

**DISEÑO, CONSTRUCCION Y PRUEBA DE MAQUINA PIN-ON-DISK PARA
ENSAYOS DE DESGASTE**

ANTONIO JOSE FORERO MARTINÉZ

NELSON FERNANDO ROJAS GONZÁLEZ



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2013

**DISEÑO, CONSTRUCCION Y PRUEBA DE MAQUINA PIN-ON-DISK
PARA ENSAYOS DE DESGASTE**

ANTONIO JOSE FORERO MARTINÉZ

NELSON FERNANDO ROJAS GONZÁLEZ

Trabajo de grado para optar por el título de

INGENIERO MECÁNICO

DIRECTOR

ALFONSO SANTOS JAIMES

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2013

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, Septiembre de 2013

DEDICATORIA

A Dios, A mi familia, A mi padre (Q.E.P.D) y a mi madre por ser la motivación de todo lo que he logrado hasta hoy y especialmente a mis abuelos por estar en cada paso de mi vida, Siendo siempre un apoyo incondicional en los momentos más difíciles.

Antonio José Forero Martínez

DEDICATORIA

En especial a Dios, a mis padres y a mi hermana que han sido una parte muy importante a lo largo de mi formación y han estado presentes en cada una de mis metas alcanzadas, sin ellos nada de esto sería posible

Nelson Fernando Rojas González

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer especialmente al Ingeniero Alfonso Santos Jaimes, por permitirnos trabajar en alianza para lograr grandes metas propuestas, de igual manera a todo el grupo de docentes quienes fueron parte esencial de nuestra formación académica. Así mismo a Tatiana Pacheco que fue un apoyo incondicional en la elaboración de este proyecto de grado, y a nuestros compañeros quienes fueron de gran apoyo para poder lograr lo que hasta hoy hemos podido obtener.

Antonio José Forero Martínez

Nelson Fernando Rojas González

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. OBJETIVOS.....	16
1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1 NORMA ASTM G99-05.....	17
2.2 NORMA ASTM E178-08	17
2.3 NORMA ASTM G40-12.....	18
2.4 NORMA G117-02.....	18
2.5 DESGASTE.....	19
2.6 TRIBÓMETRO	20
2.7 MÉTODO DE ENSAYO.....	21
3. METODOLOGÍA.....	23
3.1 REVISAR ASPECTOS GENERALES DE LA NORMA G99-05.....	23
3.2 REVISAR LAS NORMAS ANEXAS PARA LA PRESENTACIÓN DE RESULTADOS (ASTM E178-08, G40-12, G117-02).	24
3.3 REVISAR BIBLIOGRAFÍA REFERENTE A LOS MÉTODOS DE ENSAYO PARA CÁLCULO DE DESGASTE	24
3.4 IDENTIFICAR LOS PRINCIPALES PARÁMETROS DE DISEÑO SEGÚN LA NORMA	25
3.5 ESTABLECER CRITERIOS ADICIONALES PARA EL DISEÑO DEL EQUIPO SEGÚN CONOCIMIENTO ADQUIRIDO	30
3.6 EJECUTAR LA COMPRA DE MATERIALES REQUERIDOS.....	32
3.7 CONSTRUIR LA ESTRUCTURA DEL EQUIPO	34
3.8 ENSAMBLAR EL EQUIPO Y ACOPLAR LA PARTE MOTRIZ	35
3.9 REALIZAR LA PRUEBA SEGÚN LO ESTABLECE LA NORMA	35

3.10	OBTENER LA INFORMACIÓN REQUERIDA PARA EL ANÁLISIS DE DATOS.....	37
3.11	EVALUAR LA CORRELACIÓN DE LOS RESULTADOS DE CADA PRUEBA	38
3.12	PRESENTAR LOS RESULTADOS DEL CÁLCULO DE DESGASTE EN UN DOCUMENTO	38
4.	RESULTADOS	39
4.1	RESUMEN DE LA NORMA ASTM G99-05 Y TERMINOLOGÍA	39
4.2	TRIBÓMETRO PIN ON DISK PARA ENSAYOS DE DESGASTE	39
4.3	DOCUMENTO DE PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DEL ESTUDIO DE CÁLCULO DE DESGASTE.....	40
5.	CONCLUSIONES	48
6.	OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES	49
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	50
8.	ANEXOS.....	51

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Principales compones del tribómetro.....	26
Figura 2. Diseño inicial del sistema de sujeción.....	27
Figura 3. Diseño final del sistema de sujeción.....	28
Figura 4. Componentes del sistema de soporte estático.....	28
Figura 5. Especímenes.....	29
Figura 6. Cambio de material de los especímenes.....	29
Figura 7. Montaje eléctrico del tribómetro.....	30
Figura 8. Montaje de sensor Inductivo.....	31
Figura 9. Programación de contador de RPM.....	32
Figura 10. Estructura del tribómetro.....	34
Figura 11. Montaje motriz del tribómetro.....	35
Figura 12. Medida de la masa de las probetas.....	36
Figura 13. Masas externas adicionadas.....	36
Figura 14. Tribómetro tipo Pin-on-Disk elaborado por estudiantes.....	39
Figura 15. Propiedades mecánicas acero inoxidable AISI 304.....	40

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.Principales componentes del tribómetro.....	26
Tabla 2. Condiciones del ensayo.....	41
Tabla 3. Resultado del cálculo de desgaste.	42
Tabla 4. Cálculos estadísticos de los resultados.	43
Tabla 5. Repetibilidad y reproducibilidad en pines de acero inoxidable AISI 304.....	45
Tabla 6. Repetibilidad y reproducibilidad en pines de aluminio.....	46

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Grafica 1. Regresión Lineal Desgaste de Pines.....	44
Grafica 2. Regresión Lineal Desgaste de Discos.....	44

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO, CONSTRUCCION Y PRUEBA DE MAQUINA PIN-ON-DISK PARA ENSAYOS DE DESGASTE

AUTORES: Antonio José Forero Martínez, Nelson Fernando Rojas González.

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: Alfonso Santos Jaimes

La finalidad de este proyecto es profundizar en el estudio de la ciencia de los materiales por medio de ensayos de desgaste, promoviendo la investigación y la posibilidad de prestar un servicio que cumpla estándares normativos. Se construyó un tribómetro tipo Pin-on-Disk, que realizó pruebas de desgaste en acero inoxidable AISI 304 y Aluminio, según la norma ASTM G99-05, la cual dispone de los parámetros específicos para la elaboración de la máquina y la ejecución del ensayo.

Las pruebas realizadas arrojaron información valiosa en lo que concierne al cálculo del desgaste, donde específicamente se evidencia que es directamente proporcional a la distancia recorrida y a tipos de materiales con característica dúctil, es decir a determinada tensión mayor deformación. Adicionalmente se demuestra que los ensayos cumplen con los parámetros establecidos por la norma en términos de repetibilidad y reproducibilidad debido a que se encuentran dentro de los rangos requeridos.

PALABRAS CLAVES: Tribómetro, Desgaste, Reproducibilidad, Fricción y Ensayo

V°B° Director de Trabajo de Grado

Alfonso Santos Jaimes

ABSTRACT

TITLE: DESIGN, CONSTRUCTION AND TESTING OF MACHINE PIN-ON-DISK WEAR TESTING

AUTHORS: Antonio José Forero Martínez

Nelson Fernando Rojas González

FACULTY: Faculty of Mechanical Engineering

DIRECTOR: Alfonso Santos Jaimes.

The purpose of this project is to deepen in the study of materials science through wear tests, promoting investigation and the possibility to offer a service that meets normative standards. A pin on disc tribometer was built in order to develop wear tests on stainless steel AISI 304 and aluminum, according to the ASTM G99-05 standard, which disposes the specific parameters regarding the machine construction and test development.

The conducted tests revealed valuable information concerning wear calculation which has a directly proportional relation with travelled distance and materials of ductile nature, for instance at certain strain greater deformation. All assays meet the parameters established by the standard in terms of repeatability and reproducibility taking in to account that they are in the required ranges

KERWORDS: Tribometer, Wear, reproducibility, Friction and Testing

INTRODUCCIÓN

El ser humano alrededor de toda historia, ha pretendido crear bienes y servicios para satisfacer sus necesidades, mejorar su calidad de vida y disponer de ambientes más confortables; transformando los recursos disponibles por el entorno. Un claro ejemplo de este proceso, lo percibimos los últimos 60 años, donde la sociedad entra en la fase de globalización, cuya finalidad es concentrar sus esfuerzos en desarrollar nuevos y superiores insumos, que suplan los requerimientos específicos y detallados de los consumidores modernos. Razonablemente, todos los sectores económicos se ven involucrados, y en el caso del sector industrial, las exigencias cada vez son mayores, las empresas solicitan maquinaria más confiable y disponible para mantener las cadenas de producción estables, y así aumentar su competitividad en el mercado e incrementar sus utilidades.

Teniendo en cuenta lo anterior, y siendo explícitos en las empresas que se encargan de transformar las materias primas, los equipos mecánicos presentan alta criticidad en este proceso, y se crea la necesidad de investigar disciplinas muy precisas, para así cumplir los deseos de la industria. Es por eso, que el estudio de la ciencia de materiales cobra gran importancia, debido a que proporciona valiosos análisis en propiedades de material e innova en compuestos para aleaciones con el fin de incrementar la estabilidad en condiciones de funcionamiento severas.

Por lo tanto, profundizar en temas como tribología, ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación entre el contacto de superficies sólidas en movimiento, es una excelente opción para el análisis de elementos mecánicos. Particularmente, es de alto interés investigar concretamente el fenómeno de desgaste, que básicamente causa pérdida de material sólido por efecto del contacto de dos cuerpos expuestos en movimiento relativo, debido a que en grandes escalas puede ser la causa de fugas en equipos de bombeo, desbalanceo de equipo rotativo, aumento de tolerancias permisibles, generación de material

particulado que provoca abrasividad, entre otros; por estas razones es de suma importancia abordarlo, para contribuir en la optimización del funcionamiento de los componentes mecánicos.

Por consiguiente, hoy en día, las entidades educativas muestran elevado interés y compromiso en gestionar investigación alrededor de disciplinas técnicas e ingenieriles, que aporten conocimiento y nuevas ideas significativamente determinantes. Un referente, es la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, la cual estableció como estrategia crear laboratorios que desarrollen técnicas avanzadas en analizar fenómenos físicos, implementando normas de calidad en métodos o pruebas de ensayo, de este modo le genera valor agregado desde cualquier perspectiva que se contemple. Actualmente tiene como propósito promover y apoyar el próximo Laboratorio de Materiales que tendrá aplicaciones en tribología, especialmente en desgaste, siendo en primera medida implementar la *Norma ASTM G99-05 METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA PRUEBAS DE DESGASTE CON UN MAQUINA DE PIN-ON-DISK*. En efecto, es justificable plantear el proyecto de grado “DISEÑO, CONSTRUCCION Y PRUEBA DE MAQUINA PIN-ON-DISK PARA ENSAYOS DE DESGASTE” que propone diseñar y construir un tribómetro tipo Pin-on-Disk según la norma anteriormente mencionada, el cual es un método de ensayo para calcular el desgaste, cuyo propósito es caracterizar el comportamiento de materiales metálicos bajo condiciones estándares. De este modo se garantiza la confiabilidad de los resultados, por la configuración de las piezas, disposición de los especímenes y el correcto uso de los datos recolectados.

En conclusión el proyecto es coherente con las necesidades de la industria actual colombiana, se acoge a las exigencias mundiales de la globalización, contribuye en los planes de la universidad en posicionamiento a nivel nacional en temas de investigación y su compromiso pedagógico con el estudiante, en una excelente formación mediante herramientas tangibles de aprendizaje y enseñanza.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar la norma ASTM G99-05 *Método estándar para pruebas de desgaste con un maquina Pin-on-Disk*, mediante la aplicación de estándares establecidos según las normativas para profundizar en el estudio de metales y promover la generación de conocimiento.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apropiar el conocimiento y técnicas necesarias para la aplicación de métodos de ensayos de desgaste, por medio del estudio de bibliografía relacionada. RESULTADO: Resumen de la Norma ASTM G99-05 y terminología. INDICADOR: El resumen debe contener la información mínima y precisa para la ejecución del ensayo.
- Diseñar, construir y verificar el funcionamiento del tribómetro tipo Pin-on-Disk, basado en los parámetros técnicos de la norma ASTM G99-05 RESULTADO: Tribómetro Pin-on-Disk para ensayo de desgaste. INDICADOR: El ensayo debe satisfacer el cumplimiento de la norma ASTM G99-05.
- Ejecución de la prueba para el cálculo desgaste de material según la norma ASTM G99-05, Mediante el Tribómetro tipo Pin-on-Disk. RESULTADO: Documento de presentación de resultados del estudio de cálculo de desgaste. INDICADOR: el documento debe describir los aspectos técnicos evaluados por la norma ASTM G99-05.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 NORMA ASTM G99-05

La norma ASTM G99-05 Método estándar para pruebas de desgaste con una máquina Pin-on-Disk, establece los parámetros principales para la realización de ensayos de desgaste mediante el uso de un tribómetro tipo Pin-on-Disk, dentro de la cual se exponen las condiciones de la prueba, tales como carga aplicada, velocidad, distancia lineal recorrida, entre otras. Adicionalmente incluye características rigurosas en cuanto a la elaboración de la máquina presentando los principales componentes de la prueba, clase de instrumentación para medición y márgenes de rangos permisibles de disposición de trabajo, otorga libertad en cuanto a la magnitud de las dimensiones del dispositivo y el tipo de diseño estructural. También muestra el procesamiento de los datos experimentales arrojados por el ensayo, los cuales son manejados por medio de ecuaciones algebraicas. Y finalmente trata de manera muy general el manejo y la comunicación de resultados, teniendo como complemento otras normas que son muy rigurosas en este ámbito, con el fin de estandarizar la información obtenida, sin embargo los términos propuestos para presentar los resultados son favorables porque facilitan la interpretación y el análisis, para posteriormente encontrar conclusiones valiosas e interesantes. [1]

2.2 NORMA ASTM E178-08

Esta norma está enfocada en las muestras atípicas que se presentan en los valores obtenidos de manera experimental. Se realizan pruebas estadísticas para manejar los resultados, y encontrar las principales causas de la dispersión de los datos que se encuentran por fuera del rango. Se lleva a cabo un análisis más detallado donde se replica las mediciones de una propiedad de un material dado o se toma una muestra aleatoria para verificar las condiciones establecidas en el

ensayo, y realizar posteriormente las observaciones pertinentes. En condiciones en las que el experimentador no tenga la certeza de que se presentan condiciones normales, se debe reportar específicamente en qué manera los valores por fuera del rango, han sido utilizados para el análisis de datos.

Se busca que los criterios sobre valores atípicos obtenidos, se usen para probar la hipótesis de normalidad o una muestra de valores aleatorios tomados de una población normal o subyacente normal (Gaussiana) [2]

2.3 NORMA ASTM G40-12

Esta norma está enfocada en la definición y aplicación de terminología para ensayos de desgaste y erosión de los cuerpos, debido a interacciones mecánicas. Busca fomentar la uniformidad y estandarización en la presentación de informes, mediante la descripción de sus características, logrando interpretaciones más concretas según los alcances requeridos por cada prueba de laboratorio en particular. Básicamente está estructurado de modo similar a un glosario con información técnica. [3]

2.4 NORMA G117-02

Esta norma especifica la denominación de los datos obtenidos en los ensayos de desgaste, estandarizando los resultados obtenidos. El objetivo es mejorar la presentación y comparación de información entre diferentes laboratorios. Este documento está basado en métodos de cálculos de valores estadísticos y en formatos especificados por la ASTM, factores de vital importancia para la comunicación de los resultados finales en pruebas. [4]

2.5 DESGASTE

Fenómeno que consiste en la pérdida de material particulado o daño superficial debido a acciones mecánicas o contactos directos entre materiales. Es un aspecto de vital importancia en el diseño de componentes ya que consiste en la degradación progresiva de los elementos mecánicos por medio de la disminución de sus dimensiones y por consiguiente la pérdida de las tolerancias presentes. Existen múltiples tipos de desgaste en materiales dentro de los cuales se destacan principalmente:

- Desgaste adhesivo

Este tipo de desgaste se presenta cuando existen dos superficies en contacto soportando tensiones tan fuertes, que se produce un proceso de soldadura en frío, lo que da paso al desprendimiento de material bajo cualquier desplazamiento de ellas.

- Desgaste abrasivo

En este caso las propiedades de los materiales son diferentes y se da cuando una de las superficies se desliza en contra de otro material con protuberancias de mayor resistencia lo que produce la remoción del material, un ejemplo característico de este caso es el pulido, que por medio de discos corrugados se disminuyen las dimensiones de una pieza.

- Desgaste por fatiga superficial

Es resultado de esfuerzos cíclicos entre las asperezas de dos superficies en contacto, lo que genera una constante pérdida de material.

- Desgaste por fricción

Es el tipo de desgaste más común, producido por el desplazamiento de dos superficies en continuo contacto, lo cual debido a la fricción presente entre los mismos genera pérdidas de material.

- Desgaste erosivo

Este fenómeno actualmente es un foco de estudio, ya que está afectando a industrias de gran poder económico como lo son la industria minera y petrolera, lo cual genera pérdidas de gran magnitud debido a la falla acelerada de algunos componentes. Este tipo de desgaste se presenta en la superficie de los cuerpos debido a repetidos impactos de partículas sólidas que viajan en un líquido a altas velocidades.

- Desgaste por cavitación

Es un fenómeno que se presenta generalmente en los equipos rotativos y que disminuye en gran magnitud el rendimiento de un equipo y le causa daños irreparables y está dada por el impacto de burbujas contra la superficie de los elementos mecánicos.

- Desgaste corrosivo

Se da bajo la generación de películas frágiles de óxido entre las dos superficies lo que me da paso a procesos de deslizamientos y por consiguiente alterando los materiales involucrados.

Las principales variables relacionadas para la estimación del material desprendido son el trabajo aplicado y velocidad relativa de desplazamiento en la prueba. En conclusión, este fenómeno provoca pérdida o disminución de la eficiencia de energía mecánica producida. [5]

2.6 TRIBÓMETRO

Es un instrumento utilizado para la medición del coeficiente de fricción por deslizamiento entre dos elementos, en este caso específico se utilizan dos metales de diferentes propiedades y basándose en un tipo de tribómetro particular que es conocido como Pin-on-Disk. Recibe este nombre debido a que los

elementos de prueba son un disco giratorio y una probeta cilíndrica de punta redondeada la cual ejerce una fuerza perpendicular sobre el primero, formando un camino de desgaste en este y a su vez en la punta del perno, factores determinantes a la hora de calcular la cantidad de material perdido a causa del desgaste. Un factor muy importante dentro de este sistema es poder variar algunas condiciones como la velocidad, la cual es proporcionada por un motor de baja capacidad que debe manejar un rango de 60 a 600 rpm, por lo que el equipo contará con un contador de revoluciones, y debe mantener una velocidad constante durante todo el ensayo, para lo que se usará un variador de velocidad. Otra condición de vital importancia es la carga, para nuestro caso específico se usarán pesas, que se incluirán en el porta-probetas para que la fuerza sea aplicada en el punto deseado por el perno. Al variar características como las mencionadas anteriormente, el sistema permitirá conocer el comportamiento de las propiedades del material bajo diferentes condiciones de operación, lo que da un enfoque más amplio hacia la industria aplicada. [1]

2.7 MÉTODO DE ENSAYO

La norma ASTM G99-05 *Método estándar para pruebas de desgaste con un maquina Pin-on-Disk*, es una técnica o procedimiento que presenta diferentes parámetros de seguimiento para aplicar estándar en el cálculo del desgaste de material. Expone las características principales del montaje de los implementos correspondientes a la ejecución de la prueba. Siendo la implementación de especímenes por pares; los cuales deben ser posicionados de forma perpendicular, donde se toma uno de los especímenes como pieza móvil y el otro espécimen de pieza fija. Además que al espécimen vertical se le aplicará una carga específica. Las condiciones como el desplazamiento relativo, la velocidad, la humedad relativa y la humedad son fundamentales para el buen desarrollo del ensayo.

Posterior a los ensayos de desgaste se prosigue con la recopilación de datos arrojados de la prueba, y el análisis de la información recolectada. Se debe tener en cuenta que el procedimiento debe presentarse según la norma ASTM G99-05, para dar validez a los resultados obtenidos, de tal modo que los datos obtenidos se mantengan en un rango permisible. [1].

3. METODOLOGÍA

La metodología propuesta contempla actividades donde la puesta en marcha corresponde a la fecha de aprobación del presupuesto por parte de la universidad, tramite de entrega de la mercancía (instrumentación del ensayo) y el despacho de la misma. El desarrollo de las actividades se llevó a cabo como se muestra en el anexo 1.

3.1 REVISAR ASPECTOS GENERALES DE LA NORMA G99-05

Se hizo una revisión de esta norma la cual rige los parámetros generales para la construcción de un tribómetro tipo Pin-on-Disk según la ASTM (American Society for Testing Materials). En cuanto a las dimensiones y forma que debe satisfacer el diseño, este documento es muy permisivo ya que no tiene valores determinados. Aunque en cuestiones de funcionamiento y de componentes es muy estricta, da poca libertad al lector. Se realizó un listado de los principales parámetros a tener en cuenta para consolidar la ejecución del ensayo, los cuales se muestran a continuación.

- Rangos dimensionales de los especímenes de estudio
- Materiales involucrados (parámetro que se tuvo que modificar debido a la falta de disponibilidad en el mercado comercial)
- Instrumentos especializados de medición debidamente calibrados según los parámetros de la normativa.
- Motor con las especificaciones requeridas, en conjunto con un contador de revoluciones del mismo.

Cabe resaltar que esta actividad se mantuvo durante toda la ejecución del proyecto, ya que se debe tener un proceso de verificación constante para cumplir en su totalidad los parámetros de la norma, durante el proceso de elaboración del tribómetro.

3.2 REVISAR LAS NORMAS ANEXAS PARA LA PRESENTACIÓN DE RESULTADOS (ASTM E178-08, G40-12, G117-02).

Se procedió a revisar estos documentos los cuales parametrizan la ejecución de las pruebas y la toma de datos arrojados por los ensayos, se encontró que básicamente las normas destacan parámetros tales como:

- ASTM E178-08: Manejo de información estadística, variabilidad y valores atípicos en los resultados de las pruebas de desgaste.
- ASTM G40-12: Terminología y definiciones de desgaste y erosión de los cuerpos debido a interacciones mecánicas.
- ASTM G117-02: Recopilación y presentación de datos para estandarizar.

Cabe resaltar que esta actividad se mantuvo durante todo el proceso de ensayo y pruebas del tribómetro para la toma de datos.

3.3 REVISAR BIBLIOGRAFÍA REFERENTE A LOS MÉTODOS DE ENSAYO PARA CÁLCULO DE DESGASTE

Se realizó una documentación por parte de los estudiantes acerca de métodos de ensayo para cálculos de desgaste, y se encontró que la información es bastante amplia, lo que permitió incrementar los conocimientos alrededor del tema y contribuir a la apropiación de aspectos principales relacionados a estos métodos.

Luego se consolidó los hallazgos, y de modo general se concluye que:

El objetivo principal de este tipo de pruebas es determinar la pérdida de material sólido a partir de un ensayo experimental, normalmente la máquina encargada de determinar estos ensayos se le denomina tribómetro, existen algunos tipos entre los cuales se destacan:

- Tribómetro Pin-on-disk.

- Tribómetro de cilindros cruzados.
- Tribómetro de discos abrasivos.
- Tribómetro de cuatro bolas.

Aunque estos tribómetros tengan la misma finalidad, la variación estructural de los especímenes y de la aplicación del ensayo es muy notoria. De igual manera se enfocó en el Tribómetro Pin-on-Disk, el cual es el objetivo de este documento.

Aunque la información encontrada fue de gran ayuda para la apropiación del tema, en su mayoría estaba ligada a otras normas donde se contemplan parámetros adicionales de vital importancia en este tipo de ensayos. Por lo tanto se tomó la opción de investigar acerca de ellas.

En lo que se refiere a la implementación de la norma ASTM G99-05 *Método estándar para pruebas de desgaste con un maquina Pin-on-Disk*, en los medios locales la información es muy limitada, únicamente se revisó un proyecto de grado similar en esencia ya que comprendan la misma función. Este describe la construcción de un tribómetro usando tipo de dispositivo, “cilindros cruzados”, lo cual es una variante de gran importancia, esta cobijado bajo la misma norma pero la anterior versión 2005, omitiendo algunos requerimientos de la actual reforma.

3.4 IDENTIFICAR LOS PRINCIPALES PARÁMETROS DE DISEÑO SEGÚN LA NORMA

Se analizó los principales parámetros de diseño y construcción para la máquina o tribómetro tipo Pin-on-Disk, teniendo en cuenta las condiciones y recomendaciones establecidas por la Norma ASTM G99-05. Posterior al análisis, se logró concretar, según el conocimiento y experiencia de los estudiantes e información recolectada, los primordiales criterios para la ejecución del proyecto. Estos criterios en particular, son los responsables de proporcionar características especiales y únicas de este desarrollo, se mencionan en seguida, ver tabla 1 y se muestran en la figura 1, 2 y 3.

CARACTERISTICA	CONVENCION
Tipo de material	
Dimensiones	
Sistema de sujeción motriz	1
Sistema de soporte estático	2
Especímenes	3
Disposición Eléctrica	4

Tabla 1.Principales componentes del tribómetro.

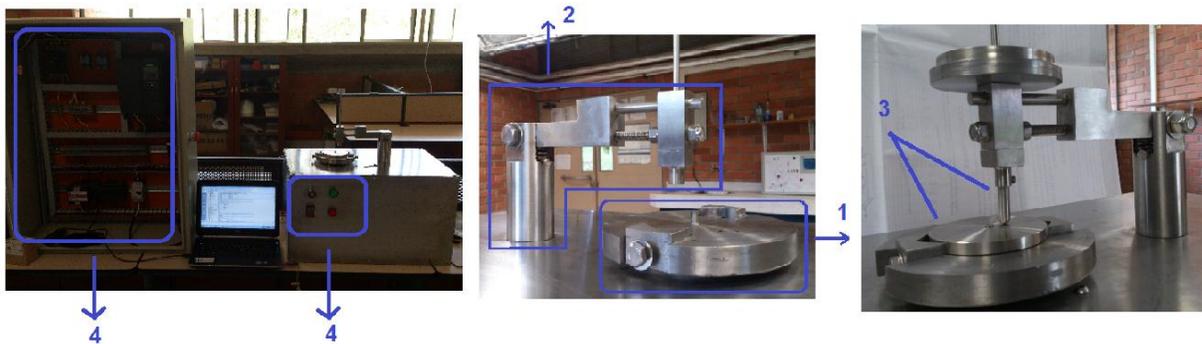


Figura 1. Principales compones del tribómetro.

Después de determinar los principales componentes de la máquina, se hizo una formulación de los detalles que cada uno, y se acordó las especificaciones para cada uno.

- Tipo de material

Se eligió acero inoxidable AISI 304 por su alta resistencia a la oxidación y durabilidad debido a que se encuentra en un entorno expuesto al medio ambiente. Así mismo este material posee acabados superficiales finos de gran calidad, lo que es excelente para la construcción y aporta valor agregado a la máquina, ya que esta hace parte de la implementación de una norma y además es uno de los sistemas que componen el laboratorio de investigación para materiales.

- Dimensiones

Se determinaron las dimensiones del dispositivo basándose en una manipulación sencilla y un peso ligero para facilitar su desplazamiento, por lo que se trabajó con las dimensiones mínimas permisibles.

- Sistema de sujeción motriz

Se decidió trabajar con un porta-probetas tipo mandril, ya que brinda la posibilidad de utilizar discos de diferentes diámetros fácilmente intercambiables, además cuenta con una guía que permite posicionar centradamente la probeta. El diseño inicial fue planteado de forma tal que el porta-probetas tenga un agujero pasante, en el que se atraviesa un espárrago para introducir las tenazas de sujeción, que sostienen las probetas (discos de prueba) tal como se muestra en la figura 2. A pesar que proporciona las características mínimas de diseño, esta configuración provoco: desalineación, alta vibración, reducción en el rendimiento de la maquina a velocidad de operación y una fijación insuficiente entre las tenazas de sujeción y la probeta.

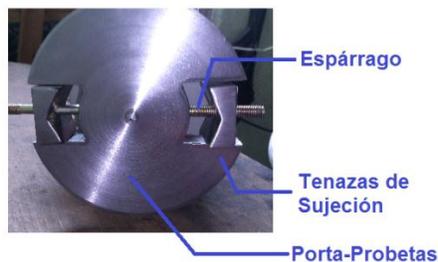


Figura 2. Diseño inicial del sistema de sujeción

Debido a lo anterior, se realizó una variación en cuanto al diseño originalmente planteado, donde ahora el porta-probetas posee un agujero con rosca interna hasta una profundidad determinada (no pasante), en el que se introduce un tornillo que aprisiona las tenazas de sujeción, así se logra un mejor apriete en el sistema de conexión de las piezas móviles. Además el porta-probetas es acoplado directamente al motor para perfeccionar el sistema de acople. Ver la figura 3.



Figura 3. Diseño final del sistema de sujeción

- Sistema de soporte estático

Está compuesto por un brazo porta-pasador, acoplado por un pivote al soporte del brazo en uno de sus extremos. Inicialmente se esperaba que tomara una posición neutral con un ángulo de noventa grados con respecto a la vertical, pero debido a su peso presento un declive, es decir formo un ángulo menor a noventa grados con respecto a la vertical. Por lo tanto la mejor solución, fue introducir un resorte al lado del pivote con el fin de contrarrestar la fuerza que ejerce su peso, cumpliendo la función de reacciones estáticas en un equilibrio de cuerpo libre. Adicionalmente cuenta con una guía porta-masas, que permite aumentar la carga de aplicación a la probeta estacionaria para un mejorar el contacto con la probeta móvil. Ver la figura 4.

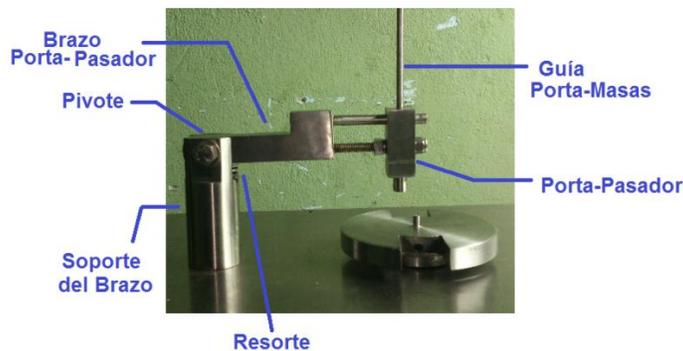


Figura 4. Componentes del sistema de soporte estático

- Especímenes

Se seleccionaron dos tipos de probetas. La probeta estacionaria, que es un pasador o pin sujetado en la parte superior al brazo porta-pasadores, y en su otro extremo esta libremente expuesto para realizar la prueba de desgaste. Esta punta posee una geometría redondeada que ofrece procesos de elaboración menos laboriosos, con respecto a una geometría esféricas, que es más compleja en su fabricación, por tal razón esta fue descartada. Y la probeta móvil, que es un disco acoplado al porta-probetas por medio de las tenazas de sujeción y gira según la velocidad del motor transmitida. Su diseño inicial comprendía un disco macizo de 500 gramos aproximadamente, y por efectos de medir su masa en una balanza calibrada, que solo permite un rango hasta 190 gramos, se optó por retirar material para obtener un disco con un extrusión interna. Ver la figura 5.

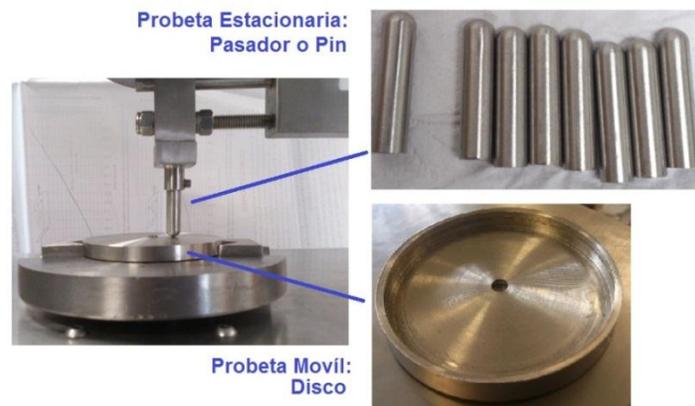


Figura 5. Especímenes

El tipo de material de los especímenes se replanteo, debido a falta de disponibilidad comercial en el mercado nacional. Y en caso de tomar la opción de importar, los costos superan lo presupuestado. Ver la figura 6.

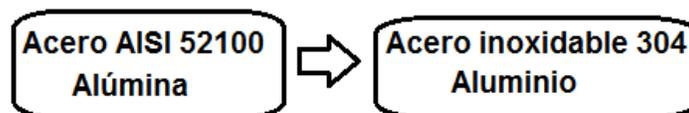


Figura 6. Cambio de material de los especímenes.

- Disposición eléctrica

Se manejó de manera independiente la parte eléctrica de la mecánica para facilitar el mantenimiento en cualquiera de los dos casos. Donde se creó un programa que controle variables como: velocidad del motor, encendido, apagado y tiempo de operación.

En conclusión, los aspectos e información mencionada anteriormente se consolidaron en un documento. Ver anexo 3.

3.5 ESTABLECER CRITERIOS ADICIONALES PARA EL DISEÑO DEL EQUIPO SEGÚN CONOCIMIENTO ADQUIRIDO

Se tomaron como criterios adicionales, la implementación de sistemas electrónicos como se muestra en la Figura 7, con el fin de mejorar el desempeño y manejo del dispositivo para ensayo de pruebas de desgaste. Los instrumentos utilizados son los siguientes:



Figura 7. Montaje eléctrico del tribómetro.

- Un sensor tipo inductivo para detectar las revoluciones del disco, ubicándolo en el eje motriz. Ver figura8.

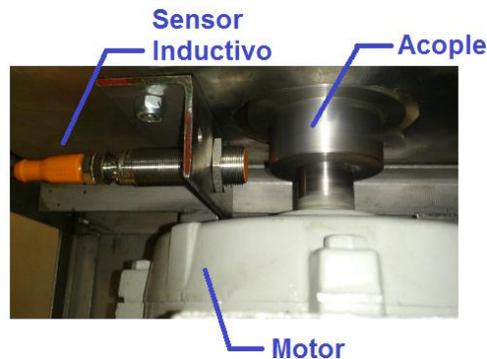


Figura 8. Montaje de sensor Inductivo

- Un variador Micromaster 440 para facilitar la variación de la velocidad en las diferentes pruebas según lo exige la norma, además es un dispositivo de gran utilidad para automatizar un sistema.
- Un PLC S7-200 para trabajar en conjunto con el variador, siendo una automatización versátil, por sus múltiples funciones que este conjunto puede generar.
- Un sistema de manejo sencillo para la programación, de tal modo que ingresando el menor número de datos posibles la máquina realice las pruebas deseadas.
- Dispositivos de seguridad, con el fin de proteger eléctricamente todos los elementos y al personal de operación de la máquina. En caso de alguna dificultad, se programaron capas de protección, tales como: una primaria, compuesta por seguridad del variador, PLC y programación desarrollada, y en una capa secundaria, se programado paradas de emergencia, se instaló un guardamotor y breakers independientemente conectados del resto de protecciones contempladas.

La programación del tribómetro se realizó en el software Step7 Microwinm debido a la compatibilidad con el PLC Siemens S7 200. Se planteó un esquema sencillo en el cual se destacaban tres funciones principales:

- La activación del motor por medio de una señal al variador de velocidad, dispositivo que lo gobernara.
- La activación de mandos manuales como pulsadores on/off, paradas de emergencia, pilotos indicadores y dispositivos de seguridad.
- Finalmente la captación de pulsos del sensor inductivo con el fin de conocer el número de revoluciones marcadas por el porta-probetas.

Estos parámetros generan mayor control del dispositivo siendo aplicable al software implementado, mejorando la interfaz humano-máquina. En el caso del variador, se ingresan los datos numéricos y se definen variables de funcionamiento como: encendido, velocidad, y desactivación de la máquina. Trabaja en conjunto con el sensor, el cual al detecta los pulsos, y va almacenando este valor en el contador y simultáneamente compara con un numero de vueltas establecido por el usuario, el cual al igualar este valor predeterminado, envía un comando con el que se detendrá la maquina un intervalo de 4 a 6 segundos. Ver figura 9. Esta configuración brinda confiabilidad en los datos, porque tiene rampas de aceleración y frenado en tiempos despreciables, en comparación al tiempo total de cada prueba.

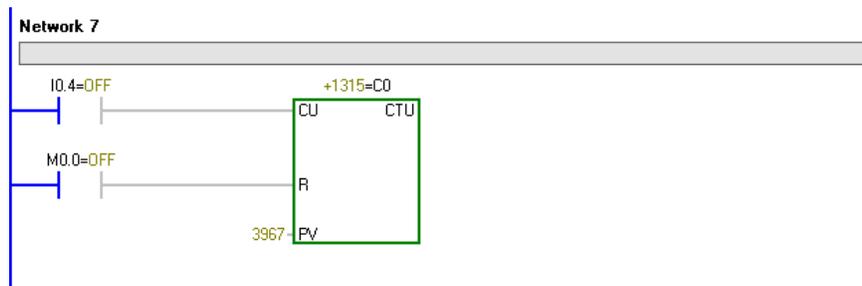


Figura 9. Programación de contador de RPM.

3.6 EJECUTAR LA COMPRA DE MATERIALES REQUERIDOS

Para efectuar el proceso de compras, se estimó un presupuesto conformé a las cotizaciones realizadas previamente. Inicialmente se acordó que la financiación

corría por cuenta de los estudiantes responsables del proyecto, pero gracias al apoyo y asociación que se logró con la Universidad, esta destino un aporte de la mayoría del capital requerido, por medio del departamento de investigaciones, organismo que promueve proyectos de ciencia y desarrollo.

Siendo esta la situación, los estudiantes se comprometieron a gestionar la ejecución de los recursos según las políticas de la Universidad, en consecuencia, se diligenciaron los formatos establecidos siguiendo los procedimientos, que describen el trámite para solicitud de compra. Además se realizó seguimiento al pedido, desde la disponibilidad presupuestal hasta culminar con la verificación del estado de los artículos a adquiridos. De acuerdo con esto, se llevó a cabo un trabajo en conjunto con el departamento de compras, el cual apoyo activamente el proceso, brindando soporte en las necesidades manifestadas y dando claridad en los requerimientos. Los artículos de compra son los siguientes:

- Motor siemens trifásico de 1hp a 800rpm
- Disyuntor para motor de 1hp (4amp) siemens
- Luces piloto marca siemens (rojo y verde)
- Interruptor con llave de seguridad siemens
- Pulsador paro de emergencia tipo hongo siemens
- Pulsador doble 0-1 siemens
- Sensor inductivo ref.: IGS208
- Ángulos de acero inox 1* 1/8 tramo: 5,80cm
- Láminas de acero inox c18(40*35) (60*35) c16 (6040)
- Disco diam: 15 cm, esp: 2cm con acabados superficiales.
- Acople para eje de 1" con acabados superficiales.
- Tenazas de sujeción con acabados superficiales.

- Materiales eléctricos.

De igual manera la facultad de Ingeniería Mecánica aportó un PLC S7-200, equipo utilizado en la programación, y un Variador Siemens Micromaster 440 que modifica y controla la velocidad del motor. Estos equipos proporcionaron soporte en aspectos de automatización de la máquina siendo significativo en la exactitud de las medidas.

3.7 CONSTRUIR LA ESTRUCTURA DEL EQUIPO

Debido a los parámetros establecidos por la norma se realizó la construcción del dispositivo, en la cual se destacan tres principales actividades, las cuales son:

- Se realizó la construcción del soporte estructural, basándose en un cajón de ángulo de acero inoxidable de 1x1/8 pulg, y cubierto por laminas removibles calibre 16 para facilitar el trabajo dentro del soporte.
- Se maquinó por medio de torno y fresadora los diferentes componentes del brazo pivotado originando un conjunto de cinco piezas, el brazo soporte, el brazo pivotado, el porta-pasadores, porta-masas y cubo desplazable.
- La construcción del porta-probetas tipo mandril se realizó en hierro debido al espesor y al diámetro del mismo, aunque esto nos presentó un retraso en el cronograma debido a que no se tuvieron las precauciones pertinentes con el tratamiento térmico del material, lo que dio como resultado repetir el proceso de corte. Se realizaron trabajos de tornó y fresadora para poder obtener el producto final que se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Estructura del tribómetro.

3.8 ENSAMBLAR EL EQUIPO Y ACOPLAR LA PARTE MOTRIZ

Se determinó que dentro del soporte estructural se ubica y apoya del motor trifásico posicionándolo de manera vertical. Los paraleles se trabajaron con ángulos de acero inoxidable de denominación (1x1/8 pulgada). Por otra parte, el motor se acoplo al porta-probetas tipo mandril por un elemento de sujeción tipo cuñero, durante el primer proceso de ensamble, el acople presento una holgura significativa respecto al eje motriz, lo que ocasiono serios problemas de vibraciones. En respuesta a esta situación, se decidió maquinar un nuevo porta-probetas, que contenga dimensiones demasiado precisas que realmente se acople de manera ajustada al eje mitigando la holgura. El producto final se observa en la Figura 11.



Figura 11. Montaje motriz del tribómetro.

3.9 REALIZAR LA PRUEBA SEGÚN LO ESTABLECE LA NORMA

Para el desarrollo de las pruebas se debe tener en cuenta los parámetros específicos definidos bajo la norma G99-05 *método de prueba estándar para pruebas de desgaste con una máquina de pin-on-disk*, el procedimiento describe los siguientes aspectos:

- Se deben limpiar de manera minuciosa los especímenes (disco y pasador), con el fin de eliminar las impurezas y materiales extraños presentes en la superficie.

- Se procede a pesar los especímenes con una balanza calibrada la cual debe tener una precisión de 0,0001g o mejor. Ver figura 12.

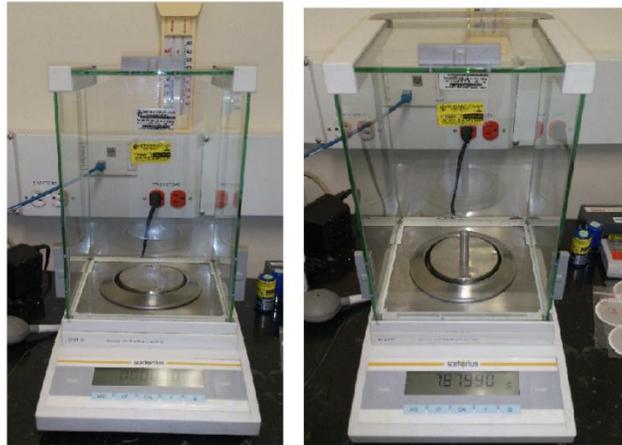


Figura 12. Medida de la masa de las probetas.

- Insertar el disco y el pasador de forma segura en el dispositivo de sujeción, de manera que se encuentren perpendicularmente al eje de transmisión con el fin de mantener las condiciones de contacto necesarias.
- Añadir las masas requeridas para garantizar la carga recomendada, se presiona el pasador contra el disco por medio de la adición o sustracción de masas externas. Ver figura 13.



Figura 13. Masas externas adicionadas.

- Ingresar los valores en el programa los cuales incluyen, frecuencia que relaciona la velocidad de operación de la prueba y número de revoluciones del disco, por consiguiente la distancia lineal recorrida.
- Se inicia la prueba con las muestras en contacto bajo carga y se detiene cuando el número deseado de revoluciones se alcanza. Las pruebas no deben interrumpirse o continuarse.
- Se retiran las muestras y de nuevo se procede a su limpieza de cualquier residuo suelto.
- Se repite el proceso de medición del peso de los especímenes, para determinar la pérdida de material durante la prueba de desgaste.

Este proceso se debe repetir modificando algunas variables como la distancia a recorrer, frecuencia y materiales en contacto, con el fin de obtener múltiples valores que permitan resultados estadísticamente significativos.

3.10 OBTENER LA INFORMACIÓN REQUERIDA PARA EL ANÁLISIS DE DATOS

Se realizaron pruebas con diferentes condiciones de operación de la máquina, con el fin de obtener repetibilidad en los datos arrojados por las pruebas de ensayo. Las variables más significativas son:

- Tipos de material: Se utilizó acero inoxidable AISI 304 y aluminio
- Velocidad de operación: Se trabajó velocidades entre un rango permisible de 60 a 600 rpm
- Distancia lineal recorrida: Se concretó manejar valores de 250, 750, 1000 m.

El parámetro principal que se requiere al final de la prueba es la pérdida de material, obtenida por una relación de diferencia de pesos de los especímenes, procediendo a realizar un estudio estadístico a partir de la información alcanzada.

3.11 EVALUAR LA CORRELACIÓN DE LOS RESULTADOS DE CADA PRUEBA

Luego de obtener los resultados de los ensayos de desgaste, se procede a realizar estadísticamente una linealización de los datos buscando cumplir los estándares establecidos. Se declara como punto de referencia, los ensayos realizados por los diferentes laboratorios que acogen la norma ASTM G99-05 *método de prueba estándar para pruebas de desgaste con una máquina de pin-on-disk*.

3.12 PRESENTAR LOS RESULTADOS DEL CÁLCULO DE DESGASTE EN UN DOCUMENTO

Cumpliendo con los objetivos propuestos para el desarrollo del proyecto, se construye un documento final, con el propósito de presentar los datos obtenidos y los cálculos realizados, en el ensayo de prueba desgaste.

Por otra parte, este proyecto en general y especialmente este informe, sirve como referente para comparar los futuros resultados de un ensayo de cálculo de desgaste y analizar si son coherentes o no, con respecto a los rangos establecidos por la norma.

4. RESULTADOS

4.1 RESUMEN DE LA NORMA ASTM G99-05 Y TERMINOLOGÍA

Se realizó un compendio de los tópicos más importantes de la normativa, resaltando los parámetros principales de la construcción del Tribómetro Pin-on-Disk, la correcta ejecución de los ensayos de desgaste y de igual manera la presentación de resultados adquiridos en el proceso de prueba. Este compendio esta consolidado en un resumen presentado en el Anexo 2.

4.2 TRIBÓMETRO PIN ON DISK PARA ENSAYOS DE DESGASTE

Se obtuvo como producto final un *tribómetro tipo Pin-on-disk*, que satisface los requerimientos de la norma ASTM G99-05 *método de prueba estándar para pruebas de desgaste con una máquina de pin-on-disk*. Ver figura 14. Ver anexo 3.

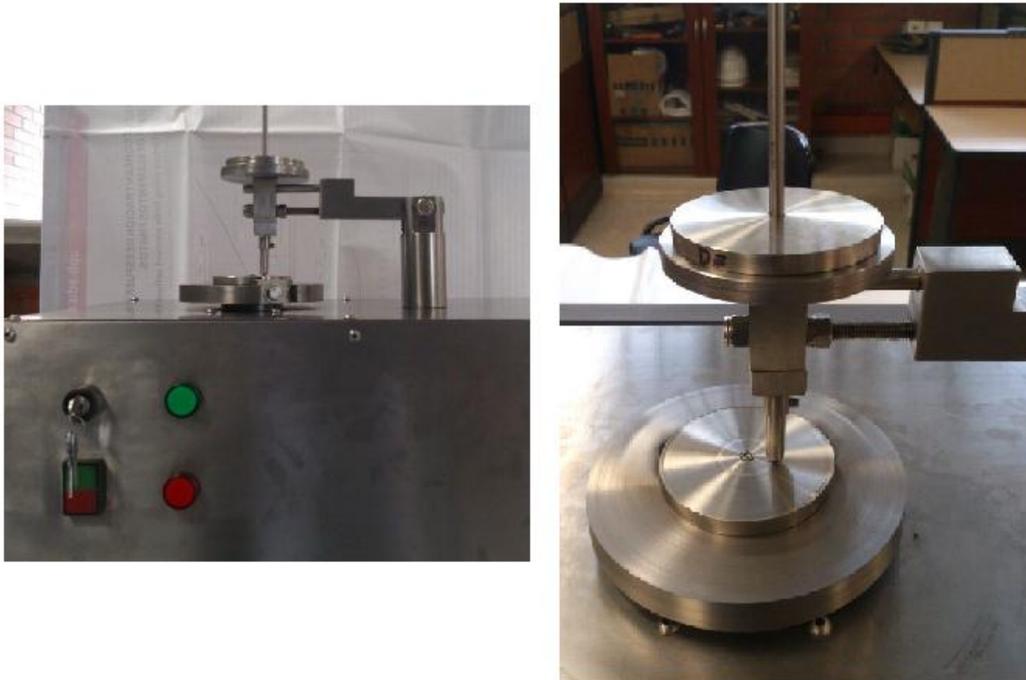


Figura 14. Tribómetro tipo Pin-on-Disk elaborado por estudiantes.

Este dispositivo fue elaborado en su mayoría en acero inoxidable AISI 304, debido a las condiciones del ambiente de trabajo y su fino acabado superficial, sus propiedades mecánicas se muestran en la figura 15. Sin embargo, solo una pieza fue elaborada en hierro, el porta probetas, por cuestiones de disponibilidad de material.

Physical Properties	Metric	English
Density	8.00 g/cc	0.289 lb/in ³
Mechanical Properties	Metric	English
Hardness, Brinell	123	123
Hardness, Knoop	138	138
Hardness, Rockwell B	70	70
Hardness, Vickers	129	129
Tensile Strength, Ultimate	505 MPa	73200 psi
Tensile Strength, Yield	215 MPa	31200 psi
	@Strain 0.200 %	@Strain 0.200 %
Elongation at Break	70 %	70 %
Modulus of Elasticity	193 - 200 GPa	28000 - 29000 ksi
Poissons Ratio	0.29	0.29
Shear Modulus	86.0 GPa	12500 ksi
Charpy Impact	325 J	240 ft-lb

Figura 15. Propiedades mecánicas acero inoxidable AISI 304. [7]

En lo que concierne a la parte eléctrica se independizó de la parte mecánica, con el fin de favorecer el proceso de mantenimiento, aportar comodidad al trabajar en el equipo y dar flexibilidad en el intercambio de algunos dispositivos por razones de repuestos o mejoras. Además se desarrolló un sistema de automatización con objeto de mejorar la interfaz humano-máquina por medio de la instalación de dispositivos electrónicos. Por lo tanto es una propuesta versátil y eficiente.

4.3 DOCUMENTO DE PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DEL ESTUDIO DE CÁLCULO DE DESGASTE

Se recopilaron los datos arrojados por el ensayo en una tabla, que contiene los parámetros de medición y cálculos de desgaste, por exigencias de la norma *ASTM G99-05 Método estándar para pruebas de desgaste con una maquina Pin-on-Disk*, las mediciones de desgaste deben ser reportadas como la pérdida de volumen en milímetros cúbicos para el pasador y el disco, por separado.

En primera estancia se determinó un peso inicial promediando dos mediciones del peso en igualdad de condiciones, de igual manera para el peso final, al obtener la diferencia de pesos entre los dos promedios, se obtenía la pérdida de masa para cada uno de los especímenes analizados y finalmente se utilizó la ecuación 1, para la conversión de la pérdida de masa a pérdida de volumen en milímetros cúbicos.

$$volumen\ perdido\ [mm^3] = \frac{masa\ perdida\ [g]}{densidad\ [g/cm^3]} * 1000 \quad Ecuación\ 1.$$

Para la realización del ensayo se utilizaron las siguientes condiciones de prueba:

CONDICIONES DE LA PRUEBA			
CARGA APLICADA [N]	10,2	10,2	10,2
VELOCIDAD ANGULAR [RPM]	300	300	300
DISTANCIA RECORRIDA [M]	250	750	1000
NUMERO DE GIROS	3980	5971	5307
DIAMETRO DE CONTACTO [M]	0.02	0,04	0,06
TEMPERATURA DE TRABAJO [°C]	23	23	23

Tabla 2. Condiciones del ensayo.

RESULTADOS DE DE LA PRUEBA											
MATERIAL	DISTANCIA	Probetas	Peso inicial			Peso Final			DESGASTE [G]	DENSIDAD [G/cm ³]	VOLUMEN PERDIDO [mm ³]
			P1 [G]	P2 [G]	PROM1 [G]	P1 [G]	P2 [G]	PROM2 [G]			
ACERO INOXIDABLE AISI 304	250M	PIN 1	21,40310	21,40300	21,40305	21,39426	21,39425	21,39426	0,00879	8,00000	1,09937
		PIN 2	21,32537	21,32529	21,32533	21,31645	21,31643	21,31644	0,00889	8,00000	1,11125
		PIN 3	21,40626	21,40625	21,40626	21,39685	21,39687	21,39686	0,00940	8,00000	1,17438
		DISCO 1	155,1118	155,1119	155,1119	155,0884	155,0883	155,0884	0,02350	8,00000	2,93750
		DISCO 2	118,1085	118,1082	118,1084	118,0904	118,0906	118,0905	0,01785	8,00000	2,23125
	DISCO 3	115,7899	115,7888	115,7894	115,7716	115,7713	115,7715	0,01790	8,00000	2,23750	
	750M	PIN 4	21,25306	21,25302	21,25304	21,23996	21,23996	21,23996	0,01308	8,00000	1,63500
		PIN 5	21,37557	21,37556	21,37557	21,36238	21,36241	21,36240	0,01317	8,00000	1,64625
		PIN 6	21,26853	21,26845	21,26849	21,25592	21,25592	21,25592	0,01257	8,00000	1,57125
		DISCO 1	155,0884	155,0883	155,0884	155,0488	155,0491	155,0490	0,03940	8,00000	4,92500
		DISCO 2	118,0904	118,0906	118,0905	118,0498	118,0498	118,0498	0,04070	8,00000	5,08812
	DISCO 3	115,7716	115,7713	115,7715	115,7382	115,7383	115,7383	0,03320	8,00000	4,15000	
	1000M	PIN 7	21,04011	21,04010	21,04011	21,01150	21,01141	21,01146	0,02865	8,00000	3,58125
		PIN 8	21,26417	21,26409	21,26413	21,23632	21,23628	21,23630	0,02783	8,00000	3,47875
		PIN 9	21,42278	21,42269	21,42274	21,39293	21,39299	21,39296	0,02977	8,00000	3,72187
DISCO 1		155,0488	155,0491	155,0490	155,0040	155,0038	155,0039	0,04505	8,00000	5,63125	
DISCO 2		118,0498	118,0498	118,0498	118,0040	118,0039	118,0040	0,04584	8,00000	5,73062	
DISCO 3	115,7382	115,7383	115,7383	115,6994	115,6991	115,6993	0,03900	8,00000	4,87500		
ALUMINIO	250M	PIN 1	7,87991	7,87986	7,87989	7,86426	7,86426	7,86426	0,01563	2,69840	5,79047
		PIN 2	7,68743	7,68737	7,68740	7,67323	7,67319	7,67321	0,01419	2,69840	5,25867
		PIN 3	7,69378	7,69379	7,69379	7,67847	7,67845	7,67846	0,01533	2,69840	5,67929
		DISCO 1	93,4736	93,4728	93,4732	93,4056	93,4055	93,4056	0,06765	2,69840	25,07041
		DISCO 2	97,3096	97,3094	97,3095	97,2520	97,2520	97,2520	0,05750	2,69840	21,30892
	DISCO 3	93,3140	93,3139	93,3140	93,2502	93,2505	93,2504	0,06360	2,69840	23,56952	
	750M	PIN 1	7,69531	7,69525	7,69528	7,66900	7,66897	7,66899	0,02630	2,69840	9,74466
		PIN 2	7,34064	7,34058	7,34061	7,31512	7,31511	7,31512	0,02549	2,69840	9,44819
		PIN 3	7,59664	7,59656	7,59660	7,57161	7,57162	7,57162	0,02499	2,69840	9,25919
		DISCO 1	93,4056	93,4055	93,4056	93,2734	93,2734	93,2734	0,13215	2,69840	48,97347
		DISCO 2	97,2520	97,2520	97,2520	97,1123	97,1124	97,1124	0,13965	2,69840	51,75289
	DISCO 3	93,2502	93,2505	93,2504	93,1143	93,1145	93,1144	0,13595	2,69840	50,38171	
	1000M	PIN 1	7,62999	7,62985	7,62992	7,59663	7,59665	7,59664	0,03328	2,69840	12,33323
		PIN 2	7,60684	7,60682	7,60683	7,57386	7,57379	7,57383	0,03301	2,69840	12,23132
		PIN 3	7,68519	7,68511	7,68515	7,65246	7,65242	7,65244	0,03271	2,69840	12,12200
DISCO 1		93,2734	93,2734	93,2734	93,0867	93,0864	93,0866	0,18685	2,69840	69,24474	
DISCO 2		97,1123	97,1124	97,1124	96,9217	96,9216	96,9217	0,19070	2,69840	70,67151	
DISCO 3	93,1143	93,1145	93,1144	92,9369	92,9367	92,9368	0,17760	2,69840	65,81678		

Tabla 3. Resultado del cálculo de desgaste.

Finalmente después de la ejecución de la prueba de cálculo de desgaste, se sintetiza que mediante el uso de un tribómetro tipo Pin-on-Disk se obtiene la valoración de la pérdida de masa en un material dado, el cual es función de la velocidad de rozamiento, carga de aplicación entre contacto, tiempo de exposición y un minucioso montaje. Por lo tanto en el caso de los ensayos realizados se observó que:

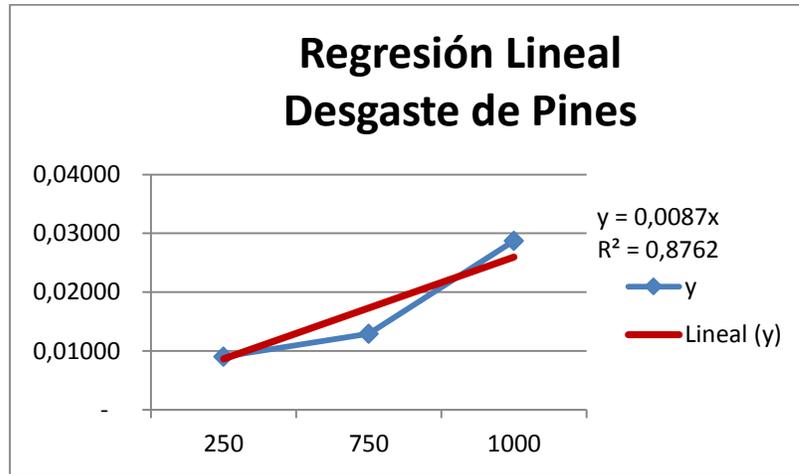
- En cuanto mayor sea la distancia recorrida, mayor es el desgaste.
- Entre un material sea más dúctil la pérdida de masa es mayor.

Se calculó la desviación estándar promediando los resultados de desgaste para cada grupo de especímenes, agrupándolos por material y distancia lineal de la siguiente manera:

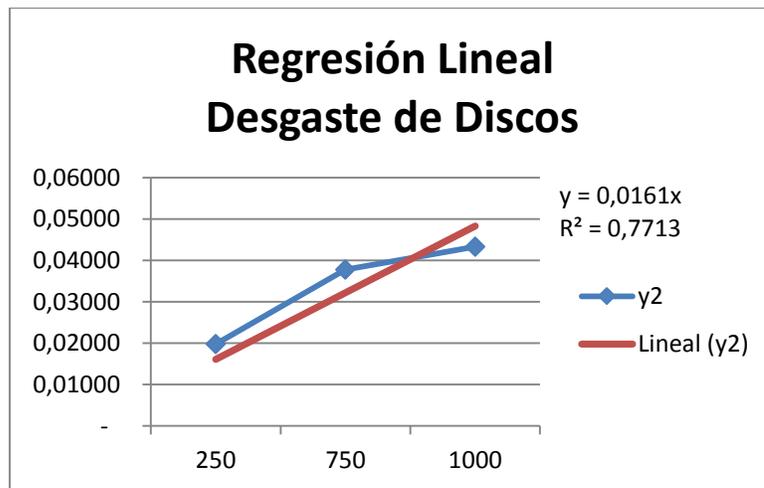
RESULTADOS DE LA PRUEBA					
MATERIAL	DISTANCIA [m]	Probetas	DESGASTE [G]	PROMEDIO	DESVIACION ESTANDAR
ACERO INOXIDABLE AISI 304	250	PIN 1	0,00879	0,00903	0,00032
		PIN 2	0,00889		
		PIN 3	0,00940		
		DISCO 1	0,02350	0,01975	
		DISCO 2	0,01785		
		DISCO 3	0,01790		
	750	PIN 4	0,01308	0,01294	0,00032
		PIN 5	0,01317		
		PIN 6	0,01257		
		DISCO 1	0,03940	0,03777	
		DISCO 2	0,04070		
		DISCO 3	0,03320		
	1000	PIN 7	0,02865	0,02875	0,00098
		PIN 8	0,02783		
		PIN 9	0,02977		
DISCO 1		0,04505	0,04330		
DISCO 2		0,04584			
DISCO 3		0,03900			

Tabla 4. Cálculos estadísticos de los resultados.

Se recopilaron los resultados con el fin de linealizar los datos obtenidos y conocer la respectiva ecuación de la recta para los diferentes especímenes por separado, arrojando las siguientes gráficas:



Gráfica 1. Regresión Lineal Desgaste de Pines



Gráfica 2. Regresión Lineal Desgaste de Discos.

Según las exigencias de la norma se calcularon los valores estándares para conocer si el tribómetro tipo PIN-ON-DISK se encuentra dentro de los parámetros deseados en cuanto a repetibilidad y reproducibilidad se refiere. Se tomó como referente el desgaste presentado en los pines de los diferentes materiales, la condición de variación fue, diferentes operarios, obteniendo los siguientes datos:

ACERO INOXIDABLE AISI 304										
	OPERADOR 1		OPERADOR 2		RANGO 1	RANGO 2	Tolerancia	TOTAL		
DISTANCIA (M)	PRUEBA A	PRUEBA B	PRUEBA A	PRUEBA B				% repetibilidad	% reproducibilidad	%r&R
250	0,00879	0,00889	0,00879	0,00940	0,00010	0,00061	0,03142	4,93114	2,85433	5,69766
				RANGO	0,000355					
				X1	0,008840		%r&R	si <10% El sistema es aceptable		
				X2	0,009095			Si es 10%<Se necesita mejora		
				XD	0,000255			Nota: La tolerancia fue especificada según requerimientos de la norma (95%)		
				d2	1,18					
				Repetibilidad	0,001549					
				D2	1,41					
				Reproducibilidad	0,000897					
	OPERADOR 1		OPERADOR 2		RANGO 1	RANGO 2	Tolerancia	TOTAL		
DISTANCIA (M)	PRUEBA A	PRUEBA B	PRUEBA A	PRUEBA B				% repetibilidad	% reproducibilidad	%r&R
750	0,01308	0,01317	0,01308	0,01257	0,00009	0,00051	0,03142	4,16716	3,42127	5,39169
				RANGO	0,000300					
				X1	0,013125		%r&R	si <10% El sistema es aceptable		
				X2	0,012825			Si es 10%<Se necesita mejora		
				XD	0,000300			Nota: La tolerancia fue especificada según requerimientos de la norma (95%)		
				d2	1,18					
				Repetibilidad	0,001309					
				D2	1,41					
				Reproducibilidad	0,001075					
	OPERADOR 1		OPERADOR 2		RANGO 1	RANGO 2	Tolerancia	TOTAL		
DISTANCIA (M)	PRUEBA A	PRUEBA B	PRUEBA A	PRUEBA B				% repetibilidad	% reproducibilidad	%r&R
1000	0,02865	0,02783	0,02865	0,02977	0,00082	0,00112	0,03142	6,73691	5,63692	8,78413
				RANGO	0,000970					
				X1	0,028240		%r&R	si <10% El sistema es aceptable		
				X2	0,029210			Si es 10%<Se necesita mejora		
				XD	0,000970			Nota: La tolerancia fue especificada según requerimientos de la norma (95%)		
				d2	1,18					
				Repetibilidad	0,002117					
				D2	1,41					
				Reproducibilidad	0,001771					

Tabla 5. Repetibilidad y reproducibilidad en pines de acero inoxidable AISI 304.

ALUMINIO										
DISTANCIA (M)	OPERADOR 1		OPERADOR 2		RANGO 1	RANGO 2	Tolerancia	TOTAL		
	PRUEBA A	PRUEBA B	PRUEBA A	PRUEBA B				% repetibilidad	% reproducibilidad	%r&R
250	0,01563	0,01419	0,01563	0,01533	0,00144	0,00030	0,03142	9,66781	3,21890	10,18960
				RANGO		0,000870				
				X1		0,014910	%r&R	si <10% El sistema es aceptable		
				X2		0,015480	Si es 10%<Se necesita mejora			
				XD		0,000570	Nota: La tolerancia fue especificada según requerimientos de la norma (95%)			
				d2		1,18				
				Repetibilidad		0,003038				
				D2		1,41				
				Reproducibilidad		0,001011				
DISTANCIA (M)	OPERADOR 1		OPERADOR 2		RANGO 1	RANGO 2	Tolerancia	TOTAL		
	PRUEBA A	PRUEBA B	PRUEBA A	PRUEBA B				% repetibilidad	% reproducibilidad	%r&R
750	0,02630	0,02549	0,02549	0,02499	0,00081	0,00050	0,03142	9,09830	5,22883	10,49380
				RANGO		0,000655				
				X1		0,025895	%r&R	si <10% El sistema es aceptable		
				X2		0,025240	Si es 10%<Se necesita mejora			
				XD		0,000655	Nota: La tolerancia fue especificada según requerimientos de la norma (95%)			
				d2		1,18				
				Repetibilidad		0,002859				
				D2		1,41				
				Reproducibilidad		0,001643				
DISTANCIA (M)	OPERADOR 1		OPERADOR 2		RANGO 1	RANGO 2	Tolerancia	TOTAL		
	PRUEBA A	PRUEBA B	PRUEBA A	PRUEBA B				% repetibilidad	% reproducibilidad	%r&R
1000	0,03328	0,03301	0,03328	0,03271	0,00027	0,00057	0,03142	5,83403	1,46452	6,01504
				RANGO		0,000420				
				X1		0,033145	%r&R	si <10% El sistema es aceptable		
				X2		0,032995	Si es 10%<Se necesita mejora			
				XD		0,000150	Nota: La tolerancia fue especificada según requerimientos de la norma (95%)			
				d2		1,18				
				Repetibilidad		0,001833				
				D2		1,41				
				Reproducibilidad		0,000460				

Tabla 6. Repetibilidad y reproducibilidad en pines de aluminio.

Como se indica en las tablas los valores presentados para los diferentes materiales, se encuentran en los rangos deseados ($R\&R < 10\%$) lo que indica que los datos arrojados en los ensayos presentan mínimas diferencias o variaciones entre ellos. Adicional a esto, proceder a una comparación inter-laboratorios es poco razonable debido a que las condiciones del ensayo variaron en cuanto a las especificaciones de la norma, con relación al tipo de material.

5. CONCLUSIONES

- La repetibilidad y reproducibilidad arrojan valores menores al 10%, lo que indica que el tribómetro tipo Pin-on-Disk comprende parámetros confiables para la ejecución del ensayo, debido a que se encuentra dentro de un rango permisible.
- El tipo de material de los especímenes se cambió de acero AISI 52100 y alúmina por acero inoxidable 304 y aluminio debido a que su disponibilidad en el mercado nacionales limitado y los costos de importación son demasiado elevados.
- Según las pruebas de desgaste para el aluminio, se concluye en condiciones de velocidad 300 RPM, distancia lineal 750 metros, el volumen perdido en el pin es de 9,23 milímetros cúbicos.
- Según las pruebas de desgaste para el acero inoxidable AISI 304, se concluye en condiciones de velocidad 300 RPM, distancia lineal 750 metros, el volumen perdido en el pin es de 1,62 milímetros cúbicos.

6. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- Observaciones

El apoyo de la Universidad Pontificia Bolivariana y la disponibilidad de sus recursos, garantizó una ejecución exitosa del proyecto, que impulsa la investigación.

El cronograma enunciado se vio alterado debido a la tercerización de procesos de maquinado de los componentes mecánicos y prórroga en la entrega de instrumentación.

En el caso del diseño de un tribómetro pin-on-disk, se identificó que la pieza de mayor criticidad en el sistema motriz, en la parte del acople, porque, si presenta ajuste de holgura en lugar de interferencia, experimenta exceso de vibraciones.

La construcción del tribómetro pin-on-disk es en acero inoxidable AISI 304 ya que garantiza una alta resistencia a la oxidación, durabilidad y fino acabado superficial.

- Recomendación

Para mejorar ciertos aspectos de ensayo como: instrumentación es esencial disponer de un mayor capital destinado a invertir en incrementar la precisión y exactitud del ensayo.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. United States: ASTM, 2010. (ASTM G99–05).
- [2]. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Practice for Dealing with Outlying Observations. United States: ASTM, 2008. (E178: 2008).
- [3]. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Terminology Relating to Wear and Erosion. United States: ASTM, 2012. (ASTM G40)
- [4]. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Guide for Calculating and Reporting Measures of Precision Using Data from Interlaboratory Wear and Erosion Test. United States: ASTM, 2007. (ASTM G117).
- [5] UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA. Desgaste de Materiales [en línea]. <<http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/desgaste.pdf>> [citado el 1 de abril de 2013].
- [6]. BAEZ PIMIENTO, Sandro. Evaluación del desgaste por fricción de algunos metales ferrosos y no ferrosos con una máquina de cilindros cruzados. Bucaramanga, 2002. Trabajo de grado (Ingeniero metalúrgico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-químicas. Escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de los materiales.
- [7]. MATERIAL PROPERTY DATA. 304 Stainless Steel [en línea]. <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=abc4415b0f8b490387e3c922237098da>> [citado el 08 de septiembre de 2013].

8. ANEXOS

Anexo 1. Cronograma de actividades

Anexo 2. Resumen Norma ASTM G99-05 *Método estándar para pruebas de desgaste con un aparato Pin-on-disk.*

Anexo 3. Planos diseño estructural Tribómetro Pin-on-Disk