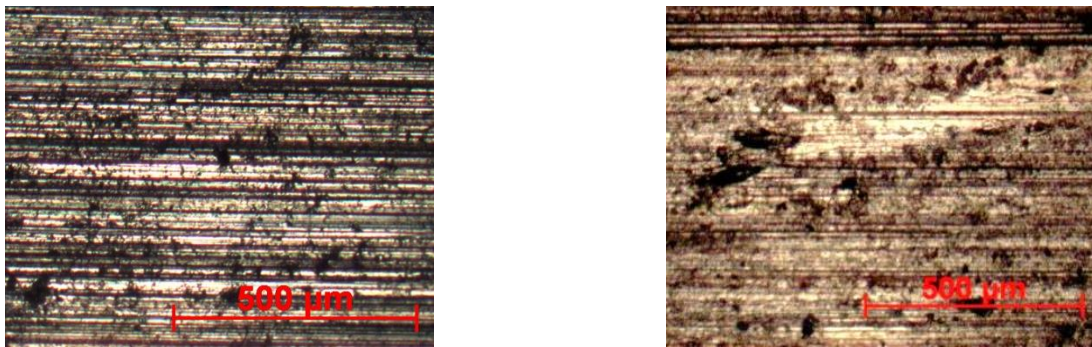


Figura 5.5 Sección central de la superficie desgastada a 50X De izquierda a derecha: a) Ac2, b) Al2

Una explicación para este fenómeno la presenta Rabinowicz⁴⁰ al señalar que dos materiales iguales pueden tener un mayor coeficiente de fricción debido a la compatibilidad metalúrgica que exista entre ellos, es decir, la capacidad de un metal de ser soluble en otro metal y, como antes se mencionó, un alto coeficiente de fricción produce un alto desgaste de uno o más materiales.

La comparación entre los surcos de las muestras del mismo material permite concluir que el uso del lubricante reduce el daño que el contacto deslizante del perno produce sobre la muestra, como previamente observó Maru.³¹

La muestra de acero presenta interrupciones en los surcos por vacíos profundos causados por material arrancado, fenómeno observable en un mecanismo de desgaste adhesivo, aunque es más evidente al hacer la revisión a mayores aumentos. La muestra de aluminio tiene los surcos más definidos aunque se

encuentran interrumpidos, por material sobrepuesto que fue arrastrado de su posición inicial, evidencia común de un desgaste adhesivo.

Debido a que la superficie de las muestras lubricadas de acero y aluminio no ha sufrido un desgaste tan drástico como las otras dos se considera que es necesaria una inspección más profunda para realizar algún diagnóstico.

5.2.1.2. Mediante microscopía electrónica de barrido.

El uso de este microscopio permitió eliminar el desenfoque producido por la irregularidad de las superficies así como realizar observaciones a mayores aumentos con gran detalle.

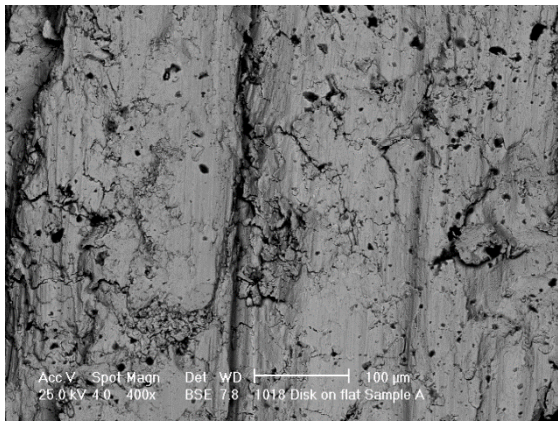


Figura 5.6 Superficie en muestra Ac1.

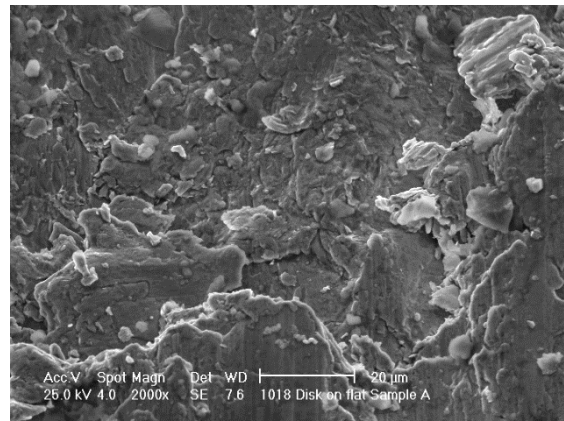


Figura 5.7 Evidencias de desgaste adhesivo en Ac1.

En las figuras 5.6 y 5.7 se observa una gran irregularidad de la superficie producto del contacto con el perno en movimiento. En la figura 5.6 se observan surcos verticales de varias profundidades que al observarse a simple vista dan el efecto de arado generado por el campo de deformaciones por debajo de la superficie; también se observan depresiones de área y profundidad variables producidas por secciones desprendidas mismo material. En la figura 5.7 es posible ver diferentes capas que conforman la superficie resultante y en algunas de ellas se puede apreciar trayectorias de deslizamiento diferentes entre ellas producto de las deformaciones por debajo de la superficie. Por las menciones anteriores se puede identificar un mecanismo de desgaste adhesivo con la formación de una tribocapa.

En la figura 5.8 se observa un crecimiento de uno de los extremos de la muestra, provocado por la fricción entre el perno y la muestra. Este crecimiento es resultado de la unión de materiales desprendidos del material base al mismo, visible por las diferentes trayectorias de deformación en la parte inferior izquierda de la imagen, mostrando que el proceso de formación de tribocapas incluye el desprendimiento de hojuelas superficiales del material y su reincorporación al material base. Se observa que la unión de una hojuela al material base evitó el desprendimiento de la sección extendida formada por la existencia de una grieta que alcanza el extremo izquierdo de la imagen pero no llega hasta el extremo derecho.

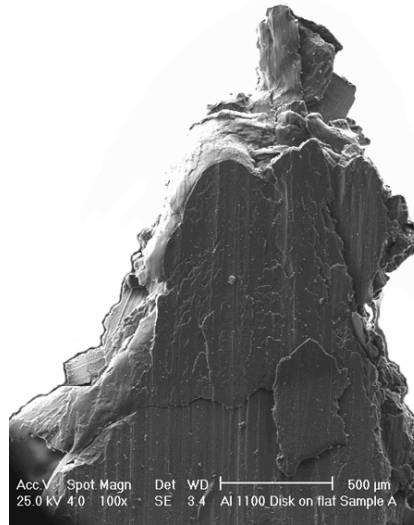


Figura 5.8 Extensión del material formada en una muestra Al1.

La figura 5.9 muestra un fragmento de la sección inferior izquierda de la imagen 5.8 pero observada con el detector de electrones retrodispersados, mostrando la presencia de materiales con diferentes densidades. La región gris corresponde al aluminio de la muestra y los puntos blancos corresponden a los intermetálicos Al-Fe presentes en aluminio de pureza comercial.

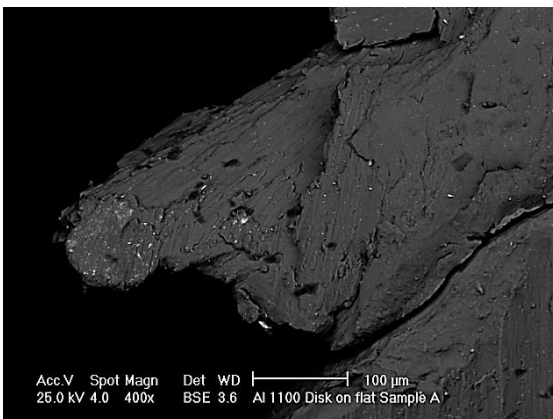


Figura 5.9 Partículas de hierro en sección con diferentes orientaciones de deformación en muestra Al1.

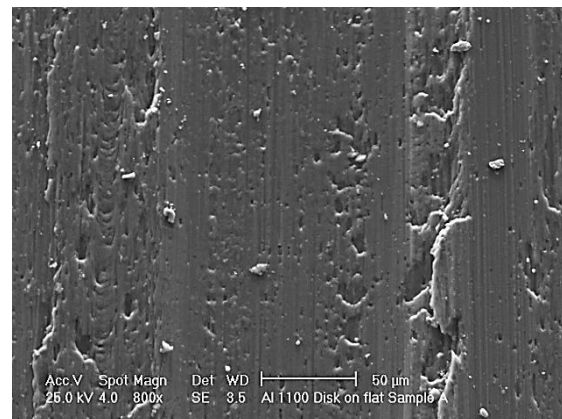


Figura 5.10 Evidencias de desgaste adhesivo en muestra Al1.

En la figura 5.10 se observa la superficie de la muestra, donde se aprecia el patrón típico asociado al desgaste adhesivo, parcialmente escondido por el material que ha sido arrastrado por el perno. En algunas secciones emergió material, efecto del flujo plástico por debajo de la superficie de la muestra y fue desplazado biaxialmente en la dirección de deformación y en las direcciones normales a esta última sobre la superficie, producto de los efectos de fricción. Dicho material embarrado en la superficie suele formar bordes irregulares que tienden a ser perpendiculares a la dirección de la deformación y, en ocasiones, también pueden formarse grietas. Todas estas señalizaciones indican un desgaste mayoritariamente adhesivo.

Un leve deterioro se aprecia en la figura 5.11 producto del ensayo tribológico con lubricante. La presencia del lubricante disminuye los contactos entre las asperezas de ambas superficies con lo que también disminuye el desgaste de la muestra como se observa en la suavidad de las trayectorias de deformación presentes y la reducción de secciones deterioradas en la superficie la muestra en comparación con las muestras ensayadas sin lubricante.

La figura 5.12 corresponde a un extremo de la huella, donde terminaba el contacto con el perno, aquí nuevamente se generó una leve prolongación por efecto de la deformación. Se observa la ausencia de los surcos previamente vistos, lo cual puede estar basado en que el soporte de la prolongación es menor que el soporte de la superficie al centro de la muestra.

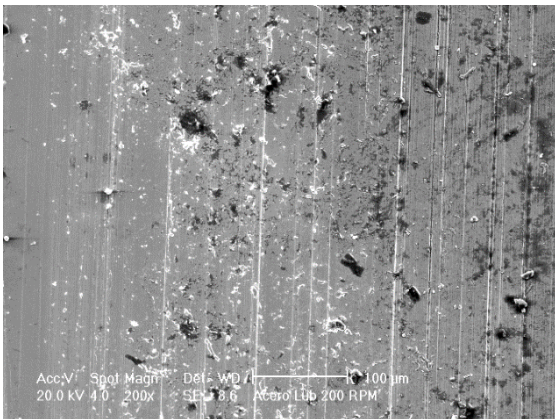


Figura 5.11 Características superficiales generales en muestra Ac1.

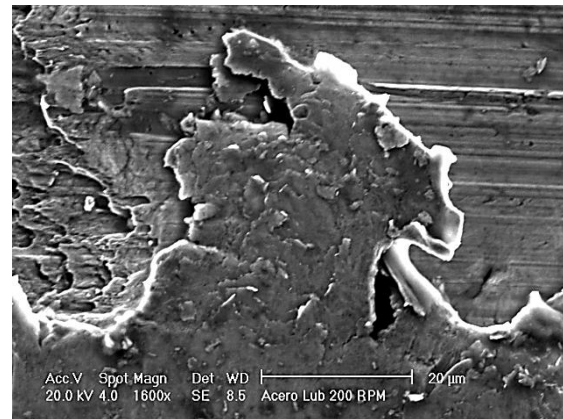


Figura 5.12 Crecimiento en extremo de muestra Ac1.

Realizando una magnificación de la superficie observada se obtuvo la figura 4.14 en la que geometrías similares a las encontradas en las muestras ensayadas sin lubricación, figuras irregulares, residuos desprendidos y reubicados durante el ensayo, se observan sobre líneas que indican la dirección de deformación. Por esta evidencia se confirma la presencia de desgaste adhesivo como uno de los mecanismos presentes a lo largo del ensayo.

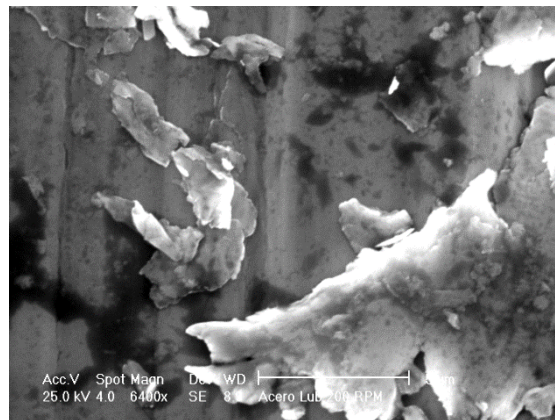


Figura 5.13 Evidencias de desgaste adhesivo en Ac1.

Las muestras de aluminio ensayadas con lubricante fueron aquellas que tuvieron su superficie menos maltratada en comparación con los otros casos. Esto se puede apreciar en las figuras 5.14 y 5.15 en donde diferentes secciones de la misma muestra se aprecia una superficie muy lisa en la que sobresalen algunas partículas que podrían ser desechos de la muestra que quedaron adheridos, o como se había mencionado antes, parte del material base que brotó por efectos de la deformación, visible por las líneas de flujo del material. En la figura 5.14 también puede observarse un levantamiento en la parte inferior de la muestra y como material desplazado hacia la derecha de la imagen, modificando la sección de contacto considerada en la muestra.

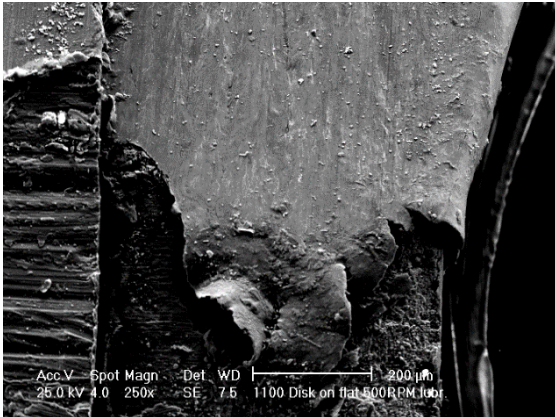


Figura 5.14 Cresta formada en extremo de Al2.

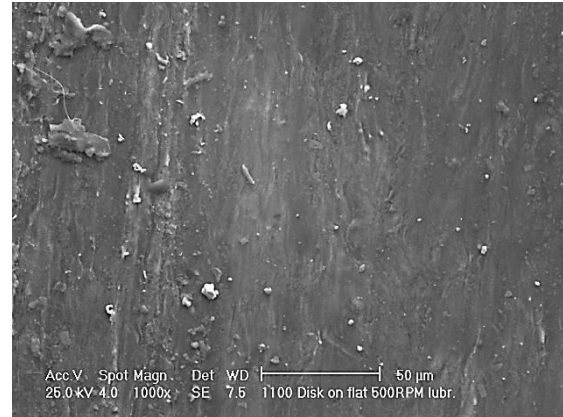


Figura 5.15 Características generales de la superficie en Al2.

En las figuras 5.16 y 5.17 siguen sin apreciarse surcos pero se llegan a observar las líneas de flujo del material. Tampoco se observan claramente las evidencias antes mencionadas para considerar desgaste adhesivo. En ambas imágenes pueden observarse partículas que sobresalen ampliamente de la superficie, partículas que pudieron ser previamente removidas y en algún instante recolocadas. La figura 5.16 muestra pliegues encontrados formados por la deformación plástica aunque este no fue un fenómeno común en la muestra. En la figura 5.17 parece observarse material que sobresale y se encima en la superficie, fenómeno que se observó recurrentemente en la muestra de aluminio ensayada sin lubricante.

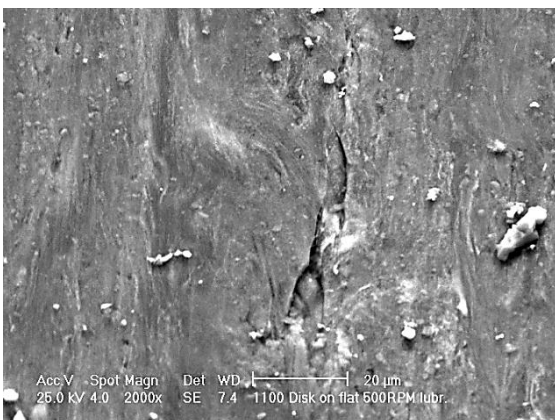


Figura 5.16 Pliegue producto de la deformación plástica en la superficie de una muestra Al2.

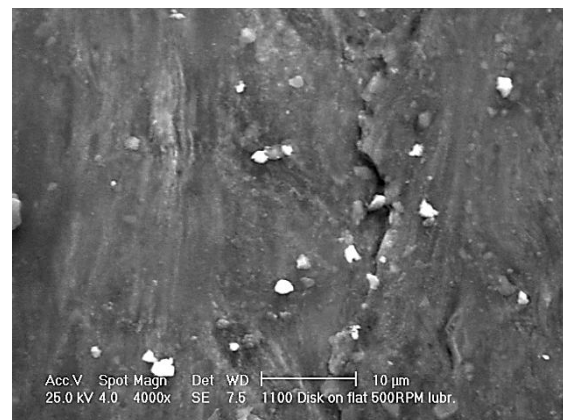


Figura 5.17 Material sobresaliente en muestra Al2.

5.2.1.3 Mediante microscopía de fuerza atómica.

La inclusión de este método de caracterización parte del interés de obtener una alta resolución del perfil superficial resultante de los ensayos realizados, así como los valores de rugosidad previamente mencionados. Se tuvo presente que, dados los rangos de medición máximos permitidos por el equipo (sección cuadrada de 100 μm por lado y altura 7 μm) no sería posible medir completamente la superficie resultante del ensayo, siendo la obstrucción más importante la curvatura generada por el perno sobre la muestra. Por ello se modificó la muestra dejando intacta la sección central de la muestra. Se encontró que el área medible debía ser aún menor debido a que la superficie de la muestra de acero no lubricado contenía variaciones de altura muy significativas, las cuales comprometían la integridad del elemento de medición del equipo.

Para la obtención del perfil superficial se redujo el área de escaneo de la muestra evitando secciones con grandes cambios superficiales. El área medida para todas las muestras fue una sección cuadrada de 5 μm por lado con fines comparativos.

Tabla 5.1 Perfiles de rugosidad medidos de las muestras presentadas.

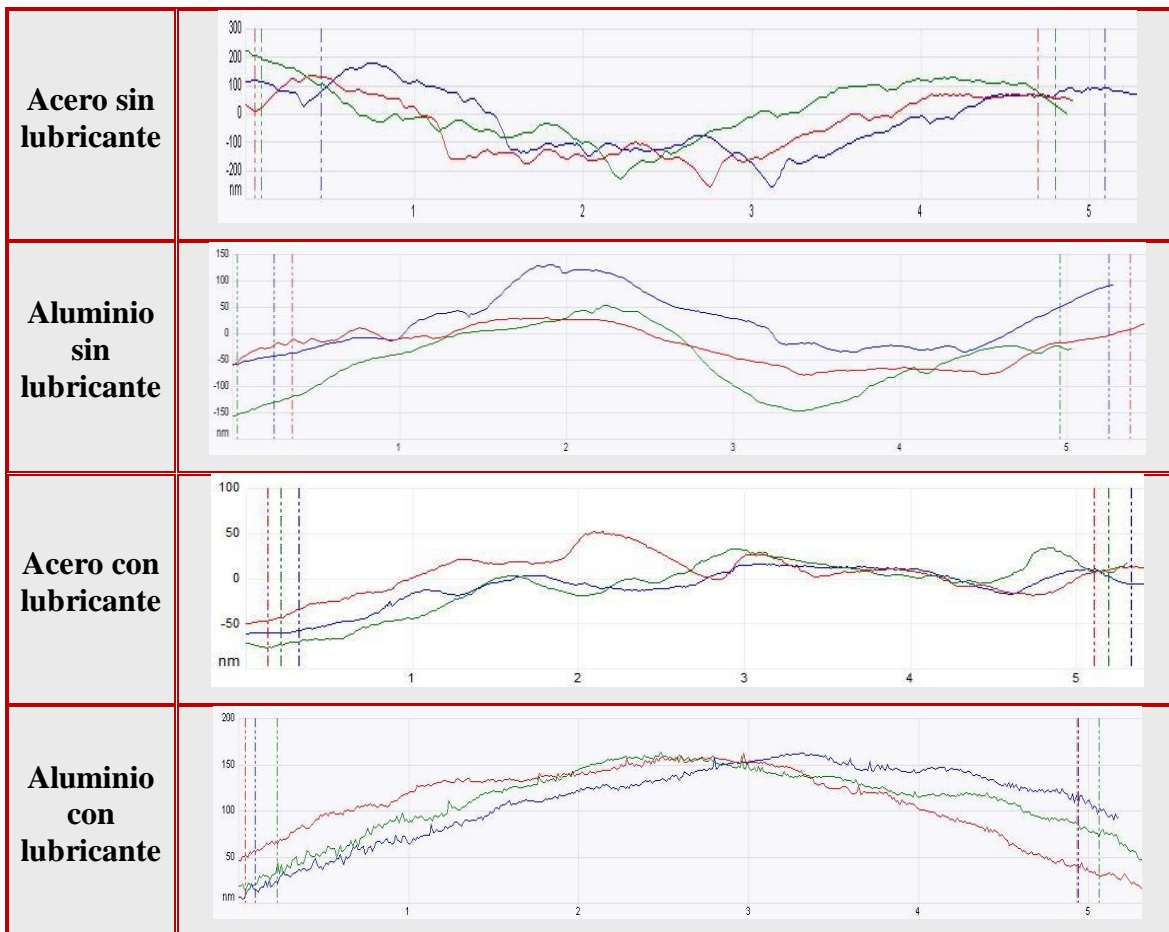
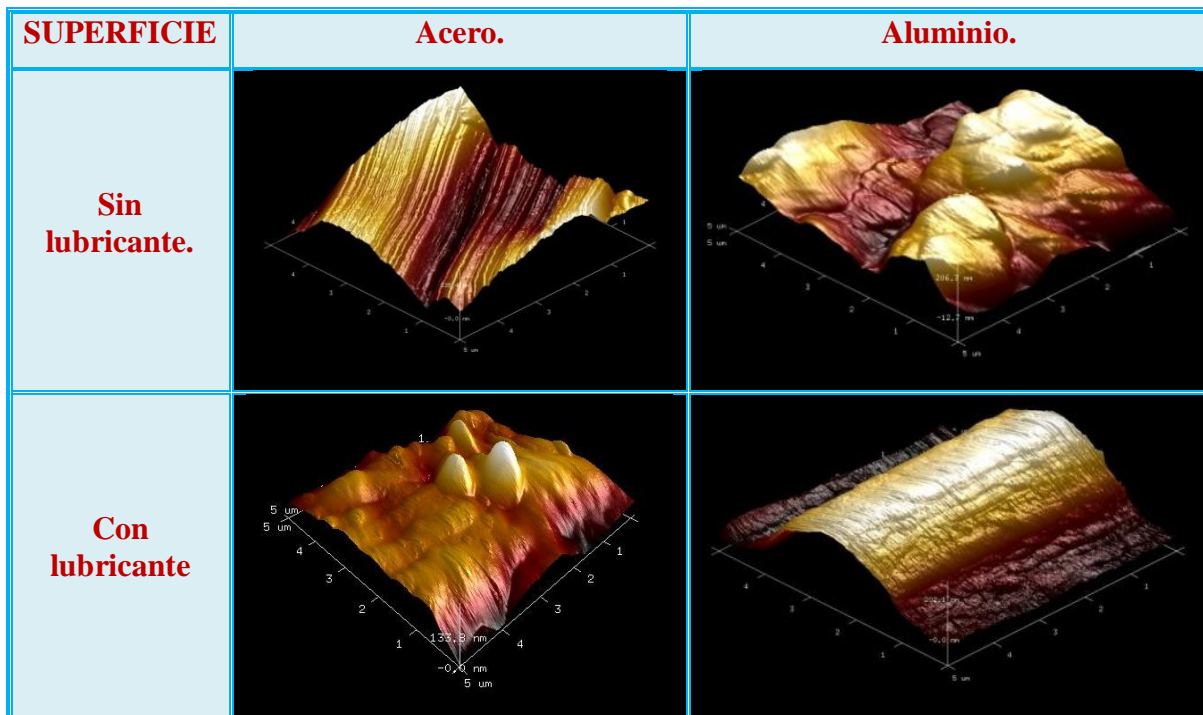


Tabla 5.2 Cuadro resumen de la rugosidad de los perfiles medidos.

Rugosidad	Perfil	Rmax nm	Rz nm	Rms nm
Acero sin lubricación	Azul	422.9	222.8	110.2
	Rojo	395.6	395.6	104.7
	Verde	453.9	193.8	102.7
Aluminio sin lubricación	Azul	171.122	168.691	52.607
	Rojo	105.093	45.255	35.503
	Verde	207.287	200.905	59.873
Acero con lubricación	Azul	50.927	16.169	22.020
	Rojo	93.593	42.927	22.851
	Verde	62.886	41.738	31.200
Aluminio con lubricación	Azul	92.653	18.553	42.155
	Rojo	143.000	60.739	32.952
	Verde	118.863	16.506	36.630

Tabla 5.3 Superficies de las muestras ensayadas.



Dicha acción obliga a tener en consideración que la sección medida es de un tamaño tan pequeño que no es representativa de la superficie general de la muestra. Para obtener el perfil superficial de toda la muestra, una solución sería el uso de un perfilómetro, aunque esto implica sacrificar resolución en la medición debido a los alcances de dicho equipo.

A pesar de que las secciones medidas sólo representan un área muy pequeña de la muestra de donde son extraídas, los resultados son congruentes con lo previamente mencionado. Comparando la rugosidad entre materiales, para barridos de aproximadamente 5 μm de longitud, se encuentra que ésta es mayor para el acero ($\approx 2:1$) que para el aluminio. Después de comparar la rugosidad entre muestras lubricadas y no lubricadas, para ambos materiales se encontró una mayor rugosidad en las muestras donde no fue aplicado el lubricante.

5.2.2. Microestructura de las muestras ensayadas.

Para la caracterización microestructural de las muestras se realizó la metalografía a la sección correspondiente a la inspección y la aplicación de un ataque químico adecuado para la revelación de la microestructura.

Este procedimiento fue fructífero en las muestras de acero donde, con la aplicación de Nital al 3% durante 10 segundos, se logró apreciar con claridad el límite de grano en la muestra, característica de gran importancia para la apreciación de la deformación sufrida por la muestra.

Para las muestras de aluminio los resultados no fueron efectivos. Se probaron tres reactivos diferentes enfocados a revelar el límite de grano en aleaciones de aluminio de alta pureza, durante diferentes tiempos de exposición. Las soluciones utilizadas fueron:

1. 1% ácido fluorhídrico (HF), 1.5% ácido clorhídrico y 2.5% de ácido nítrico en agua destilada.
2. 0.5% ácido fluorhídrico (HF) en agua destilada.
3. 3% ácido nítrico (HNO_3) y 20% ácido acético (CH_3COOH) en ácido fosfórico (H_3PO_4)

Debido a que no pudo obtenerse una adecuada revelación de la microestructura, problema típico en el estudio de las aleaciones de aluminio, el análisis microestructural que se presenta está dominado por micrografías extraídas de las muestras de acero.

5.2.2.1. Ensayos sin lubricación.

Las figuras 5.18 y 5.19 presentan imágenes obtenidas con el detector de electrones retrodispersados. La figura 5.18 corresponde a una muestra de aluminio seccionada transversalmente respecto a la dirección de deformación mientras que la figura 5.19 a la sección longitudinal de otra muestra de aluminio.

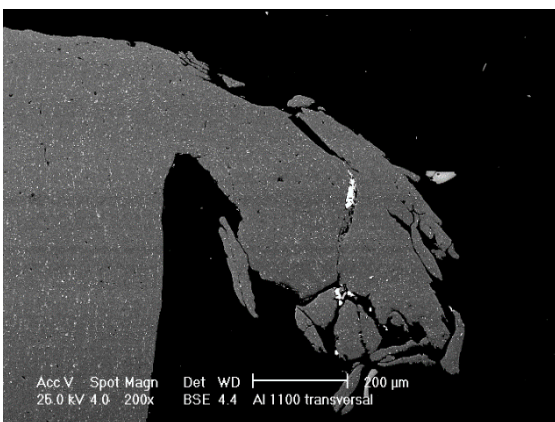


Figura 5.18 Crecimiento de una pestaña lateral en muestra Al1.

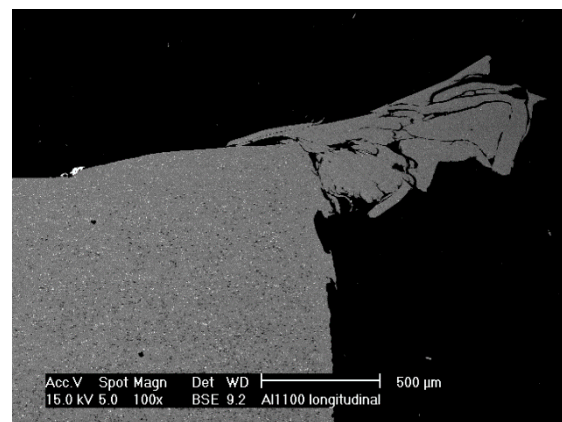


Figura 5.19 Pestaña formada por hojuelas de aluminio deformadas en Al1.

En la figura 5.18 se observa como la pestaña formada lateralmente y la superficie consisten de una serie de hojuelas de aluminio desprendidas, resoldadas y desplazadas por el flujo plástico del material en las capas cercanas a la superficie de la muestra de aluminio. En la parte izquierda de la imagen se aprecian intermetálicos de Al-Fe mostrando una orientación vertical, correspondiente a la deformación para la elaboración de la lámina usada. Dichos intermetálicos muestran un desordenamiento al acercarse a la parte superior de la muestra y en el crecimiento lateral de la misma. Al centro de la imagen resaltan partículas blancas de mayor tamaño que los intermetálicos de la aleación que son partículas de acero desprendidas del perno que quedaron incrustadas en la superficie y por el flujo plástico terminaron en dicha posición.

En la imagen 5.19 se observa que el desarrollo de pestañas en los extremos de la muestra depende de la unión de fragmentos desprendidos a los extremos de la muestra, reposicionados por el flujo plástico del material. Se encontró también una partícula de acero en la superficie de la muestra, donde ocurría el contacto con el perno, de un tamaño similar a las previamente mostradas.

Las figuras 5.20 a 5.26 corresponden a muestras de acero ensayadas sin lubricante. Se muestra la sección transversal en las figuras 5.20 a 5.23 y la sección longitudinal en las figuras 5.24 a 5.26.

La figura 5.20 muestra la variación en tamaño de grano por efecto de la deformación de acuerdo a su proximidad a la superficie. Se observa una microestructura ferrítica en la sección no deformada de la muestra con algunos granos de perlita. En la imagen también se aprecian hojuelas adheridas a la superficie por efecto de la delaminación que el ensayo provoca, sin embargo, se aprecia que donde dichos fenómenos ocurrieron llega a ser más profundo el efecto de la deformación debido a la penetración de las hojuelas en la superficie y de vacíos que no pudieron ser eliminados.

Es posible observar diferentes niveles de deformación en la figura 5.21, donde en la parte superior de ella se aprecian los granos más alargados, con espesor muy limitado y en la parte inferior granos de menor longitud pero mayor espesor. En la sección superior de la figura 5.21 se pierde detalle de la imagen por el grado de deformación sufrido pero, casi imperceptiblemente, se aprecian múltiples puntos negros que no están presentes donde ocurrió menor deformación.

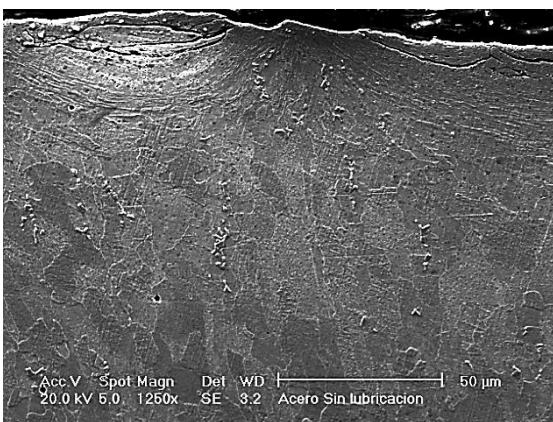


Figura 5.20 Variación del tamaño de grano en muestra Ac1.

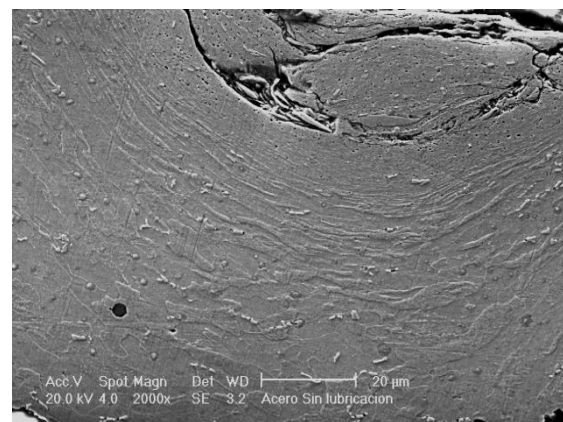


Figura 5.21 Diferentes tamaños de grano en uno de los rizos de una muestra de Ac1.

Los puntos negros encontrados en la sección de mayor deformación no son exclusivos a esa zona en la rebaba, sino que fueron encontrados en gran volumen en las regiones de mayor deformación de la muestra. En la figura 5.22 se puede apreciar una gran cantidad de ellos en los 10 μm más cercanos a la superficie y luego disminuye la cantidad drásticamente, donde se empiezan a hacer evidentes los granos alargados del acero y la deformación generada es menor. En la figura 5.23 se muestran algunos de esos puntos negros encontrándose que son vacíos con formas redondeadas o poligonales de diámetros menores a 0.5 μm .

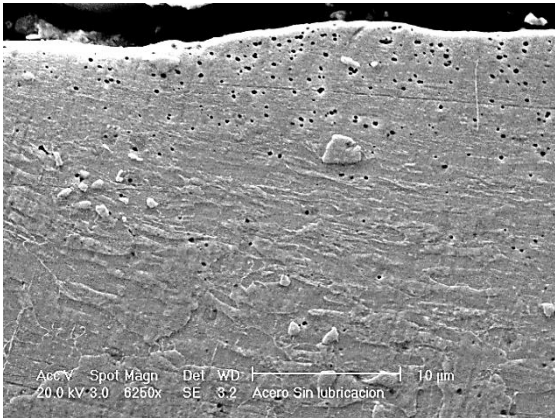


Figura 5.22 Acumulación de poros en las capas cercanas a la superficie de una muestra Ac1

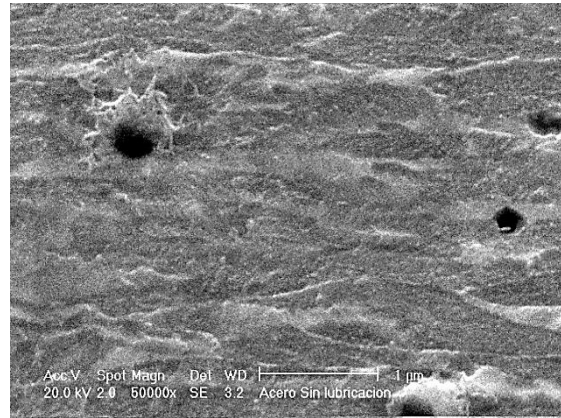


Figura 5.23 Poros de diferentes tamaños cercanos a la superficie de una muestra Ac1.

Estos vacíos pueden ser consecuencia de la alta deformación sufrida en la tribocapa. La formación de vacíos por deformación plástica severa se ha encontrado en diferentes materiales y ha generado diferentes propuestas entre las que se encuentran: la formación de vacíos debido a la acumulación en exceso de volumen libre en el material ^{41, 42} y la formación de vacíos por la liberación de esfuerzos generados por los procesos de deformación plástica severa. ^{43, 44}

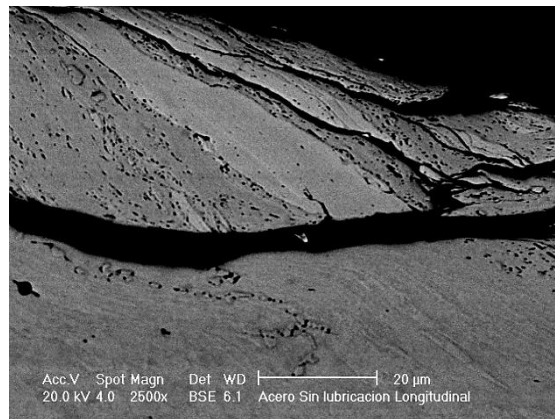


Figura 5.24 Colaminación accidental de diferentes aceros en una muestra Ac1.

Se encontró una sección superficial incongruente al comportamiento mostrado por el material próximo a la superficie, al centro en diagonal ascendente de la figura 5.24. Se identificó que esa sección estaba constituida por láminas de diferentes materiales, donde la lámina de mayor tamaño y de un material diferente al de la muestra es la previamente mencionada. Se puede identificar por tener coloración más

clara que el correspondiente a la muestra y por una menor densidad de vacíos. Se observa también que la mitad superior de la figura 5.24 está conformada por láminas reposicionadas en la superficie y separadas por las divisiones entre ellas de color negro de la baquelita usada para la elaboración de la probeta.

En las zonas con bajo nivel de deformación la ferrita es la microestructura dominante en las muestras de acero, sin embargo en las zonas deformadas no se puede apreciar lo mismo. Se observa en la figura 5.25 el detalle de una sección con muchos vacíos del lado izquierdo de la imagen 5.24. En la figura 5.26 se observa una nanoestructura con carburos, correspondiente a una sección central de la figura 5.24. Se observa fácilmente que la nanoestructura mostrada en la figura 5.25 es diferente a la mostrada en la figura 5.26.

En las investigaciones donde se reportan vacíos producidos por severa deformación plástica se reporta un tamaño promedio de 100 a 150 nm⁴² hasta de 300 nm⁴¹ para para la sección transversal de los vacíos.

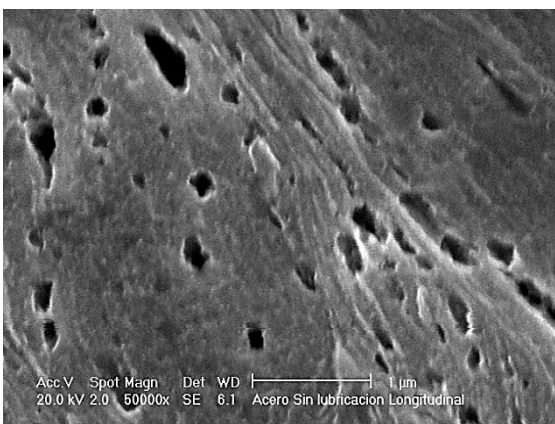


Figura 5.25 Nanoestructura con poros generados por la severa deformación plástica en la superficie de una muestra Ac1.

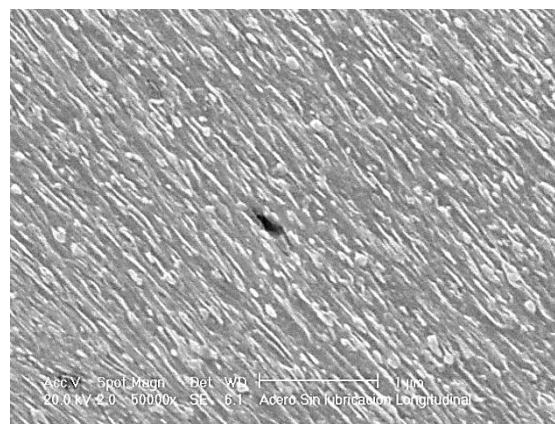


Figura 5.26 Nanoestructura con carburos finamente distribuidos de un fragmento del perno depositado en la muestra de acero.

Aunque el procedimiento utilizado en los ensayos tribológicos realizados no es un procedimiento para generar elevadas deformaciones en toda la muestra, las capas cercanas a la superficie fueron severamente deformadas. Esa elevada deformación generó un refinamiento de grano a nivel nanométrico y vacíos de dimensiones entre 100 y 400 nm en las muestras acero (Figuras 5.24 a 5.26).

Para validar si los vacíos encontrados fueron producidos durante el ensayo tribológico y tener un mejor entendimiento del proceso de formación de tribocapas es necesario un equipo que asegure la repetibilidad y el control de los ensayos.

5.2.2.2. Ensayos con lubricación.

Las imágenes 5.27 y 5.28 corresponden a muestras de aluminio ensayadas con lubricante. Como previamente se mencionó, el esfuerzo para obtener la microestructura del material para apreciar el cambio de tamaño de grano por efecto de la deformación fue infructuoso, dejando como información relevante de estas muestras: la apreciación de secciones de aluminio desprendiéndose, como en la figura 5.27, o siendo reposicionadas, figura 5.28, y la modificación en la orientación y el tamaño de los intermetálicos de Al-Fe por efecto de la deformación.

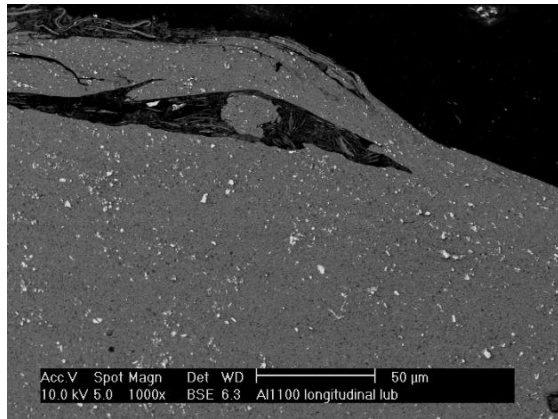


Figura 5.27 Capa de aluminio en proceso de desprendimiento durante ensayo con lubricación.

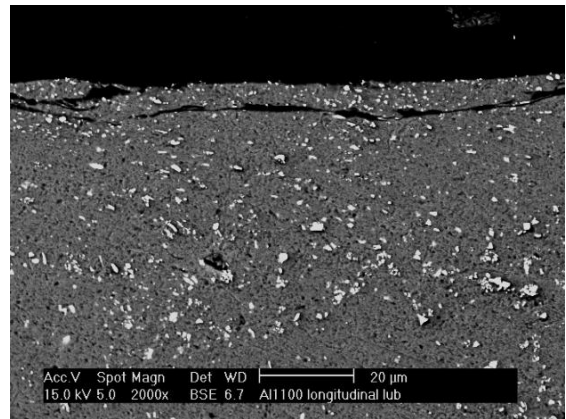


Figura 5.28 Hojuela de aluminio reincorporada a una muestra Al2.

Las figuras 5.29 a 5.33 corresponden a imágenes de acero en ensayo con lubricante donde las imágenes 5.29 a 5.31 corresponden a una sección transversal de una muestra mientras las micrografías 5.32 y 5.33 presentan fotografías a una muestra seccionada longitudinalmente.

En la imagen 5.29 se observa el extremo de una pestaña desarrollada, es visible el alargamiento de los granos, partículas de cementita y cavidades elongadas adyacentes a estos fragmentos. Es notorio que en las cercanías del extremo libre del crecimiento en la muestra donde se utilizó lubricante se puede medir un espesor aproximado de 20 μm mientras que en la muestra sin lubricante se tiene un espesor aproximado de 100 μm .

La figura 5.30 muestra que los efectos de la deformación penetraron más allá de una laminilla incrustada en la superficie de la muestra para un alcance menor a 5 μm pero los mismos efectos de la deformación alcanzaron la mitad de dicha profundidad para una partícula diminuta contigua. Esto indica que las laminillas reincorporadas forman parte de la tribocapa. Se observan vacíos previamente ocupados por inclusiones y fragmentos de cementita comunes en el material.

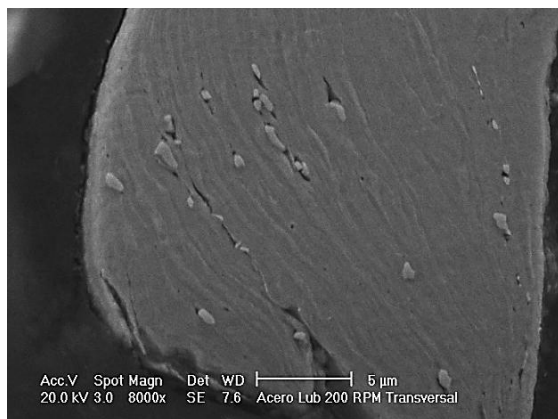


Figura 5.29 Microestructura del crecimiento lateral de una muestra Ac2.

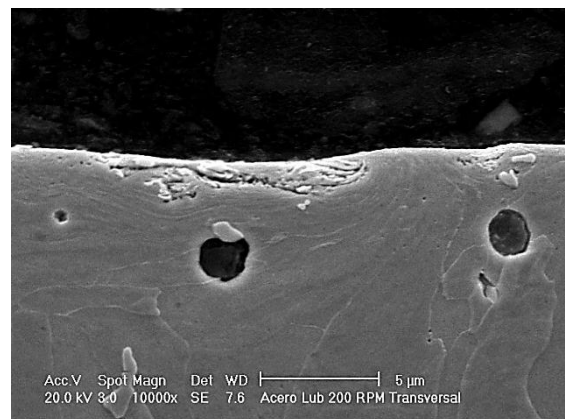


Figura 5.30 Tribocapa en una muestra Ac2 con poca profundidad de deformación.

Una estructura muy fina se observa en la figura 5.31 en las proximidades de la superficie, en la sección central, donde se observa una gran irregularidad de fragmentos de cementita, cavidades comprimidas y elongadas y algunos pequeños poros esféricos similares a los encontrados en las muestras de acero en pruebas sin lubricación.

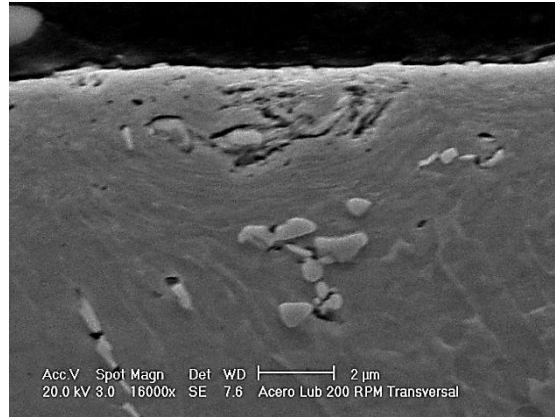


Figura 5.31 Tribocapa en una muestra Ac2.

Una microestructura con granos alargados se muestra próxima a la superficie en la figura 5.32 pero la orientación varía en la proximidad a un alargamiento del material que inicia en el lado derecho de la imagen. A partir de la punta de la rebaba hasta el extremo derecho de la imagen se observa una mayor deformación de los cristales de ferrita. Se muestra un fragmento de la tribocapa en proceso de desprendimiento en la superficie de la figura 5.33 y se observa que los granos altamente deformados parecen encontrarse hasta 5 μm de profundidad. Pequeñas grietas están presentes antes de los límites de la deformación severa de la muestra.

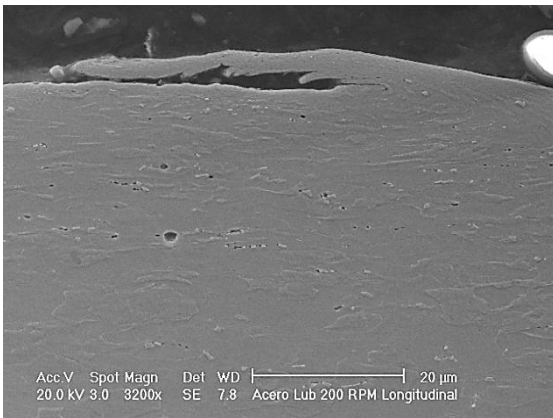


Figura 5.32 Elongamiento superficial de una muestra Ac2.

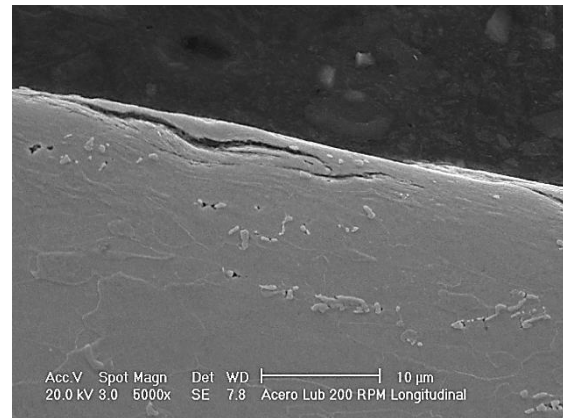


Figura 5.33 Tribocapa en una muestra Ac2.

Se ha observado en las últimas micrografías que los segmentos alargados que sobresalen a la geometría inicial de la muestra y la profundidad en que se propagan los efectos de la carga y la deformación inducida por el perno son significativamente menores en las muestras donde se utilizó el lubricante, mostrando su alta importancia en la reducción de los efectos de contacto y por debajo de la superficie.

6. DISCUSIÓN.

A partir de los ensayos realizados se puede realizar un análisis del funcionamiento del equipo mediante el análisis de los subsistemas que lo conforman. Se consideró como cada subsistema al elemento o conjunto de elementos diseñados y manufacturados por los últimos tres proyectos, incluido éste.

A partir de dicho análisis se realizan proposiciones que pueden fortalecer el conjunto de proyectos que se pretendan desarrollar dentro del campo de la tribología.

6.1. Diagnóstico de las pruebas realizadas.

6.1.1. Observaciones con respecto a las adaptaciones realizadas.

El soporte del mecanismo posicionó con buena estabilidad al mecanismo.

Los brazos de sujeción cumplieron con la función de evitar el desplazamiento del mecanismo y mantener en la posición adecuada al soporte de rodamiento.

El rodamiento auxiliar sujetó efectivamente el perno para evitar la deflexión del eje del tribómetro en el acoplamiento pero afectó el funcionamiento del mecanismo. Con la adición del nuevo rodamiento se perdió el grado de libertad en el acoplamiento flexible conservándose una leve desalineación entre el eje del motor y el perno. La desalineación produjo que el mecanismo sufriera las vibraciones producidas por el giro del perno.

El perno se mantuvo en posición y la cara cilíndrica destinada a los ensayos tuvo buen contacto con las muestras.

La prensa tuvo un buen desempeño sujetando las muestras.

La implementación de la bureta no fue muy efectiva, se presentó el efecto de columna de fluido provocando que el suministro del lubricante no fuera constante. Aunado a ello, la válvula no era controlable fácilmente para establecer un goteo específico o el goteo necesario estaba fuera de los límites permisibles por la válvula.

6.1.2. Observaciones acerca del funcionamiento del tribómetro.

El motor cumplió al tener la capacidad de proporcionar una velocidad angular mayor a la necesaria. Como previamente se mencionó, el motor no mantiene la velocidad de giro solicitada durante varios minutos al inicio de su funcionamiento.

El sensor de velocidad no fue el óptimo. La medición está limitada por las divisiones que el disco encóder posee, teniéndose una precisión disminuida. El sensor mide la velocidad en múltiplos de 7.5 rpm lo cual es un problema al momento de variar la velocidad en múltiplos comúnmente usados. Por otro lado, este medidor tiene un rezago aproximado de un segundo en la lectura de la velocidad al depender del número de interrupciones del láser por parte del disco, provocando que un fallo en el establecimiento de la velocidad represente varias lecturas fuera del valor deseado debido a que el ajuste debía ser hecho manualmente.

Las mediciones del sensor de torque durante el ensayo fueron enturbiadas por la percepción de otras señales, como ruido, señales electromagnéticas de los equipos y las vibraciones del sistema. La amplitud de la suma de esas señales aleatorias era muchas veces superior, al efecto en el sensor producido por la aplicación de la carga.

Se identificó durante los ensayos que al encender el motor el sensor de torque mandaba una medida distinta de cero, un efecto más acentuado cuando ambos rodamientos formaban parte del sistema que cuando solo estaba en funcionamiento el rodamiento original del tribómetro. Además se observó que los rodamientos producían una mayor oposición al torque que la producida por la aplicación de la carga sobre la muestra.

6.1.3. Observaciones sobre el funcionamiento del mecanismo.

El mecanismo no fue elaborado con las características originalmente planeadas. El mecanismo es ligero y las piezas no fueron manufacturadas con las tolerancias establecidas, lo que lo vuelve vulnerable a las vibraciones resultantes de la desalineación del tribómetro. Adicionalmente, la desalineación del eje y el giro del motor provocan que se revierta el efecto de las palancas del mecanismo impulsando el portapesas y las pesas colocadas sobre éste hacia arriba lo que provoca que la carga aplicada no sea constante.

El mecanismo no era efectivo al aplicar la carga. El portapesas ocasionalmente no descendía completamente, lo cual puede atribuirse a la fricción entre elementos del mecanismo.

6.2. Recomendaciones para obtener curvas de Stribeck mediante un tribómetro perno sobre bloque.

Previamente se mencionó que uno de los objetivos era la creación de ese procedimiento para el equipo desarrollado en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Se determinó que la presente configuración no permite alcanzar esta meta, por lo que es necesario obtener un equipo que cumpla con las características adecuadas. Se recomienda que ese equipo se obtenga a partir de dos opciones: adquisición de un equipo comercial que cumpla con normas aprobadas para ensayos de desgaste o la elaboración de un equipo bajo las recomendaciones de dichas normas para la configuración cilindro sobre bloque.

6.2.1. Normas relacionadas con un tribómetro perno sobre bloque.

Para el establecimiento de estándares en procedimientos, como los ensayos tribológicos, existen normas internacionales emitidas, por ejemplo, por la American Society for Testing Materials (ASTM), International Society for Standardization (ISO) y *Deutsches Institut für Normung (DIN)*.

Tabla 6.1 Ensayos con certificación ASTM para la configuración cilindro sobre bloque que del tribómetro.⁴⁵

Norma.	Título original.
ASTM G77-98	Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear In Block-on-Ring Wear Test.
ASTM G137-97	Standard Test Method for Ranking Resistance of Plastic Materials to Sliding Wear in a Block-on-Ring Configuration.
ASTM G176-03	Standard Test Method for Ranking Resistance of Plastics to Sliding Wear in Block-on-Ring Wear Test (Cumulative Wear Method).
ASTM D2981-94	Block-on-Oscillating-Ring Test.
ASTM D3704-96	Standard Test Method for Wear Properties of Solid Lubricants and Greases in Oscillating Motion.

Tan solo en la base de datos de la ASTM se encuentran varias normas al respecto algunas están enfocadas a la calibración y la operación de los instrumentos, otras enfocadas a la evaluación del lubricante y otras para la evaluación del desgaste en muestras de diversos materiales. Se encontraron 5 normas diferentes relacionadas con la configuración cilindro sobre bloque, (Tabla 5.1) en las que se expresan características para los ensayos como:

1. Descripción general del ensayo: tipo de movimiento, materiales que cubre la norma.
2. Información explícita o recomendaciones acerca de los parámetros del ensayo (carga normal, velocidad, tamaño de la muestra, entre otros datos)
3. Un esquema de la herramienta para el experimento.

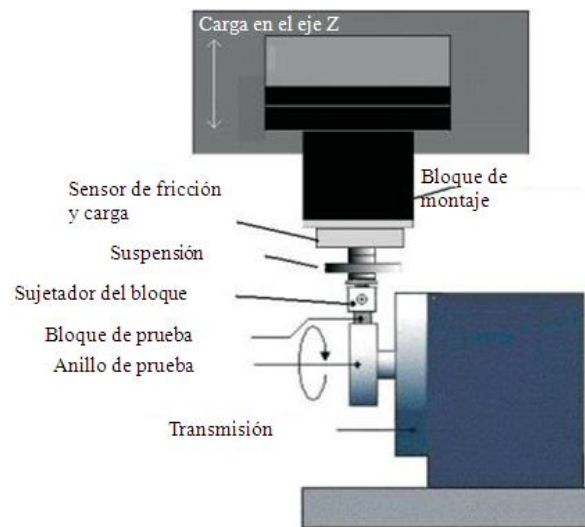


Figura 6.1 Esquema de tribómetro cilindro sobre bloque.⁴⁵

6.2. Diseño conceptual de un tribómetro perno sobre bloque.

El diseño de productos o, incluso, servicios es un proceso extenso por la búsqueda de encontrar los métodos que logren que las necesidades sean satisfechas, métodos que difícilmente resultan efectivos en su primera implementación, resultando en una estrategia iterativa para la solución del problema. Incluso una vez cumplidos los requerimientos básicos, puede presentarse el deseo de mejorar el funcionamiento o que ahora se cumpla otra característica previamente no contemplada, obligando una mayor extensión de tiempo y de recursos para la construcción del producto o servicio. Por lo tanto, en base a los inconvenientes y necesidades detectadas, se presenta aquí una propuesta resumida para la siguiente iteración en el proceso de diseño.

- a) Sistema motriz: El motor elegido debe ser determinado a partir de la potencia máxima y la velocidad máxima de giro que se pretenda aplicar. La norma ASTM G77-98 utiliza mayores de velocidad de giro (180 rpm) y de carga normal (134 N) mientras que la norma ASTM G137-97 considera el mayor diámetro de anillo (100 mm).

La potencia, por estar función del torque, tiene una dependencia con la fuerza tangencial por lo que es necesario establecer expectativas de las magnitudes que ésta pueda alcanzar.

Sabiendo que el coeficiente de fricción estático tiene un mayor valor que el dinámico y suponiendo que la fuerza normal máxima N_{max} aplicada corresponde a la de norma ASTM G77-98 estimaremos la fuerza tangencial máxima F_{max} al multiplicar la fuerza normal máxima por el máximo coeficiente de fricción estático, correspondiente al contacto indio-magnesio ($\mu=1.52$), entre los valores reportados por Ravinowicz.³⁹

$$F_{max} = 134 N \cdot 1.52 = 203.68 N$$

multiplicando por el diámetro del anillo en la norma ASTM G137-97´

$$T_{max} = 203.68 N \cdot 0.1 m = 20.368 Nm$$

y multiplicando por la velocidad de giro en la norma ASTM G77-98

$$P_{max} = 20.368 Nm \cdot \frac{180 rpm}{60 s} = 61.104 W$$

encontramos la potencia máxima requerida para la realización de ensayos sin lubricante.

Un motor similar al usado en el diseño del tribómetro coaxial⁵ cumple los requerimientos permitiendo un factor de seguridad superior a 6 respecto a la potencia y la velocidad angular es casi 10 veces mayor a la requerida. Por lo anterior, para mejorar el control del sistema, hay que considerar un motor mucho más ligero y un reductor de velocidad.

- b) Sistema de aplicación de carga radial: Es necesario implementar un sistema con retroalimentación para mantener la carga constante como lo recomiendan Lara⁵ y Ortega.⁴⁶ Es necesario conseguir un actuador que trabaje en un rango de carga de 0 a 0.5 kN
- c) Sensor de torque: Se observó que la señal de torque era afectada por factores externos. La amplitud de la señal se mostró mayor que los cambios por efecto de la disminución de la velocidad. Se recomienda la adquisición de un instrumento protegido contra influencias electromagnéticas pero con una mayor sensibilidad ante interacciones mecánicas. Es necesario considerar generar un sistema que genere un aislamiento electromagnético efectivo de soporte para el sensor.
- d) Transmisión de potencia: En la conexión del motor con el eje puede ser necesario un variador de velocidad. A bajas velocidades se encontró que el coeficiente de fricción aumentaba e incluso en una muestra se observó un comportamiento stick-slip. Según la comparación realizada, a tan bajas velocidades se debió observar un elevado coeficiente de fricción pero solo se observó el cambio de la pendiente del coeficiente de fricción. Se plantea que la instalación de un reductor de velocidad podría señalar si el coeficiente de fricción continuará aumentando, lo que mostraría que se alcanzó la región de lubricación de frontera.
- e) Sensor de velocidad: Debe tener la sensibilidad para medir fracciones de revoluciones por minuto. Esto permitirá medir a velocidades próximas a cero y tener una mayor fiabilidad de las mediciones. Además, debe ser compatible con un sistema de adquisición de datos con capacidad de registro en la milésima de segundo.
- f) Alineación del eje: Es muy importante mantener todos los elementos en conexión con el eje del motor completamente alineados en su eje de centros. La desalineación entre elementos acentúa el efecto de desgaste y puede inducir fracturas por fatiga en los acoplamientos o en los elementos más sensibles, como el sensor de torque. Además de las vibraciones por ajustes incorrectos, la desalineación del eje en la zona del trabajo fomenta la reducción de la vida útil de la celda de carga por su participación en un sistema oscilatorio.

Para garantizar la protección de los sensores se propone auxiliarse de un alineador de ejes. La adquisición de este equipo es necesaria para el mantenimiento del tribómetro coaxial y, si la fabricación se presenta, el tribómetro perno sobre bloque.

Debido a que el perno deberá ser continuamente limpiado o reemplazado para pruebas con diferentes materiales se debe poder centrar cada perno correctamente. Por ello se propone utilizar un broquero o un sistema de mordazas para auxiliar el proceso de centrado, aunque la mejor opción sería un sistema de mordazas independiente.

- g) Sistema de lubricación: Se recomienda una cámara desmontable que cubra la zona de trabajo del perno y a la muestra para que no exista ausencia de lubricante, habilitando pruebas por inmersión y pruebas de suministro regulado. Un sistema de drenaje auxiliaría en la limpieza de la cámara y el lubricante. Además la cámara permitiría la realización de ensayos con partículas abrasivas. Para suministrar por periodos extensos de tiempo el lubricante en intervalos cortos se recomienda la implementación de buretas digitales.



Figura 7.2 Contacto anillo sobre bloque lubricado en MFT.⁴⁷

- h) Sistema de sujeción de muestras: Se recomienda una prensa similar a la utilizada en el presente trabajo diseñada de acuerdo a las dimensiones de las muestras propuestas por las normas de interés, dado que la prensa actual fue muy efectiva en su función.
- i) Sistemas de control: Se ha mencionado que es necesaria la implementación de un sistema de retroalimentación al sistema de carga y al motor para poder mantener la velocidad y carga constante durante las etapas del ensayo que requieran estabilidad en dichas variables. Al implementarse dichos sistemas podrán realizarse pruebas automatizadas que incluyan cambios en la carga o la velocidad con la precisión necesaria para la obtención de curvas de Stribeck. Es deseable el desarrollo de una interfaz amigable o simple que permita controlar las operaciones y la adquisición de datos conforme a las necesidades del usuario. La implementación de un filtrado digital de la señal recibida in situ permitirá apreciar en tiempo real únicamente los efectos del contacto entre el bloque y el perno.
- j) Marco estructural: Lara⁵ mostró que sujetar el conjunto de elementos que conforman el tribómetro con un marco rígido y ligero reduce las vibraciones y permite la portabilidad del conjunto. Por medio de simulaciones de elemento finito da conocer el comportamiento aproximado que tendrá la estructura con la finalidad de diseñar con mayor facilidad y evitar costos de manufactura.

Debe recordarse que estos elementos se presentan como una sugerencia para la elaboración de un nuevo tribómetro y que el diseñador decidirá entre incluir o no todas las ideas presentadas u otras no consideradas, como un sensor de temperatura o una cámara de alta presión, entre otros.

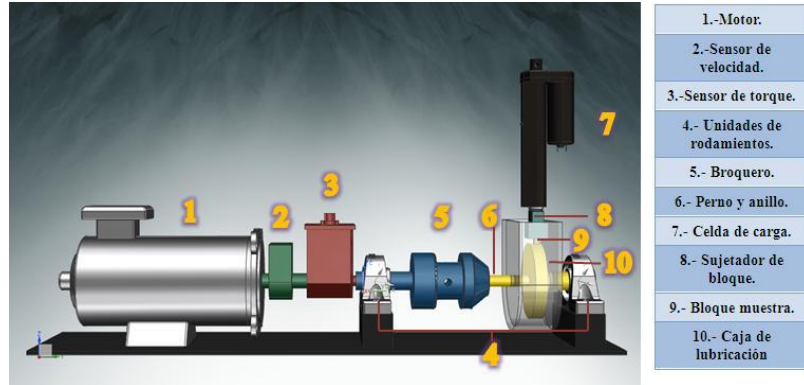


Figura 6.3 Bosquejo simplificado de elementos del nuevo tribómetro.

6.3. Herramientas de cálculo propuestas para la determinación de la presión de contacto.

Rapoport et. al.²⁵⁻²⁸ utilizaron para sus cálculos el valor de la presión nominal de contacto, esto es la fuerza normal aplicada sobre el área nominal de contacto o área aparente de contacto:

$$W_n = \frac{N}{A_n}$$

valor que es menor a una versión simplificada de la presión real de contacto W_r que considera como área solamente las zonas de las asperezas sobre las que descansa la carga y puede obtenerse como:

$$W_r = \frac{N}{\pi r_a^2 \alpha A_n}$$

Donde r_a es el radio de la aspereza y α el número de asperezas por unidad de área, después de considerar que existe una distribución uniforme de asperezas en la superficie de la muestra y que todas las asperezas deformadas por la otra superficie, tienen un área de contacto circular del mismo valor.

Para el cálculo de los esfuerzos de contacto donde una de las superficies es curva o las superficies no son conformes son necesarias las ecuaciones de Hertz desarrolladas en 1881.² Debido a que existen múltiples contactos no conformes, como esfera-esfera y cilindro-cilindro, se han explorado las ecuaciones de Hertz para encontrar dichos esfuerzos de contacto en diversas aplicaciones, como lo presenta Herák et. al.⁴⁸ en una de sus publicaciones, en las que el contacto cilindro-cilindro está incluido. El desarrollo y ecuaciones del contacto cilindro-cilindro permiten obtener una respuesta de los esfuerzos presentes en el contacto cilindro-plano al realizar la consideración de que el radio de uno de los cilindros tiende al infinito, de esta forma la suma de los radios de curvatura ρ_H queda en función únicamente del radio del cilindro o perno, simplificando una de la ecuaciones de la teoría de la elasticidad necesarias para el cálculo de la presión media superficial en el contacto.

Por otro lado, Gelinck^{32, 32} en sus modelos matemáticos comienza postulando que la carga es soportada tanto por las asperezas como por la capacidad de carga del lubricante y que la fuerza de fricción es la suma del esfuerzo cortante en la punta de la aspereza y la fuerza de fricción hidrodinámica en la superficie, esto mediante la participación de los coeficientes de Johnson. Adicionalmente usó el modelo de Greenwood-Williamson para determinar la carga soportada por las asperezas mientras que para la componente hidrodinámica usó el llamado “Diagrama de Moes”.

7. CONCLUSIONES.

El tribómetro coaxial requiere una retroalimentación al sistema de potencia del motor para tener un mejor control del equipo.

Se logró disminuir la deflexión del eje sin realizar modificaciones permanentes al tribómetro coaxial con la implementación de los elementos diseñados.

Es factible obtener un área nominal constante de desgaste en las muestras mediante el sistema de sujeción de muestras diseñado.

Se mostró que el mecanismo de aplicación de carga es irregular en el desarrollo de su función.

Dadas las condiciones actuales del tribómetro coaxial se considera que adaptarlo para habilitar el contacto cilindro sobre bloque es una decisión errada por las complicaciones observadas en el desarrollo de tribómetros.

Las recomendaciones presentadas indican el camino para el desarrollo de un tribómetro orientado al contacto cilindro sobre bloque enfocado a cumplir con normas ASTM.

No se obtienen curvas de Stribeck válidas por la ausencia de similitud geométrica y en magnitud al proyecto utilizado como referencia²⁵⁻²⁸.

Dado que las curvas de Stribeck obtenidas no son satisfactorias, el procedimiento realizado solo sirve actualmente como una guía sin comprobación.

Los ensayos tribológicos lograron generar favorablemente zonas de mezcla mecánica en las muestras de acero y aluminio.

La caracterización metalográfica en el acero demostró la diferencia de espesor de la tribocapa entre las muestras sin lubricación y las muestras lubricadas.

Se identificó que las muestras desgastadas sin lubricante sufrieron una deformación superficial y subsuperficial mucho mayor que aquellas donde se aplicó lubricante.

Se mostró que la tribocapa incluye en su proceso de formación la remoción y reincorporación de fragmentos de uno o ambos elementos sólidos del sistema tribológico.

El diseño y la manufactura de tribómetros requiere de herramientas, procesos y procedimientos más eficaces que los hasta ahora utilizados para alcanzar la precisión y repetibilidad necesaria en ensayos tribológicos.

Las pruebas realizadas hasta este momento tanto con el tribómetro coaxial⁴² como con el mecanismo propuesto y con las adaptaciones para cilindro sobre bloque muestran que es necesario ya sea la adquisición de un equipo adecuado para investigaciones futuras o una reconstrucción completa del tribómetro fortalecerá la validez científica del conocimiento generado.

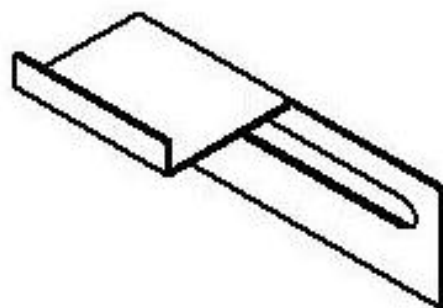
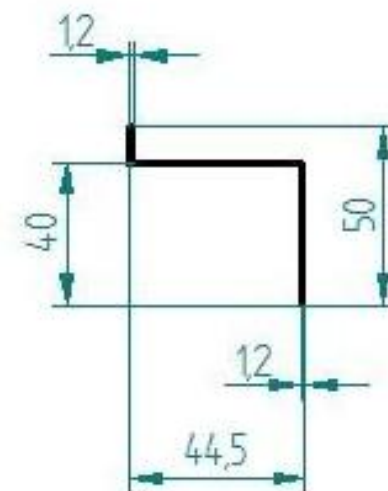
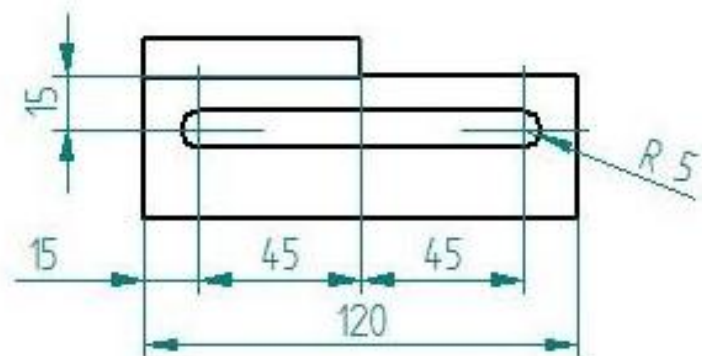
REFERENCIAS.

1. Bedolla H. J. et. Al. Estimación de factores de intensidad de esfuerzos en sistemas mecánicos con fricción. Ed. Palibrio. E. U. A., Indiana. 2013.
2. Stachowiak G. & Batchelor A. Engineering Tribology, 3rd ed. Sydney: Elsevier Butterworth Heinemann. 2005.
3. Mitchell L. The Fiction of Nonfriction. Popular Science. 2012.
4. Blau, P. J. ASTM Metals Handbook Volume 18: Glossary of Terms. 2004.
5. Lara P. J. G. Rediseño de un tribómetro coaxial. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F. 2013
6. Hutton, C. A Mathematical and Philosophical Dictionary. United Kingdom 1795.
7. [Http://www.wazau.com/en/products/materialtesting/tribology/tribometer/](http://www.wazau.com/en/products/materialtesting/tribology/tribometer/) (Consulta: 20/01/2014).
8. [Http://www.bruker.com/products/surface-analysis/tribology-and-mechanical-testing.html](http://www.bruker.com/products/surface-analysis/tribology-and-mechanical-testing.html) (Consulta: 21/01/2014).
9. [Http://www.rtec-instruments.com/tribometers.htm](http://www.rtec-instruments.com/tribometers.htm) (Consulta: 21/01/2014).
10. Elox M. V. M. et Al. Diseño y construcción de un tribómetro de cilindros cruzados para la evaluación del desgaste adhesivo. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, UV. México, Veracruz. 2012.
11. Figueroa G. M. A. Diseño mecánico integral y manufactura de los componentes mecánicos de máquina tribológica de cuatro bolas para ensayos lubricados. Tesis de Maestría, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Eléctrica, IPN. México, D.F. 2009.
12. Iniesta G. O. E. & Márquez S. R. Diseño y construcción de un tribómetro coaxial. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D. F. 2007.
13. Barral B. R. S. & Cruz L. P. Prototipo de tribómetro anillo sobre bloque para obtener curvas de fricción. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F. 2014.
14. Gallardo H. E. A. Desarrollo de un prototipo tribológico funcional de configuración esfera sobre disco para medir el desgaste por deslizamiento en condiciones secas y lubricadas. Tesis de Maestría, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Eléctrica, IPN. México, D. F. 2002.
15. Bautista S. M. Diseño de una máquina tribológica de configuración geométrica de cilindros cruzados para análisis de desgaste por deslizamiento. Tesis de Maestría, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Eléctrica, IPN. México, D. F. 2005.
16. Rivera P. A. A. Diseño y construcción de un tribómetro rotatorio. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, UV. México, Veracruz. 2007.
17. López B. E. Calibración y puesta a punto del tribómetro pin disco. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, UV. México, Veracruz. 2011.
18. Venustiano O. V. Diseño, construcción y operación de un tribómetro multiespécimen. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, UV. México, Veracruz. 2011.
19. Figueroa A. C. G. Caracterización de la compatibilidad tribológica en aleaciones dúctiles mediante ensayo de tribometría coaxial. Tesis de Maestría, Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM. México. 2011.
20. Bhushan, B. Modern Tribology Handbook. Volume 1 CRC Press. 2001.
21. Stachowiak, G. Wear-Materials, Mechanisms and Practice. England. 1st ed. John Wiley & Sons, Ltd. 2005.
22. Larsen, J. ASM Handbook Volume 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology. 2004.
23. Ludema, K. C. Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology. Florida: CRC Press LLC. 1996.
24. Cheng, H. S. ASTM metals handbook. Volume 18: Introduction to lubrication. 2004.
25. Hersey, M.D. Theory and Research in Lubrication. Wiley, New York. 1966.

26. Moshkovich A, Rapoport L. et. al. Stribeck curve under friction of copper samples in steady friction state. *Tribology Letters*, pages 645-653. 2009.
27. Moshkovich A, Rapoport L. et. al. Structural evolution in copper layers during sliding under different lubricant conditions. *Acta Materialia*, pages 4685-4692. 2010.
28. Perfiliev V, Rapoport L. et. al. Friction and wear of copper samples in the steady friction state. *Tribology International* (43) pages 1449-1456. 2010.
29. Perfiliev V, Rapoport L. et. al. Friction, wear and structure of Cu samples in the lubricated steady friction state. *Tribology International* (46) pages 154-160. 2011.
30. Maru M. M. & Tanaka D. K. Consideration of Stribeck Diagram Parameters in the Investigation on Wear and Friction Behavior in Lubricated Sliding. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng*, pages 55-62. 2007.
31. Maru M. M. & Tanaka D. K. Influence of Loading, Contamination and Additive on the Wear of a Metallic Pair under Rotating and Reciprocating Lubricated Sliding. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng*, pages 278-285. 2006.
32. Gelinck E. R. M, Schipper D. J. Calculation of Stribeck curves for line contacts. *Tribology International*, pages 175-181. 2000.
33. Lu X, Khonsari M. M, Gelinck E. R. M. The Stribeck Curve: Experimental Results and Theoretical Prediction. *ASME, Journal of Tribology* (128), pages 789-794. 2006.
34. Cheng H. S. *ASTM Metals Handbook, Volume 18: Lubrication Regimes*. 2004.
35. Laemle J. T. *ASTM Metals Handbook, Volume 18: Metalworking Lubricants*. 2004.
36. Bharat Bushan. *Nanotribology and Nanomechanics: an Introduction*. Springer. 2006.
37. Linares O. O. *Generalidades de la Tribología: fundamentos de la lubricación, fricción y el desgaste*. Widman International S.R.L. Santa Cruz, Bolivia. 2005.
38. Khonsari M. M. & Booser E. R. *Applied Tribology: Bearing Design and Lubrication*. John Wiley & Sons, Inc. USA. 2001.
39. [Http://www.skf.com/mx/products/bearings-units-housings/bearing-units/ball-bearing-units/y-bearing-plummer-block-units/cast-housing-grub-screw-locking/index.html?prodid=211101025&imperial=false](http://www.skf.com/mx/products/bearings-units-housings/bearing-units/ball-bearing-units/y-bearing-plummer-block-units/cast-housing-grub-screw-locking/index.html?prodid=211101025&imperial=false). (Consulta: 03/07/2014)
40. Rabinowicz, E. The Determination of the Compatibility of Metals through Static Friction Tests, *ASLE Transactions*, pages 198-205. 1971.
41. Forounzamehr N, Nili-ahmadabadi N. On the atomic force microscopy characterization of void evolution in severely plastic deformed pure iron. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 63. 2014.
42. Mirsepasi A, et. al. Microstructure and mechanical behavior of martensitic steel severely deformed by the novel technique of repetitive corrugation and straightening by rolling. *Materials Science and Engineering A* 551. 2012.
43. Beigelzeimer Y. Grain refinement versus voids accumulation during severe plastic deformations of polycrystals: mathematical simulation. *Mechanics of Materials* 37 2005.
44. Indeitsev D. A., et. al. Nucleation of nanoscale voids at disclination quadrupoles in deformed nanocrystalline materials. *Adv. Mater. Sci.* 26. 2010.
45. [Http://www.cetr.com/eng/services/astm-tests.html](http://www.cetr.com/eng/services/astm-tests.html) (Consulta: 03/07/2014).
46. Ortega P. I. *Caracterización tribológica de fundiciones CuMgSn mediante tribometría coaxial*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D. F. 2014.
47. [Http://ww.schaefer-tec.com/fileadmin/user_upload/sortiment/tribologie-nanoindentation/Rtec/Rtec_Multifunctional_Tribometer_1302.pdf](http://ww.schaefer-tec.com/fileadmin/user_upload/sortiment/tribologie-nanoindentation/Rtec/Rtec_Multifunctional_Tribometer_1302.pdf) (Consulta 29/07/2014).
48. Herák D, Chotěborský R, et. al. Exploitation of Hertz's contact pressure in friction drives. *Journal of Agricultural Engineering Research* (52), pages 107-114. 2006.

ANEXO 1:

PLANOS DE DISEÑO.



UNAM Facultad de Ingeniería.

Tesis: Determinación del protocolo para la obtención de curvas Stribeck en tribómetro cilindro sobre bloque.
Sergio Eduardo Luna Galaviz.

Size A4 | Pieza: Conector Derecho

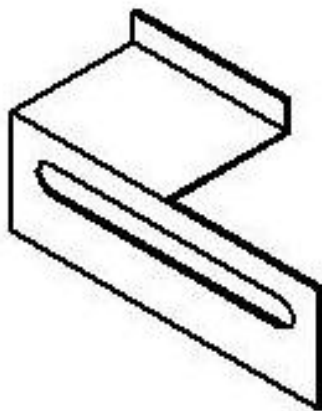
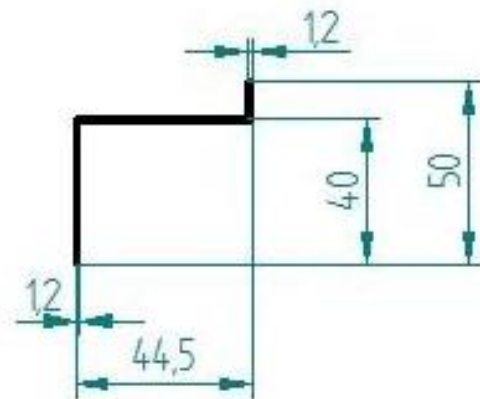
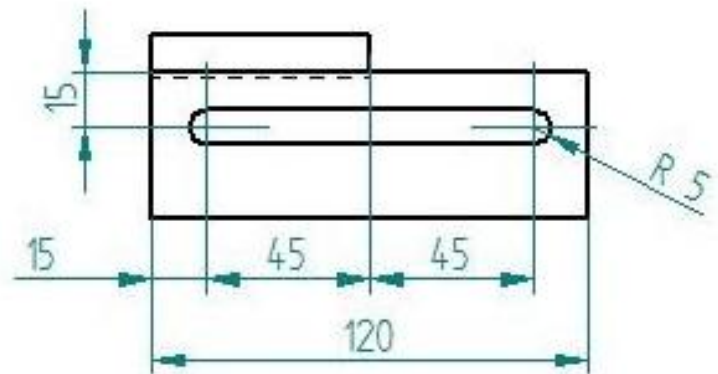
Material: Acero 1018

Unidades: mm

Escala: 1:2

Índice de calidad: IT-10

Plano: 1/7



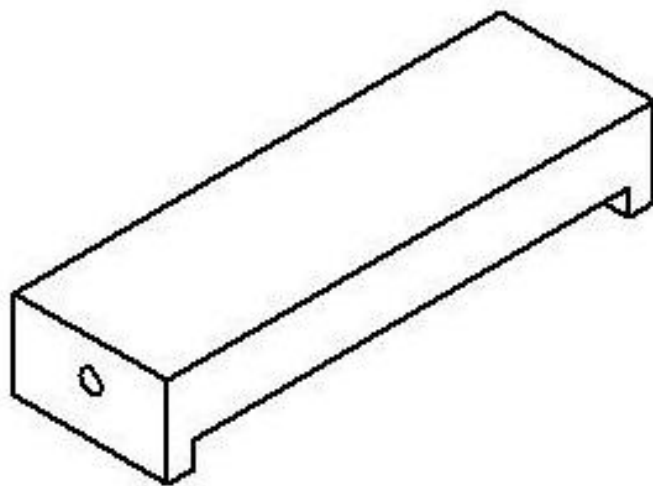
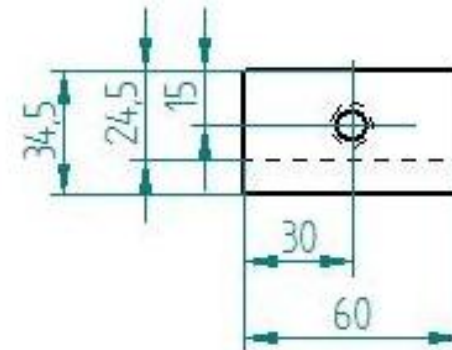
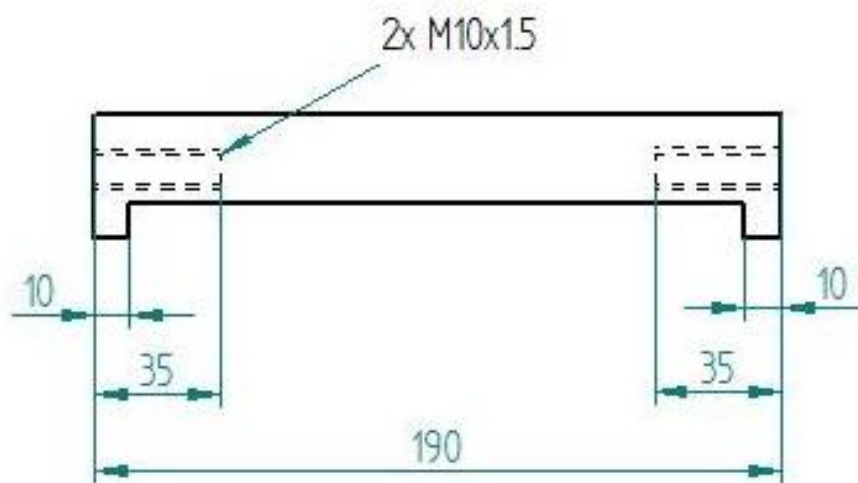
UNAM Facultad de Ingeniería.

Tesis: Determinación del protocolo para la obtención de curvas Stribeck en tribómetro cilindro sobre bloque.
Sergio Eduardo Luna Galaviz.

Size A4 | Pieza: Conector izquierdo

Material: Acero 1018 | Unidades: mm | Escala: 1:2

Índice de calidad: IT-10 | Plano: 2/7



UNAM Facultad de Ingeniería.

Tesis: Determinación del protocolo para la obtención de curvas Stribeck en tribómetro cilindro sobre bloque.
Sergio Eduardo Luna Galaviz.

Size A4 | Pieza: Peldaño

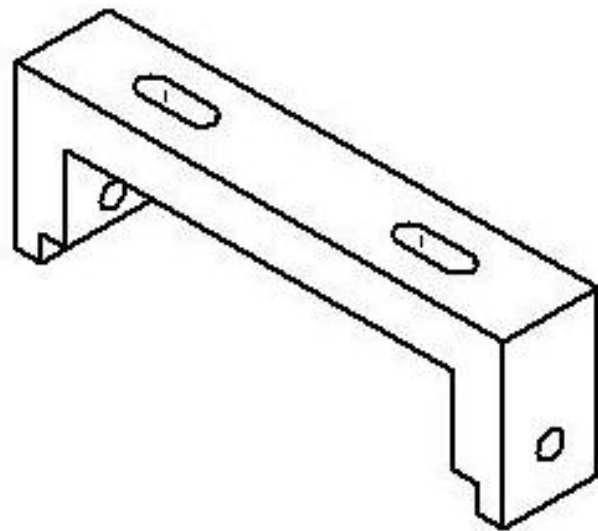
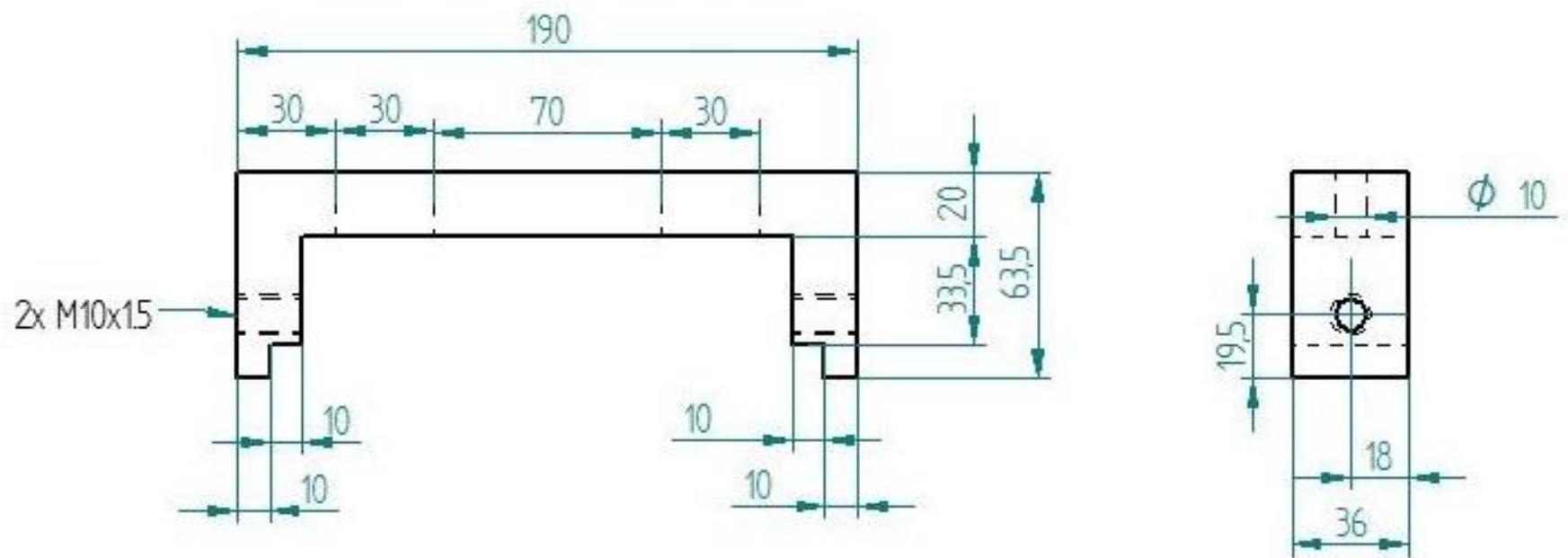
Material: Acero 1018

Undidades: mm

Escala 1:2

Índice de calidad: IT-10

Plano: 3/7



UNAM Facultad de Ingeniería.

Tesis: Determinación del protocolo para la obtención de curvas Stribeck en tribómetro cilindro sobre bloque.
Sergio Eduardo Luna Galaviz.

Size A4 | Pieza: Soporte

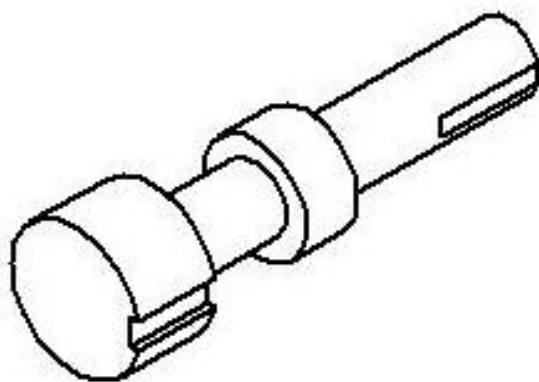
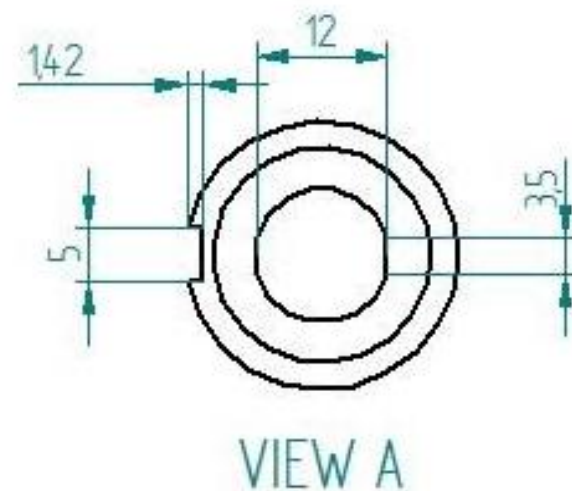
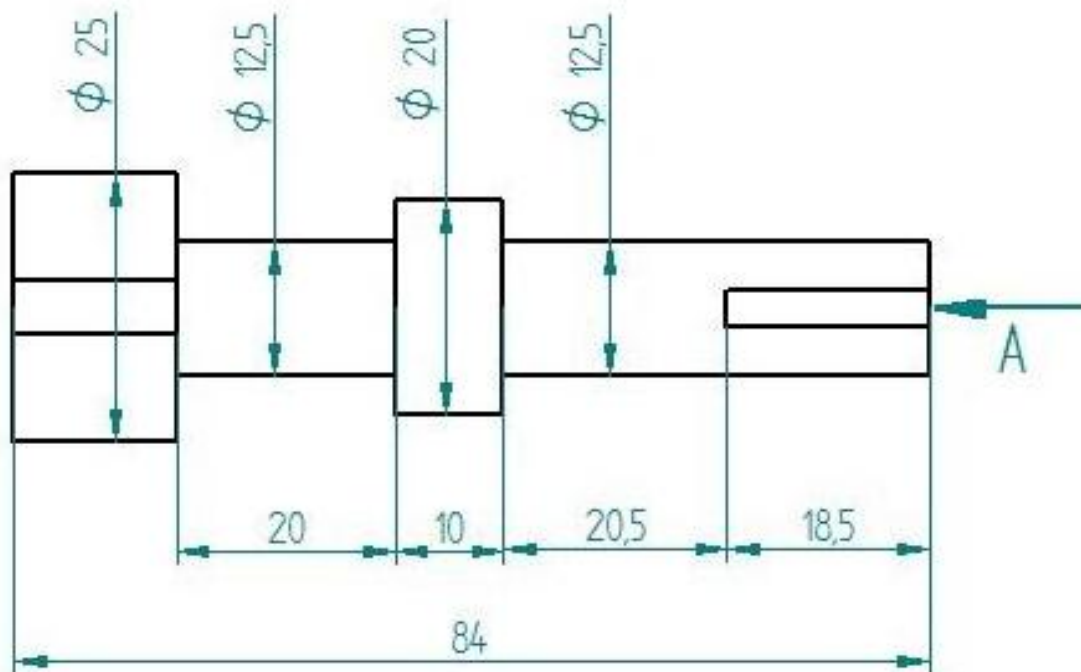
Material: AISI 1018

Undidades: mm

Escala: 1:2

Índice de calidad: IT-10

Plano: 4/7



UNAM Facultad de Ingeniería.

Tesis: Determinación del protocolo para la obtención de curvas Stribeck en tribómetro cilindro sobre bloque.
Sergio Eduardo Luna Galaviz.

Size A4 | Pieza: Perno

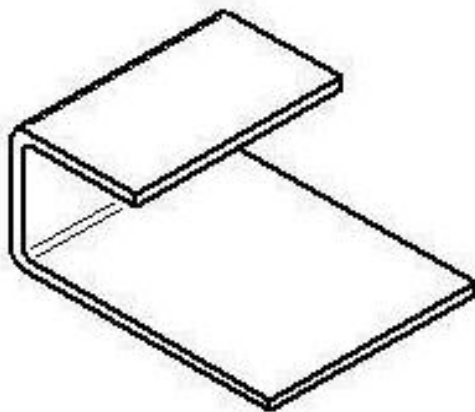
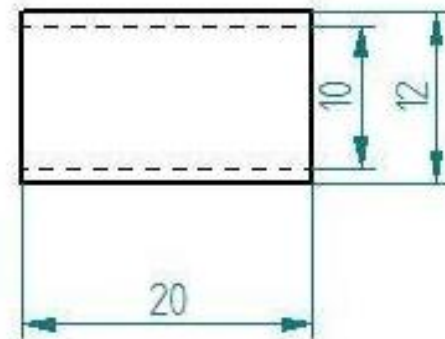
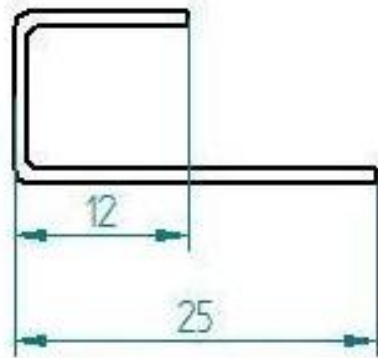
Material: AISI 9840

Unidades: mm

Escala 15:1

Índice de calidad: IT-10

Plano: 5/7



UNAM Facultad de Ingeniería.

Tesis: Determinación del protocolo para la obtención de curvas Stribeck en tribómetro cilindro sobre bloque.
Sergio Eduardo Luna Galaviz.

Size A4 | Pieza: Clip

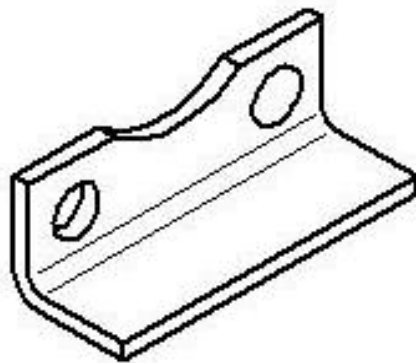
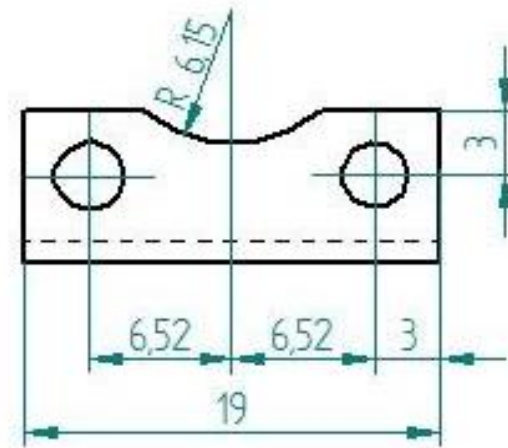
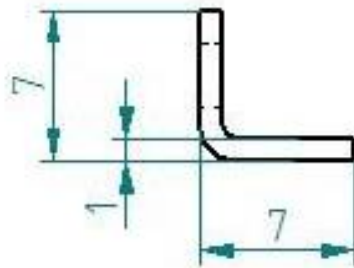
Material: AISI1018

Unidades: mm

Escala: 2:1

Índice de calidad: IT-10

Plano: 6/7



UNAM Facultad de Ingeniería.

Tesis: Determinación del protocolo para la obtención de curvas Stribeck en tribómetro cilindro sobre bloque.
Sergio Eduardo Luna Galaviz.

Size A4 | Pieza: Prensa

Material: AISI1018

Unidades: mm

Escala: 3:1

Índice de calidad: IT-10

Plano: 7/7

ANEXO 2:

CÓDIGO DESARROLLADO.

SOFTWARE DE PROCESAMIENTO DE
DATOS PARA OBTENCIÓN DE CURVAS
DE STRIBECK.

EVALUACIÓN CONSIDERANDO VELOCIDAD VARIABLE.

Software de Procesamiento de Datos para Obtención de Curvas de Stribeck.

Evaluación considerando velocidad variable.

Suministro de datos del ensayo

```
preg = ToString["NO"];

v = Input["Indique la viscosidad del lubricante en Pa*s"]; (*1Pa*s=1000 cP*)
masa = Input["Indique la masa colocada sobre el portapesas en kg."];
radioPerno = Input["Indique el radio del perno usado en m."];
(*Distancia del punto de la aplicación de la fuerza
 tangencial por el perno al eje carga el torque suministrado*)
areaProyectada = Input["Indique el área inicial"]; (*m^2*)
(*Dimensiones del área de la muestra*)
factorVoltaje = 1000; (*N m/V*) (*Relación de la medición
 del sensor en voltaje para el par obtenido en el perno*)
vacio = Input["Indique la duración de funcionamiento del motor sin carga en s"];
rodaje = Input["Indique la duración del tiempo de rodaje en s"];
periodo = Input["Indique la duración del periodo en s"];
(*Duración del periodo en segundos*)
medS = Input["Indique cuántas mediciones por segundo estableció en Labview"];
ra = Input["Indique la rugosidad media cuadrática de la muestra"];

Print["¿Esta información es correcta?"];
grid2 = Grid[{{"Viscosidad", v, "Pa s"},
  {"Masa sobre el portapesas", masa, "kg"}, {"Radio del Perno", radioPerno, "m"},
  {"Área", areaProyectada, "m^2"}, {"Tiempo en vacío", vacio, "s"},
  {"Tiempo de rodaje", rodaje, "s"}, {"Duración del periodo", periodo, "s"},
  {"Número de mediciones por segundo", medS, " mediciones"},
  {"Rugosidad media cuadrática", ra, "" }}, Frame -> All];
Print[grid2];
preg = ToString[
  Input["Escriba SI en caso de ser correcta, cualquier otro texto indicará
 que se requieren modificaciones"]];
Print["La información ", preg, " es correcta."];

While[
  preg != "SI",
  If[
    preg != "SI",
```

```

Print["¿Qué información desea modificar?"];
Print["
  1. Viscosidad.
  2. Masa sobre el portapesas.
  3. Radio del Perno.
  4. Área.
  5. Tiempo en vacío.
  6. Tiempo de rodaje.
  7. Duración del Intervalos.
  8. Número de mediciones por segundo.
9. Rugosidad media cuadrática
10. Nada.
  "];
modificar = ToString[Input["Elija una opción con un número del 1 al 9"]];
Print["Elegió modificar ", modificar];

While[
  modificar ≠ "1" && modificar ≠ "2" && modificar ≠ "3" &&
  modificar ≠ "4" && modificar ≠ "5" && modificar ≠ "6" && modificar ≠ "7" &&
  modificar ≠ "8" && modificar ≠ "9" && modificar ≠ "10",
  Print["Por favor elija adecuadamente."];
  modificar = ToString[Input["Elija una opción con un número del 1 al 10"]];
  Print[modificar];
];

Which[
  modificar === "1",
  v = Input["Indique la viscosidad del lubricante en Pa*s"]; ,
  modificar === "2",
  masa = Input["Indique la masa colocada sobre el portapesas en kg."]; ,
  modificar === "3",
  radioPerno = Input["Indique el radio del perno usado en m."]; ,
  modificar === "4",
  areaProyectada = Input["Indique el área inicial"]; ,
  modificar === "5",
  vacio =
  Input["Indique la duración de funcionamiento del motor sin carga en s"]; ,
  modificar === "6",
  rodaje = Input["Indique la duración del tiempo de rodaje en s"]; ,
  modificar === "7",
  periodo = Input["Indique la duración del periodo en s"]; ,
  modificar === "8",
  meds =
  Input["Indique cuántas mediciones por segundo estableció en Labview"]; ,
  modificar === "9", Print[
  "Indique la rugosidad media cuadrática de la muestra en m"]; ,
  modificar === "10",
  Print["Nada"];
];
Print["¿Esta información es correcta?"];
grid2 =
Grid[{{{"Viscosidad", v, "Pa s"}, {"Masa sobre el portapesas", masa, "kg"},
  {"Radio del Perno", radioPerno, "m"}, {"Área", areaProyectada, "m^2"},
  {"Tiempo en vacío", vacio, "s"}, {"Tiempo de rodaje", rodaje, "s"},
  {"Duración del periodo", periodo, "s"},

```

```

    {"Número de mediciones por segundo", medS, " mediciones"},
    {"Rugosidad media cuadrática", ra, ""}}, Frame → All];
Print[grid2];
preg =
  ToString[Input["Escriba SI en caso de ser correcta, cualquier otro texto
    indicará que se requieren modificaciones"]];
Print["La información ", preg, " es correcta."];
]
];(*Fin del While de datos*)

```

Selección de dirección y archivos necesarios.

```

preg = ToString["NO"];
nombreDirectorio =
  Input["Indique el directorio donde se encuentran los archivos de
    datos. Dicho directorio debe estar entrecomillado."];
directorio = SetDirectory[nombreDirectorio];
nombreTorque =
  Input["Indique el archivo lvm donde se encuentra el registro de datos
    de voltaje. El nombre del archivo debe estar entrecomillado."];
torque = Import[nombreTorque, "Table"];
torque = torque[[Table[i, {i, 23, Length[torque]}]]][[All, 2]];
torqueAuxOffset = Table[
  torque[[i]] - 0.9 * Mean[torque[[Round[0.95 * Length[torque]] ;; Length[torque] - 5]]] +
  i 0.0000286223, {i, Length[torque]}];
nombreVelocidades = Input[
  "Indique el archivo xls donde se encuentra el registro de datos de
    velocidad. El nombre del archivo debe estar entrecomillado."];
velocidades = Flatten[Import[nombreVelocidades]];
velocidades = Table[ToExpression[velocidades[[i]], {i, Length[velocidades]}];
Print["¿Esta información es correcta?"];
grid =
  Grid[{{"Directorio", nombreDirectorio}, {"Archivo de voltaje", nombreTorque},
    {"Archivo de velocidad", nombreVelocidades}}, Frame → All];
Print[grid];
preg = ToString[
  Input["Escriba SI en caso de ser correcta, cualquier otro texto indicará
    que se requieren modificaciones"]];
Print["La información ", preg, " es correcta."];
While[preg ≠ "SI", If[preg ≠ "SI",
  Print["¿Qué información desea modificar"]; Print["\n1. Directorio.\n2.
    Archivo de voltaje.\n3. Archivo de velocidad.\n4. Nada."];
  modificar = ToString[Input["Elija una opción con un número del 1 al 4"]];
  While[modificar ≠ "1" && modificar ≠ "2" && modificar ≠ "3" && modificar ≠ "4",
    Print["Por favor elija adecuadamente."];
    modificar = ToString[Input["Elija una opción con un número del 1 al 4"]];
    Print[modificar];]; Which[modificar === "1",
  Print["Se modificará la dirección donde se alojan los archivos"];
  nombreDirectorio = Input["Indique el directorio donde se encuentran los
    archivos de datos. Dicho directorio debe estar entrecomillado."];

```

```

directorio = SetDirectory[nombreDirectorio];, modificar === "2",
Print["Se modificará el archivo de voltaje"]; nombreTorque =
  Input["Indique el archivo lvm donde se encuentra el registro de datos de
    voltaje. El nombre del archivo debe estar entrecomillado."];
torque = Import[nombreTorque, "Table"]; torque = torque[[Table[i,
  {i, 23, Length[torque]}]][[All, 2]]; torqueAuxOffset = Table[torque[[i] +
  0.9 * Mean[torque[[Round[0.95 * Length[torque] ;; Length[torque] - 5]]] +
  i 0.0000286223
  Length[torque], {i, Length[torque]}];, modificar === "3",
Print["Se modificará el archivo de velocidad"]; nombreVelocidades =
  Input["Indique el archivo xls donde se encuentra el registro de datos de
    velocidad. El nombre del archivo debe estar entrecomillado."];
velocidades = Flatten[Import[nombreVelocidades]]; velocidades =
  Table[ToExpression[velocidades[[i]], {i, Length[velocidades]}];,
  modificar === "4", Print["No se harán cambios"];];
Print["¿Esta información es correcta?"];
Print[grid]; preg = ToString[
  Input["Escriba SI en caso de estar satisfecho con la información mostrada"]];
Print["La información ", preg, " es correcta."];];];

```

Calculo y graficación.

```

fn = (masa + 0.450) * 9.78 * 32; (*N*)
(*masa de la pesa más la masa del portapesas multiplicada por la gravedad
multiplicada por la constante del mecanismo determinada experimentalmente*)

Print["Gráfica de la velocidad del motor durante el ensayo"]
ListPlot[velocidades, Joined → True,
  AxesLabel → {"t[s]", "θ[rpm]"}, PlotRange → All]
Print["Gráfica del voltaje sensado por el
  torquímetro durante el ensayo después del offset"]
ListPlot[torqueAuxOffset, Joined → True, AxesLabel → {"mediciones", "V[V]"},
  PlotRange → All] (*Gráficas de las velocidades
registradas y del torque respectivamente*)

velTabProm = Table[{
  Mean[velocidades[[i ;; i + Round[0.9 * periodo]]]],
  {i, rodaje + Round[0.1 * periodo, 1],
  Round[(Length[torqueAuxOffset] / medS) - 2 * periodo, 1], periodo} // Flatten;
(*Tabla de promedio de velocidades por intervalo desde el ultimo intervalo
a la velocidad de rodaje hasta el intervalo anterior al fin del ensayo*)

torqueTabProm = Table[{
  Mean[torqueAuxOffset[[i ;; i + Round[0.9 * periodo * medS, 1]]]],
  {i, rodaje * medS + Round[0.1 * periodo, 1], Round[Length[torqueAuxOffset], 1] -
  2 * periodo * medS, periodo * medS} // Flatten;
(*Tabla de promedio de torque por intervalo desde el ultimo
intervalo a la velocidad de rodaje hasta
el intervalo anterior al fin del ensayo*)

num = Dimensions[torqueTabProm]; (*Dimensiones de ambas tablas*)

```

```

Print["Gráfica de la velocidad promedio para cada intervalo"]
ListPlot[velTabProm, AxesLabel → {"intervalo", "θ[rpm]"},
  Joined → True, AxesOrigin → {0, 0}]
(*Gráficas de las nuevas tablas de velocidad y torque*)
Print["Gráfica del voltaje promedio para cada intervalo"]
ListPlot[torqueTabProm, AxesLabel → {"intervalo", "V[V]"},
  Joined → True, AxesOrigin → {0, 0}]

fNormal = Table[{i, fn}, {i, num[[1]]}];
(*Creación de una tabla de la fuerza normal
  constante de longitud igual a las anteriores*)
Print["Gráfica de la fuerza normal aplicada por el mecanismo durante el ensayo"]
ListPlot[fNormal, Joined → True,
  AxesLabel → {"intervalo", "Fn[N]"}, AxesOrigin → {0, 0}]

Print["Gráfica de la fuerza tangencial
  aplicada por el perno sobre durante el ensayo"]
fTang = Table[{i, torqueTabProm[[i]] * factorVoltaje / radioPerno}, {i, num[[1]]}];
(*Cálculo de la fuerza tangencial
  ejercida por el perno en la sección de contacto*)
ListPlot[fTang, Joined → True, AxesLabel → {"intervalo", "Ft[N]"},
  AxesOrigin → {0, 0}]

friccion = Table[{i,  $\frac{-fTang[[i, 2]]}{fNormal[[i, 2]]}$ }, {i, num[[1]]}];
(*Cálculo del coeficiente de fricción*)
sommerfeld = Table[{i,  $\frac{v * velTabProm[[i]]}{\frac{fn*60}{areaProyectada}}$ }, {i, num[[1]]}];
(*Cálculo del número de Sommerfeld con conversión de Rev/min a rev/s*)
Print["Gráfica del coeficiente de fricción entre el perno y la muestra"]
ListPlot[friccion, Joined → True, AxesLabel → {"intervalo", "μ"}, AxesOrigin → {0, 0}]
(*Gráficas con ajuste de origen*)
Print["Gráfica del número de Sommerfeld para los intervalos considerados"]
ListPlot[sommerfeld, Joined → True,
  AxesLabel → {"intervalo", "S"}, AxesOrigin → {0, 0}]

curvaS = Table[{sommerfeld[[i, 2]], friccion[[i, 2]]}, {i, 1, num[[1]]}];
(*Elaboración de la tabla paramétrica S-f*)

Print["Curva de Stribeck con el número de Sommerfeld"];
ListPlot[curvaS, Joined → True, AxesLabel → {"S", "μ"}, AxesOrigin → {0, 0}]

schipper = Table[{i,  $\frac{v * velTabProm[[i]]}{\frac{fn*60}{areaProyectada * 2 * \pi * radioPerno} * ra}$ }, {i, num[[1]]}];
(*Cálculo del número de Schipper con conversión de Rev/min a rev/s*)
Print["Gráfica del número de Schipper para los intervalos considerados"]
ListPlot[schipper, Joined → True,
  AxesLabel → {"intervalo", "Z"}, AxesOrigin → {0, 0}]
curvaZ = Table[{schipper[[i, 2]], friccion[[i, 2]]}, {i, 1, num[[1]]}];
(*Elaboración de la tabla paramétrica Z-f*)
Print["Curva de Stribeck con el número de Schipper"];
ListPlot[curvaZ, Joined → True, AxesLabel → {"Z", "μ"}, AxesOrigin → {0, 0}]

```



```
curvaZInterpolada = Interpolation[Reverse[curvaZ]];
grid3 = Grid[{"Categoría", "Máximo", "Mínimo"},
  {"Velocidad angular [rpm]", Max[velTabProm], Min[velTabProm]},
  {"Número de Schipper", Max[curvaZ[[All, 1]]], Min[curvaZ[[All, 1]]]},
  {"Coeficiente de fricción", Max[curvaZ[[All, 2]]],
  Min[curvaZ[[All, 2]]]}, Frame → All];
Print["Cuadro resumen"]
Print[grid3];
Print[
  "Curva de Stribeck con el número de Schipper por función de interpolación"];
Plot[curvaZInterpolada[x], {x, 1.01 * curvaZ[[Length[curvaZ], 1]],
  0.99 * curvaZ[[1, 1]]}, AxesOrigin → {0, 0}, AxesLabel → {"Z", "μ"}]
```