



Diseño y desarrollo de máquina de desgaste tipo *pin on ring*

Design and development of *pin on ring* type wearing machine

Jesús Ángel Campuzano García , Mariano Braulio-Sánchez , José Eli Eduardo González-Durán ,
José David Díaz-Medina , Pedro Durán-Reséndiz 

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato, Educación Superior 2000, Benito Juárez, 38980
Uriangato, Guanajuato, México

Autor de correspondencia: Jesús Ángel Campuzano García, Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato, Educación Superior 2000, Benito Juárez, 38980 Uriangato, Guanajuato, México. E-mail: jesus2acg@gmail.com.
ORCID:

Recibido: 17 de septiembre del 2021

Aceptado: 18 de enero del 2022

Publicado: 10 de febrero del 2022

Resumen. - Se desarrolló una máquina de desgaste del tipo Pin On Ring, bajo la norma ASTM G99-17 (ASTM Int', 2018), que permite realizar ensayos mediante un procedimiento de laboratorio para determinar el desgaste de materiales. Las máquinas de desgaste tipo Pin On Ring requieren realizar pruebas a la pieza bajo ciertas condiciones como lo son: la velocidad de giro y la carga aplicada. En la máquina presentada se pueden manipular y controlar la velocidad de giro y la carga aplicada, gracias a que se incorporan los elementos necesarios para variar la velocidad del giro del motor, esto se logra a través de un variador de frecuencia, además se desarrolló un mecanismo de aplicación de carga que permite aplicar la carga deseada durante el ensayo, esta carga es medida gracias a una celda de carga que cuantifica la cantidad aplicada durante la prueba. Durante el ensayo se genera un incremento de temperatura entre las superficies, el cual se puede medir y observar su comportamiento en el panel de control de la máquina de desgaste mediante un sensor tipo k. Es posible obtener la tasa de desgaste de los materiales en contacto de manera automática, debido a que la instrumentación incorporada en la máquina permite calcular la distancia recorrida, con lo que se obtiene una idea del comportamiento del material bajo ciertas condiciones de trabajo.

Palabras clave: Pin on ring; Ensayos de desgaste; Tasa de desgaste.

Abstract. - A Pin on Ring type wear machine was developed, under the ASTM G99-17 (ASTM Int', 2018) standard, which allows tests to be carried out using a laboratory procedure to determine the wear of materials. This machine allows tests to be carried out using a laboratory procedure to determine the wear of materials. Pin On Ring type wear machines require testing the part under certain conditions such as: rotation speed and applied load. In the presented machine, the speed of rotation and the applied load can be manipulated and controlled, thanks to the incorporation of the necessary elements to vary the speed of the motor rotation, this is achieved through a frequency variator, it was also developed a load application mechanism that allows applying the desired load during the test, this load is measured thanks to a load cell that measures the amount applied during the test. During the test, an increase in temperature is generated between the surfaces, which can be measured and its behavior observed on the control panel of the wear machine by means of a type k sensor. It is possible to obtain the wear rate of the materials in contact automatically, because the instrumentation incorporated in the machine allows calculating the distance traveled, thereby obtaining an idea of the behavior of the material under certain working conditions.

Keywords: Pin on ring; Wear tests; Wear rate.



1. Introducción

Los ensayos de desgaste por deslizamiento permiten obtener información sobre el comportamiento tribológico de los materiales con el fin de diseñar, sintetizar y emplear el material que mejor satisfaga las necesidades de la aplicación en la cual será usado. Para esto es necesario analizar la respuesta del material bajo ciertas condiciones de carga, velocidad y distancia de deslizamiento a fin, de conocer la funcionalidad del material para determinada aplicación y así obtener las mejores propiedades tribológicas específicas deseadas [1].

Un tribómetro es el equipo mediante el cual es posible determinar la resistencia al desgaste de un material cuando se encuentra en contacto con otro y entre ellos existe movimiento relativo, en un determinado tiempo, bajo diferentes condiciones de carga, velocidad y distancia de deslizamiento.

Mediante un tribómetro es posible llevar a cabo distintas pruebas, por lo que los fenómenos de fricción, desgaste y lubricación son objeto de estudio de la tribología [2].

Una de las principales causas que limitan el uso de estos equipos, es su elevado costo, como prueba de ello se realizó la cotización de un Tribómetro tipo Pin-on-Disk (perno en disco) de la marca Anton Paar [3], cuyo costo asciende a \$1,200,000.00 MXN más IVA, cabe mencionar que se realizó la cotización de este tipo de tribómetro, porque los ensayos que se realizan con este equipo, también se rigen bajo la norma ASTM G99. Por lo tanto, si se compara con el costo de la máquina desarrollada se obtiene un ahorro del 78% aproximadamente, tal como se muestra el desglose de los costos en la Tabla 1.

Otro aspecto a considerar son las normas que rigen los ensayos y el tipo de muestras para las

que fueron diseñados, ya que, también corresponden a algunas de las limitaciones de los tribómetros. Por ejemplo, la Máquina de Disco sobre bloque ASTM G-77, en la cual, este método de ensayo cubre el procedimiento necesario para determinar la resistencia al desgaste ocurrido por el deslizamiento en diversos materiales.

Tabla 1. Cotización de la máquina *Pin on Ring* desarrollada. Fuente: Elaboración propia.

PRODUCTO O SERVICIO	No.	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Motor Eléctrico	1	\$19800	\$19800
Variador de frecuencia	1	\$20000	\$20000
Perfil Bosch 45 x 45 mm	2	\$5224	\$10448
Perfil Bosch 45 x 90 mm	1	\$4800	\$9600
Mano de obra	384 hrs	\$500	\$192000
Celda de carga + Amplificador Hx711	1	\$220	\$220
Broquero para taladro de banco	1	\$1250	\$1250
Encoder rotatorio incremental	1	\$420	\$420
Termopar tipo K+ módulo Max6675	1	\$260	\$260
Varillas roscadas	2	\$235	\$470
Tornillos y tuercas	40	\$10	\$400
Escuadras	16	\$20	\$320
Guías de deslizamiento	4	\$110	\$440
Total			\$255628

Esta prueba utiliza un equipo de ensayo del tipo bloque sobre anillo para clasificar los pares de materiales de acuerdo con sus características de desgaste por deslizamiento. Una muestra colocada sobre un bloque estacionario es presionada con una fuerza constante contra un anillo giratorio a 90° del eje del anillo de giro. La fricción presente entre las superficies de deslizamiento bloque y anillo, resulta en la pérdida de material (volumen en milímetros



cúbicos), tanto para el anillo y el bloque. Los materiales con mayor resistencia al desgaste tendrán menor pérdida de material [4].

Por esta razón se vuelve complicado conseguir un equipo que se ajuste a ciertas necesidades específicas y en la mayoría de los casos al contar con un equipo de fabricación extranjera, no garantiza la ausencia de fallas, y tampoco que se cuenten con refacciones disponibles o personal capacitado para solucionar el problema en un corto tiempo [1].

Una de las alternativas a esta problemática es el diseño y fabricación mediante el uso de recursos propios. González Hernández et al. [2], diseñaron una máquina que consiste en una estructura, un mecanismo de fuerza y otro de movimiento. Con el desarrollo de esta máquina se permite estudiar las aplicaciones de la tribología para el desarrollo de nuevos materiales. En el trabajo realizado por Niebles Núñez et al. [5] diseñaron y construyeron una máquina de desgaste abrasivo basado en la norma ASTM G65, formulando cada una de las especificaciones requeridas para el diseño funcional. Las alternativas de diseño fueron evaluadas por el método de criterios ponderados permitiendo así establecer una alternativa de diseño conceptual y funcional.

Los ensayos tribológicos pueden realizarse en una gran variedad de formas las cuales no solo depende del par de materiales que se someten a estudio, sino que también dependen en gran medida del sistema mecánico en las que serán utilizados.

Es conveniente clasificar el comportamiento tribológico de los materiales dependiendo el grado de realismo, las propiedades del material, las condiciones reales de operación, tiempo y costo ya que para algunas pruebas o en algunos ensayos tribológicos la simulación no es una prioridad [1].

Los resultados de los ensayos tribológicos y los análisis de superficies ayudan a estimar y/o predecir el rendimiento tribológico de los materiales basados en diversos factores que influyen en ellos como la fricción, el desgaste, mecanismos de falla, la cinética de películas de transferencia, etc.

Para realizar las pruebas tribológicas mencionadas existen normas que se deben seguir, para que el ensayo tenga el alcance deseado y que, garantice su repetitividad en cualquier parte del mundo. La construcción de la máquina de desgaste de tipo *Pin On Ring* presentada en este trabajo se realizó bajo la norma ASTM G99-17 [2]. Esta norma establece que la cantidad de desgaste en cualquier sistema dependerá en general de la cantidad de factores del sistema, tales como la carga aplicada, las características de la máquina, la velocidad de deslizamiento, la distancia de deslizamiento, el entorno y las propiedades del material.

La norma ASTM G99-17 se ha utilizado en diversas investigaciones por ejemplo Asawthnarayan [6], para estudiar el efecto de variar la presión de abrasión en materiales compuestos. En el trabajo de Dairo et al. [7], analizan los materiales de ruedas y rieles que están expuestos a una gran cantidad de factores que afectan su desempeño, donde las pruebas de desgaste se llevaron a cabo utilizando un tribómetro de clavija sobre disco.

Otros ejemplos de aplicación es con Badheka [8], donde se estudió el comportamiento de desgaste de compuestos de superficie de aluminio reforzado con carburo de Boro. Una aplicación más es el de Heuberger, donde se investigó la viabilidad de utilizar poli-éter-éter-cetona (PEEK) en lugar de CoCrMo para los cóndilos femorales de las prótesis de rodilla [9].



Las aplicaciones de la norma ASTM G99-17 no solo se limita a una rama en específico, por ejemplo, los resultados de Maculotti [10], muestran que los métodos topográficos mejoran la confiabilidad de la caracterización *Pin On Disk*.

En el trabajo de Shahroozi [11], se estudiaron la microestructura, la evolución de fase, la microdureza y la resistencia al desgaste de las capas de revestimiento mediante diferentes exámenes.

Otra aplicación es el trabajo de Arunkumar [12], donde realizó una prueba de desgaste por deslizamiento en seco utilizando un aparato de clavija sobre disco. Se siguió la norma ASTM G99 para el rendimiento óptimo de la prueba *Pin On Disk*.

Un trabajo de investigación que tuvo como objetivo la investigación experimental de las propiedades de corrosión y desgaste como resultado de un porcentaje variado de refuerzo según ASTM G99 para la prueba de desgaste por deslizamiento es el de Ravikumar [13].

Otro trabajo en el que se empleó la norma utilizada en el desarrollo de este trabajo fue el de Singh [14], donde las pruebas tribológicas se realizaron utilizando una configuración de pin en disco de acuerdo con la norma ASTM G99-17.

Por otra parte, Khuengpukheiw [15], estudió las propiedades mecánicas y los comportamientos de desgaste de los recubrimientos de NiSiCrFeB, WC-Co / NiSiCrFeB y WC-Co sobre acero AISI 1095.

En la investigación de Heuberger [16]. Las pruebas de desgaste de pasador sobre disco se realizaron utilizando pasadores hechos de UHMWPE articulados contra discos hechos de una aleación de CoCrMo. Las pruebas de

desgaste se realizaron utilizando dos fluidos de prueba diferentes: un líquido de prueba estándar utilizado para pruebas de simulador de cadera y un líquido sinovial sintético que contiene ácido hialurónico, albúmina, inmunoglobulina G, la lecitina fosfolípida y, además, azida sódica para combatir el crecimiento bacteriano.

En el trabajo de Thirugnanasambantham [17], se llevó a cabo el comportamiento de fricción y desgaste de las superficies de trabajo en contacto para examinar su tendencia durante el uso de una lubricación alternativa en el aceite mineral.

Waddad [18] presenta una estrategia multiescala para la simulación termo mecánica de sistemas de fricción, como frenos.

Por otra parte, los experimentos de *Pin On Disc* (PoD) se utilizan ampliamente para cuantificar y clasificar el desgaste de diferentes pares de materiales para cojinetes de implantes protésicos de cadera, tal es el caso de Borjali [19], donde se realizó con este fin.

En el artículo de Alvarez-Vera [20], se estudió el efecto del comportamiento tribológico de los polvos de relleno metálico a base de Ni con diferentes cantidades de nanopartículas de TiN o AlTiN. Se utilizó un tribómetro de clavija sobre disco para evaluar el comportamiento de desgaste y fricción del revestimiento duro en condiciones de revestimiento seco.

Un estudio realizado donde cuyo propósito ha sido investigar los efectos de los recubrimientos funcionales de TiAlN en experimentos criotribológicos *Pin On Disc* fue el de Rizzo [21]. En la actualidad, la introducción de nuevas tecnologías de mecanizado para el arranque de viruta, tanto a alta velocidad como en condiciones criogénicas, plantea nuevos retos y abre nuevos horizontes a la investigación.



Como se puede observar las aplicaciones de la norma ASTM G99 y el uso de los tribómetros Pin-on-Disk son amplios y para diferentes aplicaciones.

Es importante mencionar que el método de prueba *Pin On Ring* no intenta duplicar todas las condiciones que se pueden experimentar en servicio, por lo que no hay garantía de que la prueba predecirá la tasa de desgaste de un material dado en condiciones diferentes a las de la prueba que pueden experimentar en servicio.

El objetivo del presente proyecto es diseñar y fabricar una máquina para determinar el comportamiento al desgaste por deslizamiento de distintos materiales aplicados en la industria automotriz.

Un ejemplo de investigación en el ámbito automotriz es el Federici [22], donde argumentan que durante la conducción sin frenos, puede producirse algún contacto no deseado entre las pastillas de freno y los discos giratorios, lo que induce un uso ineficiente de combustible y una contaminación ambiental adicional. Este artículo aborda el comportamiento de fricción de 5 materiales comerciales de fricción NAO y de bajo contenido de metal que se deslizan en seco contra un disco de contracara de hierro fundido, bajo presiones de contacto bajas, típicas de la conducción sin freno.

De igual manera, el trabajo de Pacana [23], es un trabajo de investigación orientado a la industria automotriz, en el cual se desarrolló un método que permita presentar una combinación original de métodos que permitan determinar con precisión las principales causas de los problemas en los sistemas automotrices. El método se probó para detectar incompatibilidades de productos utilizados en la industria automotriz. El problema fue una grieta en los discos de conexión del pasador en el engranaje del motor al rectificar.

Después de utilizar el método combinado propuesto, se concluyó que la principal causa de este problema era el mal asentamiento de la muela sobre el producto [23].

La máquina de desgaste desarrollada es de bajo presupuesto en comparación con las existentes en el mercado, esto se debe en gran medida a que en la instrumentación de la máquina se incorporó el uso de *LabView* y *Arduino*. Entonces, con base a estas plataformas se eligieron los sensores capaces de cumplir con el objetivo de la máquina, esto con el fin de demostrar que con componentes de bajo costo se pueden realizar cosas interesantes y funcionales.

Algo que distingue la máquina desarrollada con lo existente en la literatura y/o mercado es su mecanismo de aplicación de carga, el cual permite tener incrementos de carga muy pequeños, simplemente girando las varillas roscadas que se encuentran en el mecanismo y en la mayoría de las otras máquinas la aplicación de la carga se realiza con la aplicación de pesas de cantidades comerciales, lo que hace más complicado aplicar una cantidad específica de carga, por ejemplo, hablando en términos de carga aplicada, comparando las cargas permisibles en otras máquinas ya desarrolladas y la máquina desarrollada en este trabajo se obtiene que, en el trabajo de Imani [24], se usaron cargas de 2.5 hasta 10 N, intervalo que cubre la máquina desarrollada en este trabajo por la celda de carga seleccionada.

De igual manera en el trabajo de Singh [25] donde la carga se elevó hasta 20 N, utilizando la misma norma ASTM G99-17 para estudiar el comportamiento de desgaste por deslizamiento en seco de un recubrimiento.



2. Metodología

La metodología empleada en el presente trabajo consta de los pasos mostrados en la Figura 1.



Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología empleada en el desarrollo de la máquina. Fuente: Elaboración propia.

2.1 Diseño y desarrollo

Como primer paso se determinó el tipo de ensayos de desgaste que se quieren realizar, una vez definidos se investigó que norma rige estos tipos de ensayos y también las posibles máquinas de desgaste que cumplen con dichas especificaciones, por lo que se optó por el diseño y construcción de una máquina de desgaste del tipo *Pin on Ring*, bajo la norma ASTM G99-17 [26].

El segundo paso fue realizar una investigación documental en la que se estudiaron las variables que influyen directamente en la realización del ensayo, por lo que estas se deben de considerar

en el diseño y desarrollo de la máquina. Además, se estudiaron los tipos de máquinas de desgaste *Pin on Ring* existentes en el mercado y se analizó su funcionamiento.

Del análisis realizado se observó que algunas personas, instituciones educativas y/o compañías optan por desarrollar máquinas de desgaste *Pin On Disc* que se rige bajo la norma ASTM G99, pero cambia la configuración del perno sobre disco. Por ejemplo, David Teodoro Grau diseñó y desarrollo una máquina de desgaste *Pin On Disc para la UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA*, en la cual utilizo como unidad de control un Arduino Leonardo, para el movimiento tanto del *disk*, como de la mesa, uso dos tipos de motores, un motor a pasos y un servomotor, este último encargado de hacer girar el pin a altas revoluciones para someter a la probeta a las condiciones tribológicas adecuadas, este servomotor está controlado por un driver Lexium 28, que se encarga de controlar todas las señales del motor, pulsos, velocidad, par y de mostrar a través de un software específico [27].

El motor paso a paso se encarga de desplazar la mesa de trabajo a través de un husillo de bolas, este le permite girar a velocidades muy lentas, controladas y de forma precisa para que el desplazamiento de la mesa sea lo más preciso y silencioso posible. El motor paso a paso está controlado mediante un driver que recibe señales de Arduino y le da la tensión necesaria [27]. Además, fabricó en acero un soporte para sujetar el pin que ejerce la fuerza y para medir la aplicación de carga de igual manera utilizó una celda de carga [27].

Otro ejemplo correspondiente a los análisis de desgaste con discos *Pin On Disc* es el de Presin [28], donde estudiaron las propiedades de desgaste sobre un material compuesto de polímero reforzado.



Del estudio del análisis de las máquinas reportadas en la literatura y de acuerdo a la norma ASTM G99-17, se procedió a la selección de los componentes eléctricos, electrónicos y mecánicos para el desarrollo de la máquina.

En la Tabla 2 se presentan las especificaciones del motor eléctrico de CA trifásico, de la marca ABB, modelo m2va80c-4, que se seleccionó para poder variar la velocidad de giro sin

comprometer el torque. Dentro de las características se mencionan los tipos de conexión (Conn) que se pueden realizar, la frecuencia (Freq) y el voltaje (Voltage) que maneja el motor dependiendo de la conexión realizada, a su vez la potencia (Power) y velocidad (Speed) que genera el motor, la corriente máxima (Current) y el torque (Torque) que genera.

Tabla 2. Especificaciones del motor eléctrico. Fuente: [29].

Conn	Freq (Hz)	Voltage (V)	Potencia (kW)	Velocidad (r/min)	Corriente (A)	Torque (N·m)
Y	60	440-480	0.90	1690	1.90	5.08
D	60	250-280	0.90	1690	3.30	5.08

Para controlar la velocidad del motor eléctrico se determinó utilizar un variador de velocidad, capaz de cubrir la velocidad máxima deseada y poder trabajar con la cantidad de corriente demandada por el motor, el variador de velocidad es el Variador de Velocidad Mitsubishi Electric FR-E720-050.

Una vez seleccionados los componentes eléctricos que ayudarán a cumplir con las especificaciones deseadas, se realizó el modelado mediante el uso de *SolidWorks* [30], que consiste en el desarrollo de una base o mesa para la máquina de desgaste, usando perfil Bosch. Durante su desarrollo se fabricaron escuadras a la medida del perfil y se usaron tornillos cabeza de gota, lo que generó un ahorro económico considerable si se compara con los costos de las escuadras y los tornillos para el perfil, realizando la misma función de sujeción y soporte.

En busca de garantizar la seguridad del usuario de la máquina de desgaste se diseñó una protección con perfil Bosch y acrílico que permita tener visibilidad hacia la parte interior, con el fin de poder monitorear el ensayo que se

esté realizando, además de generar un ambiente seguro alrededor de la máquina, cabe mencionar que esta base es removible.

El motor previamente mencionado se encuentra anclado a la mesa, para garantizar una correcta sujeción, además cuenta con un material entre la base y motor que ayuda a la absorción de vibraciones generadas por el motor. Para poder completar la máquina de desgaste es necesario el uso de un disco metálico con determinadas especificaciones de dureza, con el fin de que este sea el elemento que desgaste al Pin muestra del material que se desea ensayar.

La contraparte consiste en un disco de acero AISI D2 tratado térmicamente cuya composición química en peso: 1.5% C, 0.45% Mn, 0.3% Si, 12% Cr, 0.9% Mo, 0.03% P, 0.03 % S, 1.0% V, 83.79% Fe [31], la dureza del disco para desgaste se determinó mediante el uso de un durómetro Mitutoyo Mod MIC-963-210-100 obteniendo un valor promedio de 95 HRC, del cual algunas características se indican en la Tabla 3.

El acero AISI D2 tiene un gran uso en la industria manufacturera especialmente en la fabricación de



matrices debido a su alta dureza, resistencia y propiedades de desgaste [32], otras características y aplicaciones son mencionadas en la Tabla 3.

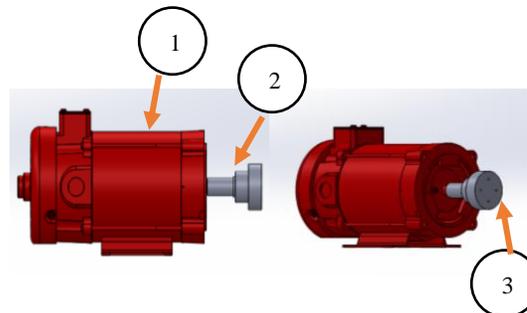
La dureza alcanzada se consideró como suficiente, debido a que en el Centro de Mecánica del Instituto Nacional de Tecnología Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora diseñaron y construyeron una máquina *Pin On Disc* bajo criterios de la norma ASTM G99, con el fin de la determinación de coeficientes de fricción y ejemplos de aplicación, en la que utilizaron un disco de acero SAE H13 templado y revenido a 45HRC, material empleado con esa dureza en la fabricación de matrices de forja, y pines mecanizados en tres aceros. Dicha máquina fue aplicada con éxito para determinar coeficientes de fricción, que fueron usados en la simulación de procesos de forjado en caliente [33].

Tabla 3. Material, características y aplicaciones, del material usado en el disco de desgaste. Fuente: [34].

Material	Características	Aplicaciones
Acero D2	Acero al alto carbón y alto cromo. Dimensionalmente estable de excelente rendimiento al corte y resistencia al desgaste. Especialmente apto para temple al aire.	Matrices y Punzones Herramientas de Roscado Partes de Desgaste Cuchillas, Slitters y Cizallas

La manera de acoplar el disco al eje del motor eléctrico consta del desarrollo de un cople, maquinado con las dimensiones adecuadas. Para garantizar el acoplamiento y la correcta rotación del disco para el ensayo debido a que la carga aplicada durante el ensayo de desgaste será directamente en el eje del motor.

En la Figura 2 se presenta el diseño CAD que muestra la ubicación de los tres elementos previamente mencionados.

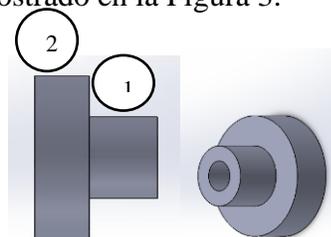


Descripción:

1. Motor eléctrico
2. Cople
3. Disco

Figura 2. Acoplamiento de los elementos de la máquina de desgaste. Fuente: Elaboración propia.

Para el proceso de fabricación del cople se utilizó una barra de aluminio de un diámetro de 65 mm, esta barra de aluminio se maquinó en un torno Pinacho ST 285 X 1500 con el que se obtuvo el modelo mostrado en la Figura 3.



Descripción:

1. Primera etapa de Maquinado
2. Segunda etapa de maquinado.

Figura 3. Diseño en CAD del cople motor-disco. Fuente: Elaboración propia.

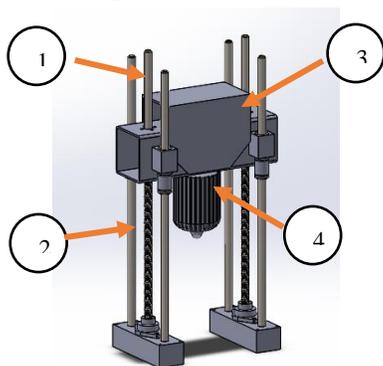
El modelo CAD consta de dos etapas de maquinado en torno, como se observa en la Figura 3, por lo que la generación del código también se dividió en etapas. Por motivos de simplicidad en el proceso de maquinado, se inicia con la parte donde se requiere de una mayor



remoción de material, en la Figura 4 esta sección se enumera con el número 1.

Por otro lado, se requiere sujetar el Pin muestra, por lo que se decidió usar un broquero de 1/32" a 5/8" con Árbol Cónico para Taladro de Banco Morse # 3 Montaje JT3, ya que este garantiza la sujeción de la muestra debido a que permite la apertura y cierre necesarios de acuerdo a las dimensiones de la muestra, este elemento se puede identificar en la Figura 4.

Para el mecanismo de aplicación de carga entre el Pin muestra y el disco, se cuenta con unos tornillos, que hacen la función de un tornillo sinfín para subir y bajar la base que sujeta a la porta muestra y a su vez aplicar la carga sobre el disco, además de que en este mecanismo se incorporan sensores que ayudan a la instrumentación de la máquina, que son: un sensor para medir la carga aplicada, así como un termopar tipo k que permite medir la temperatura que se tiene entre el disco y la muestra, al momento de realizar el ensayo. Estos elementos se visualizan en la Figura 4.

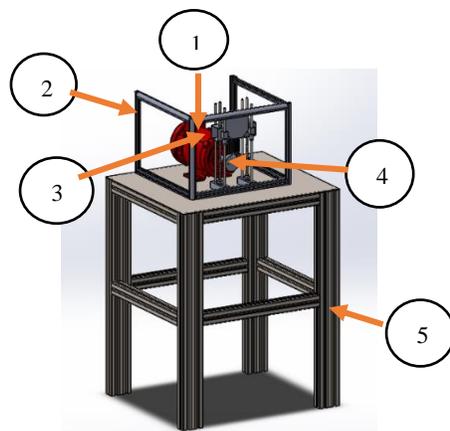


Descripción:

1. Varilla roscada de 1/2"
2. Guías de deslizamiento
3. Base para la celda de carga
4. Broquero de 1/32" a 5/8" con Árbol Cónico para Taladro de Banco Morse # 3 Montaje JT3

Figura 4. Mecanismo para la aplicación de carga y medición de la misma. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5, se muestra el modelado en CAD, en el que se incorporan todos los elementos mostrados previamente.



Descripción:

1. Motor eléctrico
2. Protección
3. Mecanismo de la aplicación de carga
4. Disco y cople

Figura 5. Modelado CAD de la máquina de desgaste. Fuente: Elaboración propia.

2.2 Instrumentación

Para la instrumentación de la máquina de desgaste se optó por usar el Arduino Genuino Uno, con base a esta plataforma se eligieron los sensores y se desarrolló la programación, así como la conexión de los mismos.

La máquina requiere de un sensor capaz de medir la carga aplicada y para esta aplicación se eligió una celda de carga de 20kg con Amplificador Hx711, con una resolución de $1 \pm 0.15 \text{mv/v}$.

Por otra parte, es necesario conocer la temperatura que se tiene entre las superficies en contacto, esto se logra gracias al uso de un termopar del tipo K y un Módulo Max6675.

Para medir la velocidad de giro del motor se cuenta con un variador de velocidad, el cual



permite configurar la frecuencia con la que se desea opere el motor y con base a esta, configurar las r/min deseadas durante el ensayo de desgaste. Esto se logra debido a la implementación de un encoder con su sensor infrarrojo ubicado en el disco de desgaste, obteniendo así la velocidad a la que gira el disco y por ende el eje del motor.

El panel de control donde se visualizan los valores medidos por los sensores se desarrolló en *LabView*, en el que se muestra la velocidad a la que está girando el motor, la carga aplicada y la temperatura en las superficies en contacto.

Para poder establecer comunicación entre ambas plataformas se utilizaron las librerías *LVIFA_Base*.

Es necesario proceder a realizar la conexión de la celda de carga, amplificador y Arduino, como se muestra en la Figura 6.

Para que las señales generadas por la celda de carga puedan ser leídas por el Arduino, se requiere del uso del amplificador Hx711, gracias a que este amplifica la señal hasta el rango de valores necesarios para que el Arduino sea capaz de leerlo y sea posible tenerlo visible en el panel de control de la máquina de desgaste, este circuito permite saber la carga aplicada durante el ensayo.

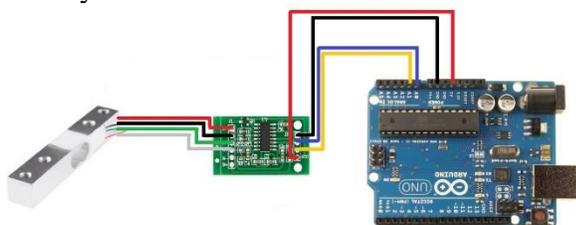


Figura 6. Conexión, celda de carga, amplificador Hx711 y Arduino. Fuente: Elaboración propia.

En el panel de control se puede visualizar la temperatura que se tiene entre las superficies en contacto, esto es posible gracias al uso de un

termopar compatible con Arduino y al módulo Max6675, en el cual se conectan las terminales del termopar a la entrada del módulo y a la salida de este se realiza la conexión a los pines del Arduino, como se ve en la Figura 7.

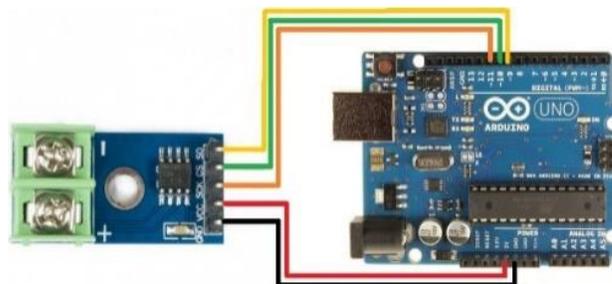


Figura 7. Conexión del Módulo Max6675 con el Arduino. Fuente: Elaboración propia.

Dentro de la etapa de instrumentación se generó un programa en Arduino donde, es necesario descargar y llamar la librería “max6675.h” la cual es encargada de interpretar los datos leídos por el módulo, seguido de esto se definen las variables necesarias para el funcionamiento del programa.

Dentro del *Void setup* se inicia el puerto serial 9600 en el cual mostrara los datos obtenidos y ayudara para la comunicación serial con *LabView*, además se configuran los pines que se usaran en el Arduino.

Posteriormente se generó el programa en *LabView*, en el cual, se agregaron en el panel frontal 3 gráficos para la representación de las variables de interés, como las r/min , temperatura y la carga aplicada, también se encuentra el botón de “Stop” para detener el programa y el selector del puerto “COM” al que pertenece el microcontrolador a utilizar.

De manera paralela, al desarrollar la programación se generó el panel de control mostrado en la Figura 8, en el cual se cuenta con los indicadores correspondientes para cada sensor, de esta manera se satisface el monitoreo



de las variables de interés durante un ensayo de desgaste.

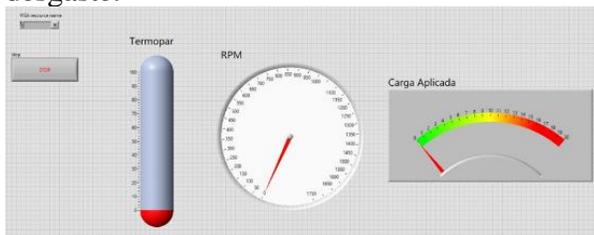


Figura 8. Panel de Control desarrollado en *LabView*.
Fuente: Elaboración propia.

2.3 Integración de la Máquina

Ahora en la máquina se integran todos los elementos mencionados previamente, comenzando por los elementos estructurales, como lo son la base de la máquina y la protección para el usuario, adicionalmente se incorporan en un panel de control físico, los elementos eléctricos y/o electrónicos, para poder encender el motor eléctrico. Al ser un motor trifásico, se requiere del uso de 3 pastillas ubicadas dentro de un centro de carga, cada una de estas pastillas controla una fase del motor.

Del centro de carga sale un cable con una conexión trifásica que debe alimentarse a 250-280 V, debido a que el motor está configurado en D (delta), especificaciones mostradas en la Tabla 1.

Para poder integrar y encender el variador de velocidad se debe de realizar la conexión pertinente entre el variador de velocidad y el motor eléctrico, de igual manera se debe agregar una clavija que permita tomar la tierra física, ya que, es necesaria para poder encender el variador de velocidad.

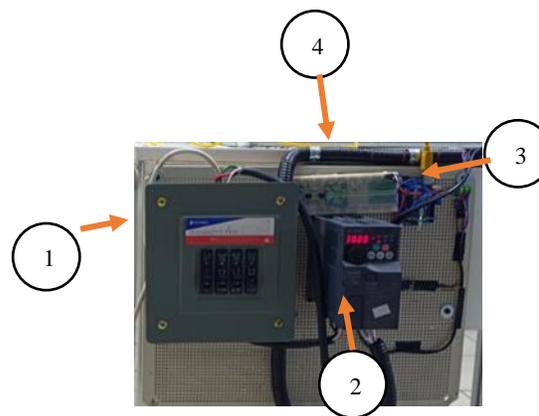
En el mecanismo de aplicación de carga se agregan sensores como la celda de carga y el termopar, posteriormente se instala el disco sobre el eje del motor y se coloca el encoder encargado

de realizar la medición de la velocidad a la que gira el motor.

Dentro del panel de control físico desarrollado se encuentra un Arduino Genuino Uno, en el cual, se realiza la conexión de los diversos sensores incorporados en la máquina.

Para poder alimentar los positivos (5V) de los sensores, así como, tomar las tierras (GND) necesarias para el funcionamiento de los sensores se incorporó un Protoboard para lograr ese fin.

El panel de control físico mencionado se muestra en la Figura 9.



Descripción:

1. Centro de Carga
2. Variador de frecuencia
3. Arduino Genuino Uno
4. Protoboard

Figura 9. Panel de Control Físico. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente con todos los elementos de la máquina integrados, se procede a realizar la calibración de los sensores, así como corroborar su correcto funcionamiento, realizando pruebas sencillas, como son girar el motor a una velocidad deseada y comprobar que la medición del encoder sea igual o cercana a esta, además se puede complementar con el uso de una muestra



cualquiera y ejercer un poco de fuerza sobre el disco de desgaste y observar si la celda de carga mide de manera correcta la fuerza aplicada. Una vez hecho esto, la maquina esta lista para realizar un ensayo de desgaste en forma, con base en la norma ASTM G99 [26].

3. Resultados y Discusiones

A lo largo del desarrollo de la máquina se hicieron cálculos y simulaciones sobre elementos de la máquina, tal es el caso de la celda de carga en la cual, su diseño y correcto funcionamiento se basa en el de una viga en voladizo, por lo tanto, al ejercer una fuerza en uno de sus extremos y al tener la contraparte fija o anclada, esta debería sufrir una deformación, así que, se realizó una simulación en software calculando los valores correspondientes para una deformación total, en la cual, se seleccionó y sometió a análisis una pieza de material Aluminio y agrego una condición de fija o anclada en una de sus caras, del mismo modo, en la otra cara se aplicó una carga de -392.4 N , ya que se consideró el momento en sentido horario, las magnitudes utilizadas y su punto de aplicación se muestran en la Figura 10.



Figura 10. Diagrama de cuerpo libre de las piezas sometidas a simulación. Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que la celda de carga tiene una capacidad máxima de 20 Kg , por lo que se decidió aplicar el doble de esta magnitud (40 Kg), que a su vez, convertida en “N” da la cantidad de 392.4 N , con el fin de analizar el elemento de la máquina en condiciones extremas

si se toma en cuenta su capacidad de carga, obteniendo el resultado mostrado en la Figura 11.

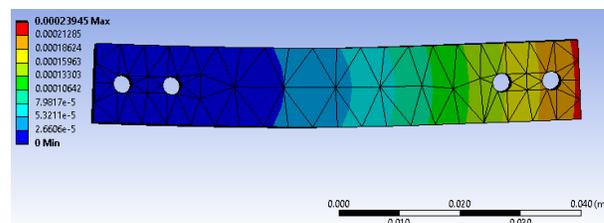


Figura 11. Deformación total de la celda de carga utilizada. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 11, la fuerza aplicada está dentro de un rango seguro; adicionalmente se realizó una simulación de la misma pieza, con las mismas magnitudes, pero con otra variable de interés, que es el esfuerzo equivalente de Von Mises, ilustrado en la Figura 12.

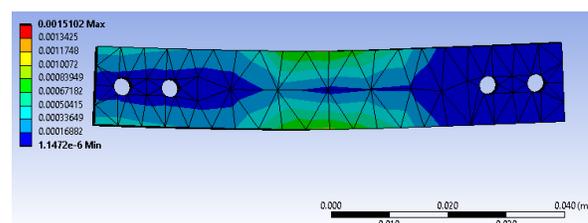


Figura 12. Esfuerzo Equivalente Von Mises de la celda de carga utilizada. Fuente: Elaboración propia.

Otro elemento que se somete a flexión debido a la naturaleza del diseño de la máquina es el eje del motor eléctrico, por lo tanto, se realizó la simulación correspondiente para calcular la deformación total en el eje del motor, en la que se consideró la misma magnitud de carga ilustrada en la Figura 10 (-392.4 N) y de igual manera con un extremo fijo, pero en este caso, lo que cambia con respecto al cálculo realizado para la celda de carga, es el material del cual se constituye el eje del motor, que en este caso es un acero AISI 1045 [35], el resultado se visualiza en la Figura 13.

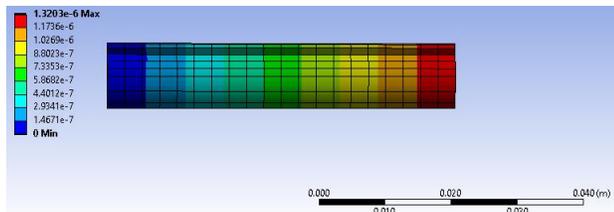


Figura 13. Deformación total del eje del motor ABB m2va80c-4. Fuente: Elaboración propia.

Llevando a cabo las etapas de diseño, desarrollo e instrumentación mencionadas en la metodología, se terminó la etapa de integración de la máquina, obteniendo como resultado un panel de control físico y el desarrollado en *LabView*, el resultado se visualiza en la Figura 14.



Figura 14. Máquina de desgaste *pin on ring* desarrollada. Fuente: Elaboración propia.

Se evaluó el funcionamiento de la máquina mediante la alimentación del motor eléctrico con un voltaje de 250-280 V y se configuró en el variador de velocidad una frecuencia de 30 Hz, alcanzando aproximadamente $1650 \text{ r}/\text{min}$ visibles en el panel de control en *LabView*, posteriormente se comenzó a aplicar gradualmente carga sobre el disco de desgaste mediante el mecanismo desarrollado, deteniéndose en un valor cercano a 12 kg, el resultado se visualizó en el panel de control en *LabView*, como reacción al giro del motor y la carga aplicada, el termopar tipo K realizó la

medición de temperatura cercana a 45°C en el Pin muestra utilizado, la prueba tuvo una duración de 15 minutos y se utilizó como Pin un taquete de madera para ajustes y puesta a punto de la máquina.

4. Conclusiones

4.1. Principales resultados

Se diseñó y fabricó una máquina de desgaste del tipo *Pin On Ring* con un sistema de control e instrumentación a través de un lenguaje de programación visual en *LabView*, con la implementación de *Solidworks* para el modelado CAD.

Se desarrollaron los elementos mecánicos y estructurales necesarios, como lo son la base de la máquina, una protección para el usuario, el anclaje del motor eléctrico. Se maquinó el cople en el torno CNC, el cual servirá para acoplarse al motor y fijar el disco de desgaste con el motor.

Se seleccionó el material del disco con las características requeridas de acuerdo a la literatura para poder realizar análisis tribológicos.

Se creó un panel en *LabView*, en el cual, es posible monitorear la velocidad a la que gira el motor eléctrico, además de que se puede ver la carga aplicada durante el ensayo de desgaste y una aproximación de la temperatura de las superficies en contacto.

4.1 Alcance y limitaciones

Se evaluó el funcionamiento de la máquina mediante un ensayo con fines de puesta a punto la instrumentación y funcionamiento de la máquina, para el correcto funcionamiento de la misma.



4.2 Trabajo a futuro

Como trabajo futuro se tiene el objetivo de realizar ensayos de desgaste, y comparar los resultados con los reportados en la literatura.

Como etapa final del desarrollo de la máquina se planteó la idea de implementar un sistema de visión artificial, con el objetivo de optimizar la realización de ensayos de desgaste, gracias a la obtención de imágenes en tiempo real y poder calcular la tasa de desgaste sin necesidad de quitar la muestra del ensayo.

5. Agradecimientos

Agradecemos al Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato y a la Coordinación de Ingeniería en Sistemas Automotrices por todas las facilidades otorgadas para la realización de dicho proyecto, de igual manera, agradecer al

encargado de laboratorio del Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato, Cuauhtémoc Durán Alvarado, por el apoyo brindado y a todas las demás personas involucradas directa o indirectamente en la realización de este proyecto.

6. Agradecimiento de autoría

Jesús Ángel Campuzano García: Conceptualización; Recursos; Ideas; Metodología; Análisis formal; Investigación; Recursos; Análisis de datos; Borrador original. *Mariano Braulio-Sánchez:* Conceptualización; Ideas; Investigación; Análisis de datos; Escritura. *José Eli Eduardo González-Durán:* Conceptualización; Ideas; Metodología; Análisis formal. *José David Díaz-Medina:* Investigación; Análisis de datos; Escritura; Borrador original. *Pedro Duran-Reséndiz:* Revisión y edición; Administración de proyecto.

Referencias

- [1] GGB, «Tribología,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.ggbearings.com/es/tribou/tribologia>
- [2] E. V.-C. a. F. N.-L. F. González-Hernández, «“Diseño de prototipo para pruebas de desgaste en superficies asfaltadas”,» Memorias del XIX Congr. Int. Anu. la SOMIM, no. Figura 1, , 2013, p. 193–200.
- [3] Anton Paar GmbH, «Tribómetro tipo pin-on-disk (perno en disco): TRB,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.anton-paar.com/mx-es/productos/detalles/trb3-tribometro-pin-on-disk/>. [Último acceso: 15 octubre 2021].
- [4] P. C. L. René Santiago Barral Becerra, «Prototipo de tribómetro anillo sobre bloque para obtención de curvas de fricción,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/3079/Tesis.pdf?sequence=1>. [Último acceso: Junio 2021].
- [5] E. Esteban and N. Nu, «“Metodología para el diseño y construcción de una máquina para medición

- del desgaste abrasivo basado en la norma ASTM G-65”,» Prospectiva, vol. 7, no. 1, 2009, p. 53–58. <http://repositorio.uac.edu.co/handle/11619/1363>
- [6] B. M. H. M.S. Asawthnarayan, «Effect of abrasive friction on the wear behaviour glass – Epoxy Composites: Effect of nanographene, » Materials Today Proceedings, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.294>
- [7] I. A. V. C. M. A. G. G. P. S. T. E. A. G. H. Dairo H. Mesa G., «A pin-on-disk wear map of rail and wheel materials from different standards, » Materials Letters, vol. Volume 307, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131021>
- [8] K. V. J. Badheka, «Wear behavior of boron-carbide reinforced aluminum surface composites fabricated by Friction Stir Processing, » Wear, Volumes 426–427, Part B, pp. 975-980, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.041>
- [9] C. S. J. S. L. E. Roman Heuberger, «PEEK as a replacement for CoCrMo in knee prostheses: Pin-on-disc wear test of PEEK-on-polyethylene articulations, » Biotribology, Volume 27, 2021.



<https://doi.org/10.1016/j.biotri.2021.100189>

[10] E. G. G. G. L. M. M. G. Giacomo Maculotti, «Uncertainty-based comparison of conventional and surface topography-based methods for wear volume evaluation in pin-on-disc tribological test, » Tribology International, Volume 165, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107260>

[11] A. B. A. A. Shahroozi, «Microstructure and mechanical properties investigation of stellite 6 and Stellite 6/TiC coating on ASTM A105 steel produced by TIG welding process, » Surface and Coatings Technology, Volume 350, pp. 648-658, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.07.044>

[12] R. A. M. S. S. K. S. S. S. Arunkumar, «Optimization of wear behaviour of Al7075 hybrid metal matrix composites using Taguchi approach, » materials today, Proceedings, Volume 33, Part 1, pp. Pages 570-577, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.453>

[13] C. P. R. P. R. V. Ravikumar, «Corrosion and Wear Studies on LM6 Grade Aluminum - Cenosphere Composite – An Experimental Approach, » materials today proceedings, Volume 5, Issue 5, Part 2, pp. Pages 11667-11677, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.136>

[14] A. K. S. Y. K. S. K. C. R. M. Harvinder Singh, «Optimization of tribological behavior of AISI 4140 under nano fly ash particulates in engine lubricating oil, » materials today proceedings, Volume 45, Part 6, pp. pp 4619-4623, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.020>

[15] A. W. C. S. Ronnarit Khuengpukheiw, «Wear behaviors of HVOF-sprayed NiSiCrFeB, WC-Co/NiSiCrFeB and WC-Co coatings evaluated using a pin-on-disc tester with C45 steel pins, » Wear, Volumes 484–485, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203699>

[16] E. L. J. S. P. E. J. N. Roman Heuberger, «Shear resistance and composition of polyethylene protuberances from hip-simulating pin-on-disc wear tests, » Biotribology, Volume 23, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.biotri.2020.100139>

[17] T. K. R. Thirugnanasambantham, «Wear and friction characterization of chlorella sp. microalgae oil based blended lubricant on pin on disc tribometer, » Materials Today: Proceedings, Volume 33, Part 7, pp. Pages 3063-3067, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.512>

[18] V. M. P. D. G. d. S. Y. Waddad, «Multiscale thermomechanical modeling of frictional contact problems considering wear – Application to a pin-on-disc system, » Octubre 2021. [En línea]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02135267/document>. [Último acceso: 2021].

[19] K. M. B. R. A. Borjali, «Predicting the polyethylene wear rate in pin-on-disc experiments in the context of prosthetic hip implants: Deriving a data-driven model using machine learning methods, » Tribology International, Volume 133, pp. Pages 101-110, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.014>

[20] J. T.-M. H. H.-G. R.-A. A.-E. J.-D. M.-R. M. Alvarez-Vera, «Wear resistance of TiN or AlTiN nanostructured Ni-based hard facing by PTA under pin on disc test, » Wear, Volumes 426–427, Part B, Pages 1584-1593, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.096>

[21] M. G. M. M. D. D. G. P. Antonella Rizzo, «Validation of TiAlN functional coatings through cryo-tribological characterization using a pin-on-disk experiment, » Procedia CIRP, vol. 9, pp. 295-300, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.044>

[22] S. G. M. L. G. P. G. S. Matteo Federici, «A preliminary investigation on the use of the pin-on-disc test to simulate off-brake friction and wear characteristics of friction materials, » Wear, vol. 410–411, pp. 202-209, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.07.011>

[23] D. S. R. D. Andrzej Pacana, «Method of precise determination of the main causes of the problems on example of the pin connecting discs in an engine gear, » Transportation Research Procedia, vol. 55, pp. 683-690, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.036>

[24] H. Z. M. O. J. Z. P. C. J. Y. Z. Z. Abolhassan Imani, «Wear and friction of epoxy-based nanocomposites with silica nanoparticles and wax-containing microcapsules, » ELSEVIER, vol. 107, pp. 607-615, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.01.033>

[25] J. Singh, «Wear performance analysis and characterization of HVOF deposited Ni–20Cr₂O₃, Ni–30Al₂O₃, and Al₂O₃–13TiO₂ coatings, » Elsevier, vol. volume 6, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100161>



- [26] ASTM Int', «Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, » February 2018. [En línea]. Available: <https://www.astm.org/Standards/G99>.
- [27] D. T. GRAU, «Diseño y Desarrollo De Un,» Septiembre 2018. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/10251/115391>. [Último acceso: Junio 2021].
- [28] D. C. Presin, «Experimental data on the properties of natural fiber particle reinforced polymer composite material,» materialtoday PROCEEDINGS, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.06.020>
- [29] ABB, «PRODUCT-DETAILS,» 2021. [En línea]. Available: <https://new.abb.com/products/3GVA082002-ASB/3gva082002-asb>. [Último acceso: Junio 2021].
- [30] S. C. D. Systèmes, « “SolidWorks” Alemania,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.solidworks.com/>. [Último acceso: Junio 2021].
- [31] R. K. K. a. S. G. S. K. Singh, « “Microstructure evolution and abrasive wear behavior of D2 steel” Wear, » vol. 328–329, n° <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.019>, p. 206–216, 2015.
- [32] F. Q. Z. A. a. M. S. F. Mukhtar, « “Effect of chrome plating and varying hardness on the fretting fatigue life of AISI D2 components,» Wear, » vol. 418–419, n° <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.001>, p. 215–225, 2019.
- [33] L. P. A. M. Martynenko, «Diseño y construcción de una maquina pin-on-disk para la determinación de coeficientes de fricción y ejemplo de aplicación,» s.f. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Daniel-Krahmer/publication/280085064_Diseño_y_construcción_de_una_maquina_pin_on_disk_para_la_determinación_de_coeficientes_de_fricción_y_un_ejemplo_de_aplicación/links/55a7777c08ae0b4e87121f77/Diseño-y-construcción-de.
- [34] Aceros SISA, Servicio Industrial, S.A. de C.V, «Acero SISA D2,» 7 Junio 2021. [En línea]. Available: <http://www.sisa1.com.mx/pdf/Acero%20SISA%20D2.pdf>.
- [35] Was Sheng Enterprise Co., Ltd, «Eje De Eje De Motor Eléctrico De Metal,» 2021. [En línea]. Available: <http://www.wassheng.com.tw/es/product/Shaft-SHT-05.html>. [Último acceso: Octubre 2021].
- [36] S. Barral, «Prototipo de tribómetro anillo sobre bloque para obtención de curvas de fricción,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/3079/Tesis.pdf?sequence=1>

Derechos de Autor (c) 2022 Jesús Ángel Campuzano García, Mariano Braulio-Sánchez, José David Díaz-Medina, José Eli Eduardo González-Durán, Pedro Durán-Reséndiz



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)