

Diseño de una máquina tribológica para caracterizar desgaste adhesivo

Joel Aguilar, Cesar A. Reynoso-García, J. Nieves Carrillo, Eduardo Chávez, Carlos Lozano, Joab Ramírez, Omar Galindo, E. Castañeda

Laboratorio de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Centro Universitario De Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara. Guadalajara, México

[drjoel_aguilar, the_friend_joel, eduar_schnz]@hotmail.com, carg23@msn.com, [nievescarrillocastillo, nitrus.213, ing.eduardocastaneda]@gmail.com.

Abstract— The phenomena of friction, wear, and lubrication have been a field of study for the tribology, it propose to give solutions at the presents problems in the industries like metal-mechanical, manufacture, pharmaceutical, robotics, cosmetics, etc. Like the cost of the tribometers are very expensive, it have been a one limiting in the development investigation. In this work, shows the conceptual design of a tribological prototype, this one is designed under the specifications and parameters of the la American Society for Standards Testing Materials (ASTM), G83. It'll build a functional prototype that impulse the study of the adhesive wear in metallic materials, ceramics and hard films in the Guadalajara University.

Keyword— *Wear, tribology, ASTM, coefficient of friction, adhesive wear*

Resumen— La Tribología encargada del estudio de los fenómenos de fricción, desgaste y lubricación, propone diversas soluciones a problemas presentes en las industrias como la metalmecánica, manufactura, farmacéutica, robótica, cosmética, dental entre otras. Para el análisis de estos fenómenos, se requiere de tribómetros cuyo excesivo costo de adquisición, limita el desarrollo de la investigación. Se muestra el diseño conceptual de un prototipo tribológico de cilindros cruzados, de acuerdo a especificaciones establecidas en la norma de la Sociedad Americana de Pruebas de Materiales (ASTM) G83, permitirá la construcción de un equipo funcional que impulse el estudio del desgaste adhesivo en materiales metálicos, cerámicos y películas duras en la Universidad de Guadalajara.

Palabras claves— *Desgaste, Tribología, ASTM, coeficiente de fricción, desgaste adhesivo.*

I. INTRODUCCIÓN

El aumento de la vida útil de los elementos mecánicos mediante un control del desgaste hoy en día, es una importante herramienta para la reducción de los costos de producción en las industrias pesadas y medianas. El monitoreo del control del desgaste constituye ahora uno de los principales objetivos, tanto en el diseño mecánico como en las operaciones de mantenimiento.

Para la tribología, es de vital importancia el estudio de los procesos de fricción, desgaste y lubricación, los cuales juegan un papel crítico en los sistemas mecánicos. Debido, a que tanto la fricción como el desgaste y una pobre lubricación, provocan un severo deterioro superficial de los cuerpos que se encuentran en contacto y movimiento relativo [1]. El desgaste, su control y diagnostico formara parte de los sistemas de calidad. Para la aplicación y desarrollo de la tribología es requisito indispensable la aplicación de los métodos y técnicas de cómputo.

Estudios llevados a cabo a través del mundo por miembros de la Sociedad de Tribología e Ingenieros de lubricación, han revelado que una tercera parte de la energía mundial que se consume es debido a la fricción o rozamiento. Esto nos da una magnitud de la importancia que tiene prestar especial cuidado en optimizar las condiciones de rozamiento para disminuir la pérdida de energía y reducir los costos del consumo.

II. CONCEPTOS RELACIONADOS

La palabra tribología, se deriva del griego tribos (τριβος) cuyo significado es rozamiento o fricción y logos (λογος) estudio o tratado. Por ello, desde el punto de vista etimológico, se define como el estudio o tratado de los fenómenos de la frotación o fricción [1].

Sin embargo es imposible tratar temas tribológicos sin antes delimitar conceptos fundamentales para esta ciencia como lo son: tribosistema, contacto mecánico entre superficies, fricción, lubricación y desgaste.

A. Tribosistema

Es necesario, estudiar tanto las características como las condiciones en que se lleva a cabo las interacciones de las superficies de los pares mecánicos, a este entorno, se le conoce como tribosistema, cuyos elementos se presentan en la figura 1.

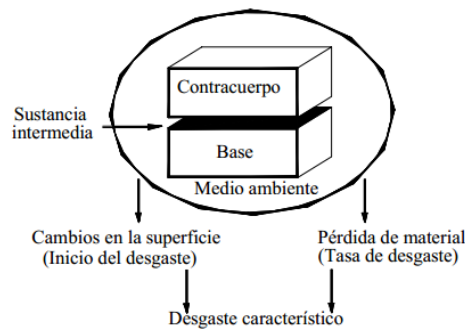


Fig. 1. Factores combinados carga/fatiga estructura

1. Base: Cuerpo primario de fricción, en condición de desgaste.
2. Contra cuerpo: Cuerpo secundario de fricción bajo condiciones de desgaste.
3. Sustancia intermedia: Aceite lubricante, polvo, fibras, granos, agua, vapor, gases, etc.
4. Medio ambiente: Es el entorno donde se encuentra el sistema; puede estar constituido por gases y/o líquidos en diferentes condiciones de presión; ya sean muy elevadas o al vacío; a temperaturas extremas, etc. Involucrando cualquier posible combinación de triboelementos, que incluyen al medio ambiente. [1]

B. Superficies en contacto.

Cuando dos superficies de un par cinemático, se encuentran en contacto y movimiento relativo, se presenta en ellos una pérdida progresiva de material, causando daño superficial en una o en ambas piezas. Esto significa que la holgura entre las piezas aumenta, por consecuencia disminuye la eficiencia de los pares cinemáticos o los equipos. Cuando dos planos en movimiento con superficies paralelas tienen acercamiento entre ellos, comienza el contacto, inicialmente solo en algunos puntos. En ellos, un gran número de asperezas de diferentes tamaños y formas se presionan unas en contra de otras [2]. Al analizar el contacto entre dos superficies debe considerarse como requisito la presencia de asperezas, con distribuciones de alturas al azar. Cuando una de las superficies transmite un esfuerzo hacia la otra, dichas asperezas pueden sufrir deformaciones elásticas o plásticas. La suma de todos los micro contactos que forman las asperezas individuales constituyen el área real de contacto, que representa solamente un fragmento diminuto del área geométrica visible; en la figura 2, se muestra la magnificación del contacto entre las rugosidades.

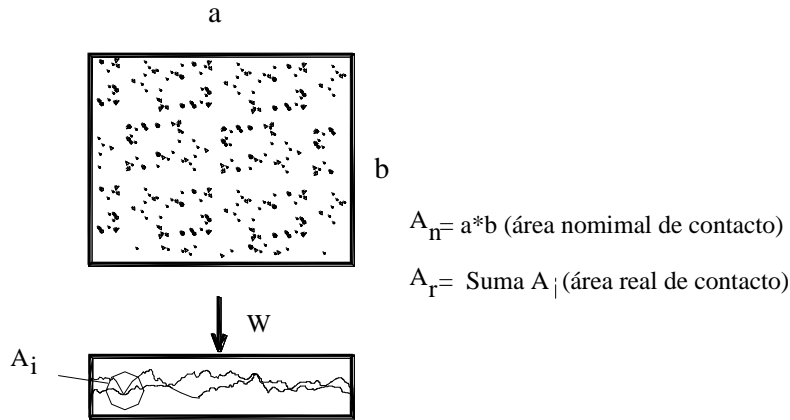


Fig. 2. Magnificación del contacto entre las rugosidades

Las asperezas involucradas tienen diferentes formas geométricas, las más comunes son aquellas que tienen forma cónica y esférica, las protuberancias de tipo cuña, se han idealizado para el análisis del contacto mecánico [3]. Se pueden hacer aseveraciones sobre el área de contacto, siempre que se conozca la naturaleza de las asperezas, que va depender de las condiciones en que se encuentran expuestas. Teóricamente se considera, que dichas asperezas son todas esféricas de radio y altura constante, como en la figura. Además, se deforman de manera independiente, cargan una parte de la carga y contribuyen con una fracción al área total de contacto [4].

C. Desgaste

El desgaste es un proceso en el cual las capas superficiales de un sólido se rompen como resultado de la acción mecánica de otro cuerpo o medio.

La siguiente figura muestra la representación gráfica típica del desgaste en funciones del tiempo de operación, y puede observarse 3 etapas en el proceso. La primera etapa, de asentamiento, es una etapa de no equilibrio del proceso que sigue en una función exponencial y representa solo una pequeña porción total del tiempo de operación del par deslizante [8].

La segunda etapa del proceso, la cual es la más larga, se caracteriza por valores constantes del régimen de desgaste, por lo que sigue una función lineal.

La tercera etapa, desgaste catastrófico, se caracteriza por un régimen de deterioro en incremento constante y no es aplicable a las superficies en rozamiento. Las 3 etapas están representadas en la figura 3.

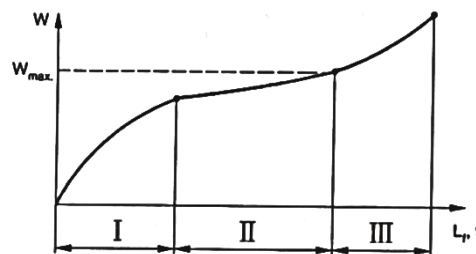


Fig. 3. Desgaste W en función del tiempo de operación t.

D. Tipos de desgaste

Una clasificación de los mecanismos que generan el desgaste, apareció en 1957, en la revista Wear, cuyo autor Burwell clasificó a cuatro de ellos como los responsables de dicho fenómeno, los cuales son:

- Desgaste por adhesión.
- Desgaste por abrasión.
- Desgaste por fatiga.
- Desgaste por corrosión.

Los ocasionados por erosión y cavitación los considera como mecanismos menores de desgaste [1].

E. Desgaste adhesivo

El desgaste adhesivo, o también llamado desgaste deslizante, se asocia invariablemente con la formación de uniones adhesivas en la interface. Por ello, las superficies en contacto deben estar entrelazadas íntimamente. La fuerza de las uniones, depende en gran parte de la naturaleza física y química de las superficies en contacto. En la figura 4, se muestra la micrografía del daño causado por el efecto del desgaste adhesivo en un acero AISI D1 [5], mientras que en la figura 5, se ilustra la deformación que sufre la superficie de un espécimen de bronce de micro estructura α/β después de interactuar contra un acero grado herramienta en condiciones secas, en la figura 6, ilustra una escama o descarpela miento, que se ha desprendido de la superficie mencionada. Por último en la figura 7, se muestra el desgaste adhesivo en una pieza mecánica.

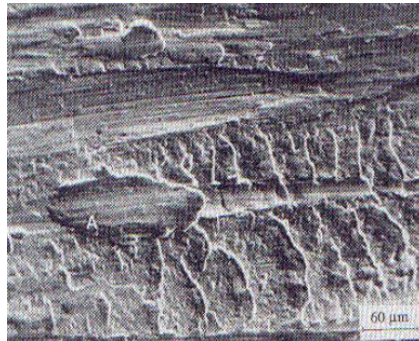


Fig. 4. Daño causado por el desgaste adhesivo al Acero AISI D1 [6].

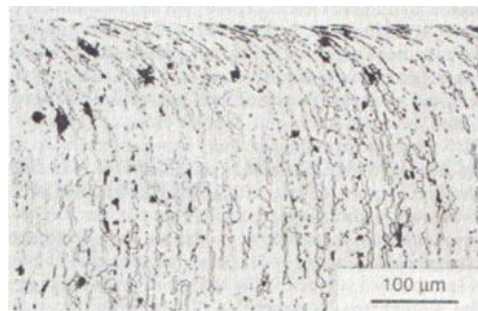


Fig. 5. Deformación de la superficie de un espécimen de bronce después de interactuar contra un acero grado de herramienta [6].

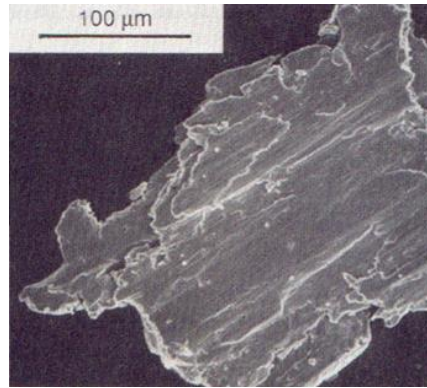


Fig. 6. Escama de bronce desprendida de la superficie [6].

La formación de la unión adhesiva es el resultado de la adherencia que ocurre entre los puntos de contacto de las asperezas presentes en la interface como se muestra en la figura 7 [1].

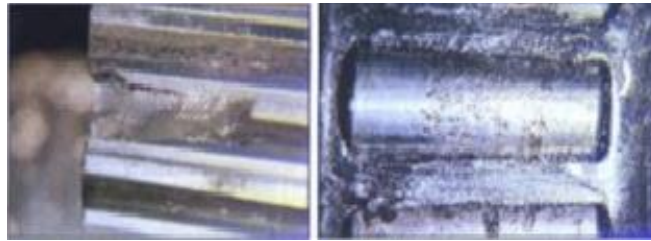


Fig. 7. Desgaste por adhesión [6].

F. Fricción

El término fricción proviene del verbo en latín *fricare* que significa frotar. De manera formal se define a la fricción como la resistencia al movimiento que presenta un cuerpo sobre otro. Los cuerpos en cuestión pueden ser un gas con un sólido (fricción aerodinámica) o un líquido y un sólido (fricción del líquido). La fricción puede deberse también a los procesos internos de disipación de energía dentro de un solo cuerpo (fricción interna) [5].

Se ha demostrado a lo largo de los años que la fricción afecta de manera considerable el rendimiento de las máquinas, es por esta razón que las actuales investigaciones están orientadas al estudio de materiales que puedan emplearse como componentes de máquinas y lubricantes, y así reducir los efectos de fricción.

Tres de los efectos que más perjudican de la fricción son: la pérdida de potencia, el desgaste y el sobrecalentamiento de piezas. Y es que en los motores de combustión interna entre el 15 y 20% de la potencia se utiliza para compensar las pérdidas por fricción, ya que el continuo rozamiento genera altas temperaturas en la superficie acelerando el desgaste. Aunque no todo son pérdidas, pues se atribuye a la fricción la transmisión de potencia y la disipación de energía.

G. Lubricación

El objetivo principal de la lubricación es la separación de dos superficies con deslizamiento relativo entre sí evitando que se presente desgaste alguno entre ellas e intentando que el proceso de deslizamiento se efectúe con el mínimo de roce, lo cual se logra a través de una película lubricante que sirve para evitar que se presente desgaste entre ambas superficies.

Aunque el objetivo principal de los lubricantes sea evitar la fricción y el desgaste, esto no siempre se logra por completo. Es importante recalcar que los lubricantes cumplen algunas otras funciones ya que también actúan como un medio de transferencia de calor generado por el continuo contacto de piezas,

sirven para eliminar impurezas generadas por el desgaste en los equipos, protegen de fenómenos como la corrosión y contribuyen en la refrigeración de los componentes [5].

III. FUNCIONAMIENTO DE UNA MÁQUINA TRIBOLÓGICA DE CILINDROS CRUZADOS

Los principales componentes que constituyen una máquina de cilindros cruzados son: Brazo de palanca, porta probeta fija, probeta móvil, chuck o mandril para la sujeción de la probeta móvil, motor de CA, un controlador para el paro y arranque del motor de CA, un contador de vueltas, una cadena o banda para transmitir movimiento, un sensor de celda de carga para medir la fuerza de fricción entre otros.

La norma ASTM G83, plantea una prueba de laboratorio donde los ejes de dos cilindros cruzados forman un ángulo perpendicular entre sí. En ella un espécimen gira a velocidades comprendidas de 0 rpm, hasta 400 rpm. El segundo cilindro se mantiene estático y ejerce un esfuerzo de compresión sobre el primer espécimen. El esfuerzo transmitido al punto de contacto se realiza mediante la carga de un peso muerto, aplicado mediante un brazo de palanca. La tasa de desgaste se determina midiendo la pérdida de masa de los especímenes después de la prueba. Debido a la amplia diferencia en las densidades de los materiales, es necesario convertir la pérdida de peso a la pérdida de volumen en milímetros cúbicos.

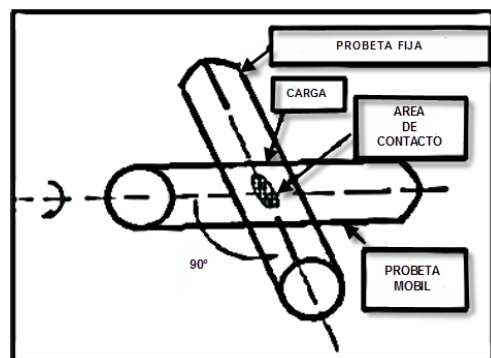


Fig. 8. Esquema de ensayo cilindros cruzados

Por ello, se plantea en éste trabajo, solamente los cálculos principales de ciertos componentes que constituyen al prototipo, como lo son: brazo de palanca, Transmisión de la potencia a través de un sistema de catarinas y cadena.

IV. CÁLCULOS DE ELEMENTOS

A. Cálculo de transmisión de potencia por cadena

Una cadena, es un elemento de transmisión de potencia formado por una serie de eslabones unidos con pernos. Este diseño, permite tener flexibilidad y transmite grandes fuerzas de tensión. Cuando se aplica una fuerza al eje motriz, la cadena entra en ruedas dentadas llamadas catarinas transfiriendo así el movimiento al eje auxiliar [7].

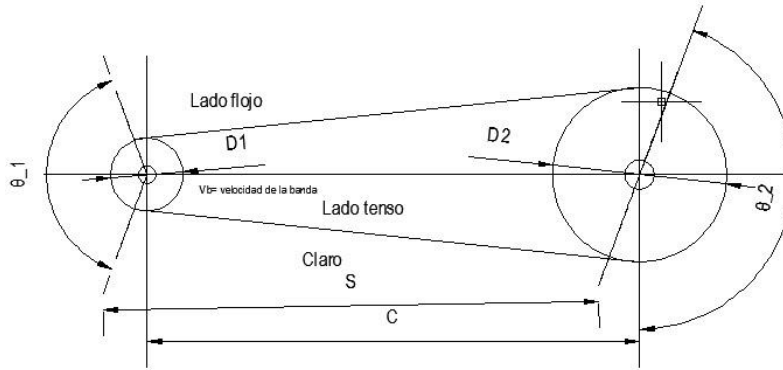


Fig. 9. Esquema de una cadena

Se eligió el uso de cadenas para éste prototipo, debido a la condición de baja velocidad y gran par de torsión, las transmisiones con cadenas son las más adecuadas.

- Datos: Potencia transmitida = Motor eléctrico de 1 Hp (bajo norma ASTM G83)
 Velocidad del motor = 1750 RPM
 Velocidad de salida = 1000 RPM (velocidad según requerimientos deseados para dar mayor alcance a las pruebas).

Paso 1) Se obtiene el factor de servicio según tablas $F_s=1.3$, y con este determinamos la potencia de diseño [7].

$$\text{Potencia de diseño} = \text{Factor de servicio} (\text{potencia transmitida}) \quad (1)$$

$$\text{Potencia de diseño} = 1.3 (1) = 1.3$$

Paso 2) Relación de velocidades

$$\text{Relación} = \text{RPM de entrada} / \text{RPM salida} \quad (2)$$

$$\text{Relación} = 1750/1000 = 1.75$$

Paso 3) Según tabla se requerirá una cadena de hilera simple de rodillos número 40, de 11 dientes y un paso de 0.5 pulgadas.

Paso 4) Determinación de números de dientes de la segunda Catarina (N_2)

$$N_2 = N_1 (\text{relación}) = 11(1.17) \quad (3)$$

Paso 5) Velocidad de salida (n_2)

$$n_2 = n_1 \left(\frac{N_1}{N_2} \right) = 1750 \left(\frac{11}{19} \right) = 1013.1578 \text{ RPM} \quad (4)$$

Paso 6) Cálculos de diámetros de paso de la Catarina (D_1 y D_2)

$$D_1 = \frac{P}{\text{sen}\left(\frac{180}{N_1}\right)} = \frac{0.5}{\text{sen}\left(\frac{180}{11}\right)} = 1.774 \text{ pulgadas} \quad (5)$$

$$D_2 = \frac{p}{\text{Sen}\left(\frac{180}{N_2}\right)} = \frac{0.5}{\text{Sen}\left(\frac{180}{19}\right)} = 3.0377 \text{ pulgadas}$$

Paso 7) Especificación de la distancia entre centros nominal. Se usó la parte media del intervalo recomendado, 40 pasos.

Paso 8) Longitud de cadenas (L)

$$L = 2C + \frac{N_2 + N_1}{2} + \left(\frac{N_2 - N_1}{4\pi^2 C} \right)^2 \quad (6)$$

$$L = 2(20) + \frac{19 + 11}{2} + \left(\frac{19 - 11}{4\pi^2 (20)} \right)^2 = 55 \text{ pasos}$$

Se toma el paso par superior 56 pasos de 1/2 pulgada.

Paso 9) Distancia entre centro (C)

$$C = \frac{1}{4} \left[L - \frac{N_2 + N_1}{2} + \sqrt{\left(L - \frac{N_2 + N_1}{2} \right)^2 - \frac{8(N_2 - N_1)^2}{4\pi^2}} \right] \quad (7)$$

$$C = \frac{1}{4} \left[56 - \frac{19 + 11}{2} + \sqrt{\left(56 - \frac{19 + 11}{2} \right)^2 - \frac{8(19 - 11)^2}{4\pi^2}} \right] = 20.4603 \text{ pasos}$$

Cada paso de 0.5 pulgadas

Paso 10) Angulo de contacto de la cadena con la Catarina

$$\theta_1 = 180 - 2 \text{sen}^{-1} \left[\frac{(D_2 - D_1)}{2C} \right] \quad (8)$$

$$\theta_2 = 180 + 2 \text{sen}^{-1} \left[\frac{(D_2 - D_1)}{2C} \right]$$

$$\theta_2 = 180 + 2 \text{sen}^{-1} \left[\frac{(3.0377 - 1.774)}{2C} \right] = 186.9462^\circ$$

Resumen de cálculos:

Paso: cadena número 40, 1/2 pulgada de paso

Longitud: 56 pasos = 56 (.5) = 28 pulgadas

Distancia entre centros: 20.4603 (.5) = 10.2301

Catarina: Hilera simple, número 40, 1/2 de pulgada de paso

Catarina pequeña: 11 dientes, D=1.774 pulgadas

Catarina grande: 19 dientes, D= 3.0377 pulgadas

B. Cálculo de eje

Un eje, es un componente de dispositivo mecánico que transmite movimiento rotatorio y potencial. Los engranes, las poleas, las catarinas y otros elementos sostenidos comúnmente por los ejes, ejercen fuerzas, y causan momentos flexionantes. Y la potencia transmitida causa torsión [7].

Datos: Largo del eje: 12 pulgadas

Carga sobre el extremo del eje: 1000 libras

Paso 1) Torque del motor y catarina pequeña (T₁)

$$T_1 = 6300 \frac{P}{n_1} = 6300 \frac{1}{1750} = 36 \text{ lb pulgada} \quad (9)$$

Paso 2) Fuerza del lado tenso de la Catarina (F_c)

$$F_c = \frac{T_1}{\frac{D_1}{2}} = \frac{T_2}{\frac{D_2}{2}} \quad (10)$$

$$F_c = \frac{36}{\frac{1.774}{2}} = 40.5862 \text{ lb}$$

Paso 3) Torque transmitido al eje (T_2)

$$T_2 = F_c \left(\frac{D_2}{2}\right) = 40.5862 \left(\frac{3.0377}{2}\right) = 61.6443 \text{ lb pulgada} \quad (11)$$

Paso 4) Factor de diseño (N), se usa normalmente N=2 en diseños típicos de ejes, donde hay una confianza promedio en los datos de material y de las cargas.

Paso 5) El valor preliminar de diseño K_t hace referencia a las discontinuidades geométricas encontrados con más frecuencia en ejes de transmisión de potencia, en este caso se eligió un cuñero en trineo $K_t = 1.6$ [7].

Paso 6) El acero seleccionado para el eje es el AISI 1040 siendo el más utilizados para ejes y engranes, y de tablas del material se determina el punto de frecuencia $S_y = 96000$ psi, resistencia a la tensión $W_u = 113000$ psi y su porcentaje de elongación del 16 %.

Con estos datos se estima la resistencia a la fatiga modificada según tablas $S_n = 40000$ psi. Se aplicó un factor por tamaño a la resistencia a la fatiga por tabla $C_s = 0.75$, y un valor de confiabilidad de 0.99 con lo que se maneja $C_R = 0.81$.

Paso 7) Resistencia a la fatiga real

$$S'_n = S_n C_s C_R \quad (12)$$

$$S'_n = (40000)(0.75)(0.81)$$

$$S'_n = 24300 \text{ psi}$$

Paso 8) Diámetro de la flecha

$$D = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t M}{S_n}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y}\right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

Al extremo del eje se apoyará una carga que presionará a la muestra, esta carga será de 1000 libras, al multiplicar la distancia deseada de la flecha que es 12 pulgadas, se obtiene el torque de la flecha $M = 12000$ libras pulgadas

$$D_2 = \left[\frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left(\frac{(1.5)(12000)}{24300}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{61.6443}{96000}\right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} = 2.4711 \text{ pulgadas}$$

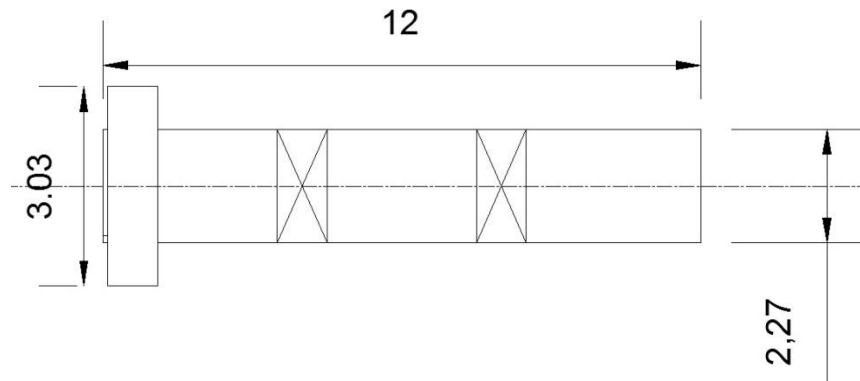


Fig. 10. Diagrama del eje

C. Cálculo del brazo de palanca

En el ensayo de prueba descrito en la norma ASTM G83 se especifica que la muestra estacionaria debe estar bajo una carga de 71.2 N o 7.26 Kgf, es la intención de este diseño la utilización del peso muerto, es decir que solamente el peso del brazo sea necesario para llegar a dicho valor. Además se le adaptará un porta pesas en ambos extremos por si el investigador desea aumentar o disminuir la carga.

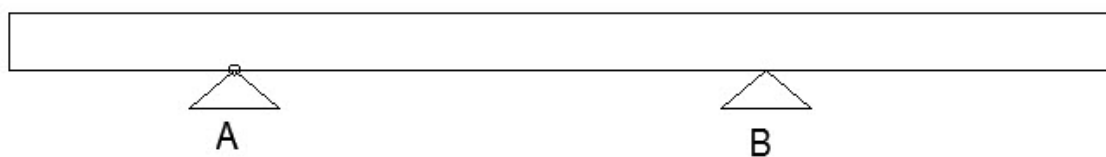


Fig. 11. Diagrama del brazo de palanca

El peso del brazo descansara sobre el punto “A” y el punto “B”. “A”, representa el rodamiento con el que se podrá levantar o bajar el brazo, mientras que “B”, representa la muestra a la que será sometida la carga. En los extremos, se deja un espacio extra para más carga o contra carga si son requeridos. Los puntos “A” y “B” se repartirán a ¼ de cada extremo para sostener cargas iguales, por lo consiguiente si se desea que “B” obtenga 71.2N, el peso total de la estructura deberá de ser 142.4N. Se buscó en catálogos de tubos estructurales cuadrados, el perfecto para este trabajo es un tubo que pesa 18.9 Kgf por metro cuadrado de 90 mm de diámetro y un espesor de 8mm, con el del material se necesitara que el brazo tenga una distancia de 0.768 m.

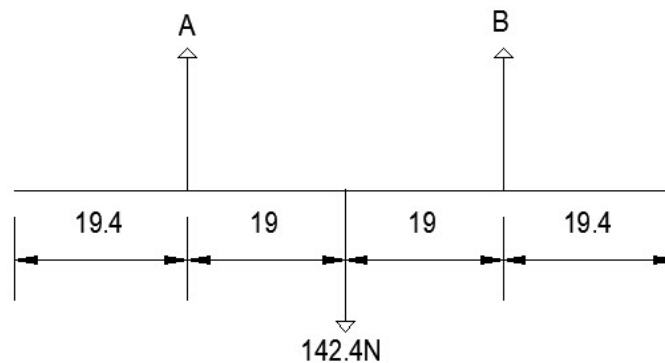


Fig. 12. Diagrama de cuerpo libre

Paso 1) Utilizando la primera condición de equilibrio estático se desarrolla la ecuación del brazo.

Paso 2) Utilizando B como referencia se busca el momento en el punto A (M_A)

$$\sum M = M_A + M_B - 142.4 = 0 \quad (13)$$

$$\sum M_b = -M_A(.38) + 142.4(.19) = 0 \quad (14)$$

$$M_A = 71.2 N$$

Paso 3) Sustituir en la ecuación 13

$$\sum M = 71.2 + M_B - 142.4 = 0 \quad (15)$$

$$M_B = 71.2 N$$

V. CONCLUSIONES

El tiempo de vida útil y confiabilidad de los productos manufacturados están determinados por las propiedades tribológicas (resistencia a la fricción y resistencia al desgaste) del par o de los pares mecánicos que estén en contacto y su movimiento relativo, por lo que el sistema debe diseñarse de forma tal que se pueda obtener un alto rendimiento.

Los fenómenos de fricción y desgaste, han sido un campo de estudio importante para la Tribología, el cual se ha involucrado de una manera sorprendente en cada una de las industrias como la farmacéutica, robótica, cosmética, dental entre otras, pero sobre todo la metal-mecánica, en donde es de vital importancia la investigación y el estudio de nuevos materiales para reducir al máximo dichos fenómenos que están presentes en todos los pares cinemáticos.

El problema fundamental de todas las empresas manufactureras reside en las grandes pérdidas energéticas producidas por la fricción y el desgaste. La figura 13, muestra la gráfica donde se produce las mayores pérdidas energéticas en las industrias mineras, agrícolas, metalúrgicas, celulosa y alimentarias por concepto de tribología [3].

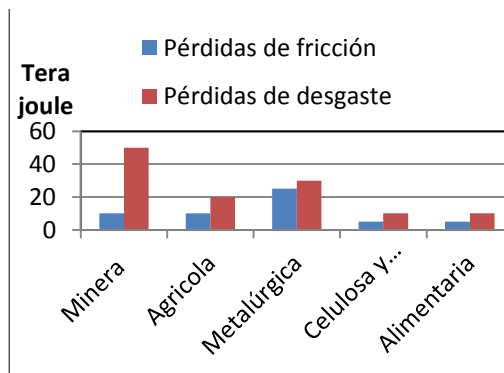


Fig. 13. Perdidas energéticas Prototipo

Por lo anterior, la importancia de reducir la fricción y el desgaste, ayudará a las empresas a minorar los altos costos por la reposición de componentes dañados así como herramientas desgastados, provocando de ésta manera un freno en su productividad. Teniendo en cuenta esto, la Universidad de Guadalajara a través del departamento de Tribología de Ingeniería Mecánica, está desarrollando prototipos tribológicos para fomentar la investigación en las Universidades y apoyar al sector productivo realizando pruebas de desgaste adhesivo.

La figura 14 muestra el prototipo de máquina deseado con la configuración de cilindros cruzados.

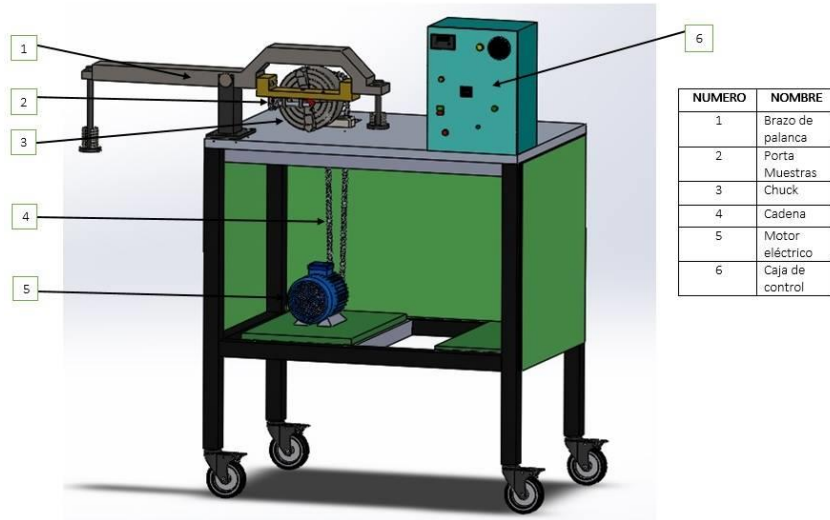


Fig. 14. Prototipo de máquina de cilindros cruzados

REFERENCIAS

- [1] Aguilar Joel, Desarrollo de un prototipo tribologico húmedo funcional para pruebas de abrasión en un tribosistema acuoso, Instituto politecnico nacional, Agosto del 2002.
- [2] Edward Arnold, Tribology: Friction and Wear of Engineerig Materials, I.M Hutchins, 1992.
- [3] Francisco Martínez Pérez, La tribología ciencia y técnica para el mantenimiento, primera edición, 1984.
- [4] Bautista Miguel, Diseño de una máquina tribologica de configuración geométrica de cilindros cruzados para analisis de desgaste por deslizamiento, Instituto politecnico nacional, Diciembre 2005.
- [5] Barral Becerra, René Santiago; Cruz López, Pedro, Prototipo de tribómetro anillo sobre bloque para obtencion de curvas de friccion, Universidad Autonoma de Mexico, Febrero 2014.
- [6] ASTM Handbook Vol. 18 Friction, Lubrication and Wear Technology, ASM International.
- [7] Robert L. Mott, Diseño de elementos de máquinas, Pearson Eductation, cuarta edición 2006.