

**UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN  
OSCAR LUCERO MOYA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**Trabajo de Diploma**

**CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UNA MÁQUINA  
PARA MEDIR DESGASTE**

**Autor: Agustín Ricardo Fernández**

**Tutores: Ing. Danyer Salinas Alberteris.  
Prof. Titular Ing. Osmundo Héctor Rodríguez Pérez. Dr. C**

**HOLGUÍN  
2015**

***AGRADECIMIENTOS:***

- ❖ *Agradezco primeramente a mis Padres, por inspirarme y fortalecerme con su ejemplo.*
- ❖ *A mis tutores Dr.C. Osmundo Héctor Rodríguez Pérez, Ing. Danyer Salinas Alberteris y Gilberto Israel Gurri por ayudarme en la realización de este trabajo.*
- ❖ *A mi familia, amigos, y todas aquellas personas que de alguna manera u otra supieron darme lo mejor de sí para contribuir con el desarrollo de este trabajo.*



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN  
OSCAR LUCERO MOYA

---

*PENSAMIENTO:*

Los que no tienen el valor  
de sacrificarse, han de tener  
al menos el pudor de callar  
ante los que se sacrifican

José Martí



## **RESUMEN**

En este trabajo construyo y puse en funcionamiento una maquina tribológica de desgaste abrasivo, según norma técnica ASTM G65, se realizaron ensayos, demostrando la confiabilidad de la maquina bajo esta norma. La maquina permitirá realizar ensayos confiables de desgaste, siendo otra herramientas para evaluar las características de los materiales y así mejorar el conocimiento de la tribología, además se podrá analizar el comportamiento de diferentes materiales, y de esta manera predecir el ciclo de vida de piezas de maquinaria que están sometidas a este tipo de desgaste.

## **ABSTRACT**

Construct and put into operation a tribology machine of abrasive wearing, according to practical standards ASTM G65, several tests were performed, demonstrating the reliability of the machine under this norm. The machine will allow to perform reliable tests of wearing down, being another tools to evaluate the characteristics of the materials and thus to improve the knowledge of the tribology, in addition the behavior of different materials will be able to be analyzed, and this way to predict the life time of machinery components that are put under this type of wearing down.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	8
CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO	
1.1 Tribología.....	12
1.1.1 Antecedentes.....	12
1.1.2 Aplicaciones de la Tribología .....	15
1.2 Fundamentos de Tribología.....	16
1.2.1 Fricción .....	16
1.2.2 Desgaste.....	29
1.3. Máquinas de desgaste. ....	35
1.3.1. Máquina de desgaste abrasivo de plato horizontal [10].....	36
1.3.2. Máquina de ensayo por abrasión del tipo Fargo [11].....	36
1.3.3. Tribómetro montado sobre un torno [12] .....	37
1.3.4. Equipos de ensayos por abrasión del tipo pin on ring [13].....	38
1.3.5. Máquina para ensayo por abrasión según norma ASTM G-65 [14].....	38
1.4. Estudio de las diferentes partes de la máquina de ensayo por abrasión según norma ASTM G-65.....	39
1.4.1. Partes principales de la máquina de desgaste. ....	41
1.4.2 Preparación de la muestra y muestreo.....	50
1.4.3. Procedimiento para el ensayo .....	53
1.4.3. Preparación y cuidado de las ruedas de goma.....	54
1.4.5. Operación y calibración inicial de la máquina.....	57
CAPÍTULO 2. CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA DE DESGASTE	
2.1. SECUENCIA TECNOLÓGICA DE LA FABRICACIÓN.....	57
2.1.1. Medidas de seguridad para el proceso de fabricación.....	57



---

2.1.2 Pasos tecnológicos de la fabricación del eje de la rueda.....	58
2.1.3 Pasos tecnológicos de la fabricación de la polea conductora.....	59
2.1.4 Pasos tecnológicos de la fabricación de la polea conducida.....	
2.2.2. Sistema de transmisión por poleas. Cálculos	
3. CONCLUSIONES.....	
4. RECOMENDACIONES.....	

## INTRODUCCIÓN

En los últimos tiempos se promueve un interés marcado sobre el tema de fricción, desgaste y lubricación realizándose un esfuerzo considerable en la determinación de sus causas y revelar sus consecuencias. Los temas que se concentran en la interacción entre las superficies en contacto se han denominado como tribología.

Durante el funcionamiento de toda maquinaria, sus elementos mecánicos se encuentran expuestos a desgaste o degradación, esto es causa del contacto entre ellos y de las sustancias que interactúan en el medio donde trabajan. El desgaste es un fenómeno que se manifiesta siempre que exista carga y movimiento, ya que la calidad de la mayoría de los productos metálicos depende de la condición de sus superficies y del deterioro debido al uso. Este deterioro es importante en la práctica de la ingeniería; porque suele ser el factor principal que limita la vida y el desempeño de los componentes de una máquina, lo que trae como consecuencia el aumento de costos por mantenimiento de ahí la importancia.

El objetivo de la tribología, es elevar la vida útil de las máquinas, mediante la disminución de la fricción y el desgaste; evitando un gasto en materiales, energía y tiempo, que en términos económicos tienen una influencia considerable, debido a los gastos en herramientas y los tiempos muertos para el cambio de las mismas [1]

Para evaluar el fenómeno de desgaste, existen equipos diseñados para este objetivo y uno de ellos son las máquinas de medición del desgaste abrasivo, mediante este trabajo se persigue realizar la construcción de una de estas máquinas. Esto quiere decir que se debe buscar información sobre el fenómeno del desgaste y el diseño de estos equipos con vistas a realizar la construcción y puesta en marcha de la misma, entonces la **situación problémica** es que se necesita conocer las diferentes tipos de máquinas con vistas a realizar la construcción de la mas conveniente para nuestro caso.

El **problema de investigación** no existe la posibilidad de medir desgaste en materiales y depósitos por soldadura.

**Objeto de estudio:**

El desgaste abrasivo en materiales de ingeniería

**Campo de acción:**

Las máquinas de medición de desgaste abrasivo.

**Hipótesis.**

Si se realiza un buen estudio y se tienen los elementos se puede construir una máquina para la medición del desgaste abrasivo.

**Objetivo general**

Construir y poner en marcha una máquina para la medición del desgaste abrasivo en materiales utilizados en la ingeniería.

**Tareas:**

- a) Buscar información sobre máquinas de desgaste abrasivo.
- b) Construir cada uno de los sistemas de la máquina de desgaste abrasivo.
- c) Calibrar la máquina de desgaste abrasivo.
- d) Evaluar el desgaste en aceros estructurales de ingeniería con elevada dureza según la Norma ASTM G83 [2,3]

**Resultados esperados.**

Se espera construir una máquina de medición de desgaste abrasivo y realizar pruebas experimentales, además se espera escribir y montar una práctica de laboratorio para la asignatura de fricción, desgaste y lubricación.

**Métodos de investigación.**

**Métodos empíricos**

**Consulta de documentos**

Se consultaron bibliografías acerca del tema de soldadura y ciencia de los materiales.

**Mediciones.**

Brindó los datos necesarios para la determinación de las medidas exactas en las dimensiones durante la construcción de la maquina de desgaste abrasivo.

**Observación.**

Permite determinar los ajustes de la transmisión por correa y de las tolerancias durante la construcción de la maquina de desgaste.

## **CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO.**

En el estudio teórico del trabajo se tratan tres aspectos importantes para el fundamento teórico del mismo, estos son: tribología,

### **1.1 Tribología**

La palabra Tribología se deriva del término griego “tribos”, el cual puede entenderse como frotamiento o rozamiento, así que la traducción literal de la palabra podría ser, la ciencia del frotamiento (Tribos = frotar y Logos = Tratado) [3].

La Tribología se define entonces, como la ciencia y tecnología que estudia la interacción de las superficies en movimiento relativo, así como los temas y prácticas relacionadas, es el arte de aplicar un análisis operacional a problemas de gran importancia económica, llámese, confiabilidad, mantenimiento, y desgaste del equipo técnico, abarcando desde la tecnología aeroespacial hasta aplicaciones domésticas. La comprensión de las interacciones superficiales en una interface requiere tener conocimiento de varias disciplinas incluyendo la física, química, matemáticas aplicadas, mecánica de sólidos, mecánica de fluidos, termodinámica, transferencia de calor, ciencia de materiales, lubricación, diseño de máquinas, desempeño y confiabilidad.

El objetivo de la Tribología, es prolongar la vida útil de las máquinas, mediante la disminución de la fricción y el desgaste.

Una de las principales aplicaciones de esta disciplina es para diseñar máquinas e instalaciones, ya que esta ciencia estudia los fenómenos asociados al desgaste, a la fricción y a la corrosión; todos ellos son efectos que deterioran el material, atacando a su capa más externa, debilitándolo poco a poco hasta su rotura. Así, nos sirve para diseñar desde las uñas que utilizan las excavadoras para extraer

tierra, como para los materiales para realizar un empaste de una muela, hasta para elegir el material que debe usarse en un robot.

El concepto de Tribología, fue usado por primera vez en un informe elaborado por una Comisión del Ministerio de Educación y Ciencia de la Gran Bretaña hace 50 años atrás, donde se señala el carácter multidisciplinario de esta ciencia, en la que entre otras participa la física, la química, la economía, la ciencia de los materiales, la matemática y la computación.

La tribología se comienza a reconocer como fuente de un gran potencial para economizar recursos financieros, materias primas y materiales energéticos, de aquí su gran importancia, haciéndose efectiva por muchos países la estimulación de las investigaciones en la fricción, la lubricación y el desgaste.

Varios expertos consideran que en 1990 en EUA, sólo por efectos de la fricción y el desgaste, se gastó en energía una suma equivalente a la necesaria para mantener la ciudad de Nueva York iluminada durante un año [4].

En la industria de construcción de maquinaria se estima que, entre el desgaste y la fatiga se produce el 90 % de las causas de salida de servicio de los elementos de máquinas, sin tener en cuenta aquellos que estando desgastados continúan trabajando y son la causa de la pérdida de eficiencia en las máquinas. En toda industria existen elementos en movimiento (pares de fricción) donde la fricción y el desgaste están presentes. Solo esos datos bastarían para comprender la importancia de esta ciencia.

La aplicación de los conocimientos de la Tribología representa ahorros de diversas índoles:

- Materias primas.
- Aumento en la vida útil de las herramientas y la maquinaria.
- Recursos naturales.

- Energía.
- Protección al medio ambiente.
- Economía.

La tribología es decisiva para la maquinaria moderna que utiliza superficies rodantes y/o deslizantes. De acuerdo a algunos estimados, las pérdidas resultantes de la ignorancia en tribología en los Estados Unidos representan aproximadamente el 6% del total del producto bruto (\$200 billones de dólares por año en 1966), y aproximadamente un tercio de los recursos energéticos existentes se pierden en forma de fricción. Por esto, la importancia de la reducción de la fricción y el desgaste para un ahorro de dinero y una confiabilidad a largo plazo de la maquinaria.

#### 1.1.1 Antecedentes

La Tribología podría parecer algo nuevo sin embargo desde que se usa la rueda desde el 3500 A.C., ilustra el interés de nuestros antepasados por reducir la fricción en movimientos de traslación. Los egipcios tenían el conocimiento de la fricción y los lubricantes, esto se ve en el transporte de grandes bloques de piedra para la construcción de monumentos y pirámides. Para realizar esta tarea utilizaban agua o grasa animal como lubricante [5].

Leonardo Da Vinci fue el primero que postuló un acercamiento a la fricción, dedujo las leyes que gobernaban el movimiento de un bloque rectangular deslizándose sobre una superficie plana, también, fue el primero en introducir el concepto del coeficiente de fricción.

Desafortunadamente sus escritos no fueron publicados hasta cientos de años después de sus descubrimientos. Fue en 1699 que el físico francés Guillaume Amontons redescubrió las leyes de la fricción al estudiar el deslizamiento entre dos superficies planas.

Muchos otros descubrimientos ocurrieron a lo largo de la historia, referentes al tema, científicos como Charles Augustin Coulomb, Robert Hooke, Isaac Newton, entre otros, aportaron conocimientos importantes para el desarrollo de esta ciencia. Al surgir la revolución Industrial el desarrollo tecnológico de la maquinaria para la producción avanzó rápidamente. El uso de la potencia del vapor permitió nuevas técnicas de manufactura. En los inicios del siglo XX, desde el enorme crecimiento industrial hasta la demanda de una mejor tribología, el conocimiento de todas las áreas de la tribología se expandió rápidamente.

Con la tribología como ciencia se estudia la fricción y sus efectos asociados, como el desgaste, tratando de prevenirlos con mejores diseños y prácticas de lubricación. Tiene en cuenta, entre otros aspectos, los siguientes:

- El diseño
- Los materiales de las superficies en contacto
- El sistema de aplicación del lubricante
- El medio circundante
- Las condiciones de operación

### **1.1.2 Aplicaciones de la Tribología**

La tribología está presente prácticamente en todas las piezas en movimiento tales como [4]:

- Rodamientos
- Chumaceras
- Sellos
- Anillos de pistones
- Embragues
- Frenos
- Engranajes

➤ Árboles de levas.

## 1.2 Fundamentos de Tribología

La tribología se centra en el estudio de tres fenómenos:

- La fricción entre dos cuerpos en movimiento
- El desgaste como efecto natural de este fenómeno
- La lubricación como un medio para evitar el desgaste

Por lo tanto, el estudio de la tribología para este trabajo se centra en el desgaste de materiales como el efecto natural de la fricción existente en el sistema en condiciones secas, por tanto el tema de lubricación no se toca en esta investigación.

### 1.2.1 Fricción

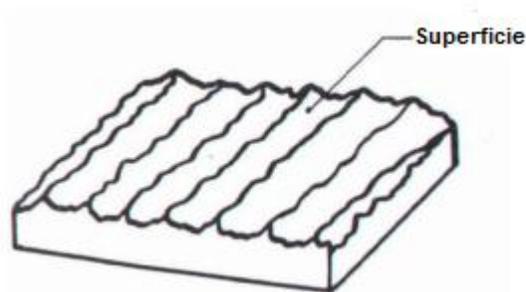
La fricción se define como la resistencia al movimiento relativo entre dos cuerpos en contacto. Al frotar un cuerpo contra otro, debe vencerse una resistencia. A esta fuerza que se opone al deslizamiento se le conoce como fricción. La figura 1 muestra esta relación.



**Figura 1 Aspectos de Fricción**

El valor de la fricción de un cuerpo deslizante es proporcional a la fuerza necesaria para vencerla.

Ninguna superficie metálica es completamente lisa; aún superficies con acabados que se aproximan a la perfección presentan asperezas cuando se examinan en un microscopio. Las diminutas protuberancias en una superficie interfieren el movimiento relativo de dos cuerpos cuando rozan entre sí dando origen a la fricción al tratar de entrelazarse y agarrarse. La figura 1.2 muestra rugosidades superficiales presentes en materiales de ingeniería a nivel microscópico.



**Figura 1.2 Rugosidad en Superficies**

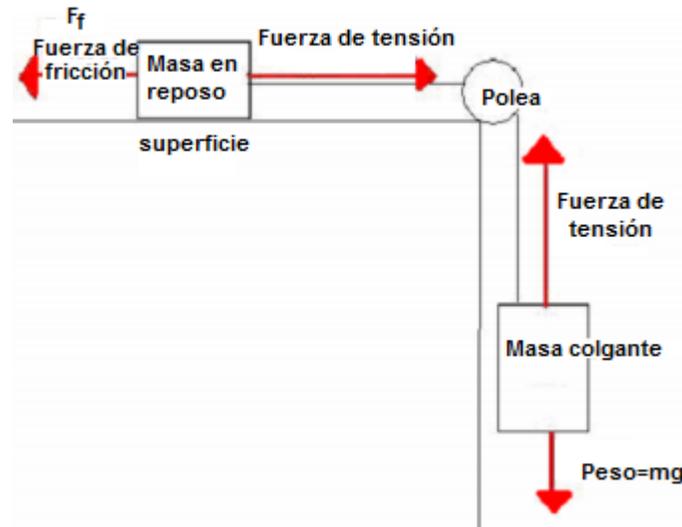
### **Efectos de fricción**

La fricción no sólo puede ser considerada desde el punto de vista negativo por los efectos que produce en las maquinarias; sino que también produce efectos positivos. Sin fricción no sería posible caminar (percibimos la sensación de esta dificultad cuando caminamos sobre el hielo), el frenado de un automóvil solo es posible gracias a la fricción.

En los órganos de las máquinas se considera a la fricción como indeseable porque casi todos requieren del deslizamiento de una parte contra otra. Para vencer la fricción se requiere trabajo y la energía gastada supone pérdida de potencia y eficiencia.

Además donde hay fricción sólida ocurre desgaste, pérdida de material por la acción cortante de las asperezas opuestas y el rompimiento de las minúsculas superficies soldadas. Uno de los problemas de los ingenieros es controlar la fricción; incrementar la fricción donde se requiere (frenos) y reducir donde no es conveniente (cojinetes) [6]. La fricción origina calor, produce pérdida de potencia y desgaste en las partes en movimiento.

La fricción es conceptualizada tradicionalmente en la forma de un bloque sobre una superficie horizontal. Se aplica una fuerza al bloque que tiende a moverlo a lo largo de la superficie, tal como lo muestra la figura 1.3



**Figura 1.3 Medición de Fricción**

Además de la fuerza horizontal  $F$ , también existe una fuerza normal  $N$  entre el bloque y la superficie, mostrada aquí como resultante del peso del bloque.

En la medida que se incrementa gradualmente la fuerza  $F$  desde un valor bajo, donde no hay movimiento del bloque debido a la fricción entre las dos superficies, posteriormente llega el momento en que la,  $F$  alcanza un cierto valor (llamado  $F_s$ )

que vence la fricción y el bloque comienza a deslizarse. Esto define el coeficiente de fricción estática ( $\mu_s$ ), que se determina según la fórmula 1.

$$\mu_s = \frac{F_s}{N} \quad [1]$$

Una vez que el bloque está en movimiento, la fuerza requerida para mantenerlo en movimiento baja a un valor  $F_k$ , que es la fuerza cinética. En la mayoría de la situaciones mecánicas, la fuerza cinética se aproxima al 75% de la fuerza estática, pero esto depende de los materiales involucrados; para alguna combinación de materiales la diferencia entre la fuerza cinética y estática es cero. El coeficiente de fricción cinética  $\mu$  se puede calcular según la fórmula siguiente:

$$\mu = \frac{F_k}{N} \quad [2]$$

Existen varias teorías que explican la fricción. La más aceptada es la teoría de la adhesión, la cual sostiene que dos superficies deslizantes (no lubricadas) están en contacto una con la otra solo en una pequeña fracción del área aparente entre ellas. Esto es verdad aun cuando las superficies sean bastante lisas. Cuando se observa en una vista muy amplificada, cada superficie se caracteriza por asperezas microscópicas que hacen contacto con su opuesta sólo en ciertos puntos. Estos puntos comprenden el área real de contacto  $A_r$  entre las dos superficies. A causa de que el área real soporta la carga normal, los esfuerzos involucrados en estos puntos de contacto son muy altos y conducen a deformaciones plásticas y adhesión en algunos casos. Debido a la naturaleza aleatoria de las superficies, algunas asperezas experimentan esfuerzos más grandes que otros, de manera que la adhesión ocurre solamente en los puntos donde los esfuerzos son muy altos y hay un contacto físico muy estrecho [7].

También depende del material en contacto y su condición (que tan limpia y seca está la superficie, por ejemplo). Para romper estos enlaces adhesivos conforme las superficies se mueven, una con respecto a la otra, se requiere una fuerza  $F$ , la cual se aplica contra las uniones como una fuerza cortante. Estas conexiones suman un área equivalente al área real de contacto. De la misma manera, la fuerza normal  $N$  implica la resistencia a la fluencia del material (la resistencia a la fluencia del material más débil es la apropiada aquí) aplicada sobre el área real de contacto. Entonces podemos definir el coeficiente de fricción de acuerdo a la teoría de adhesión como:

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{\tau A_r}{Y A_r} = \frac{\tau}{Y} \quad [3]$$

Donde:

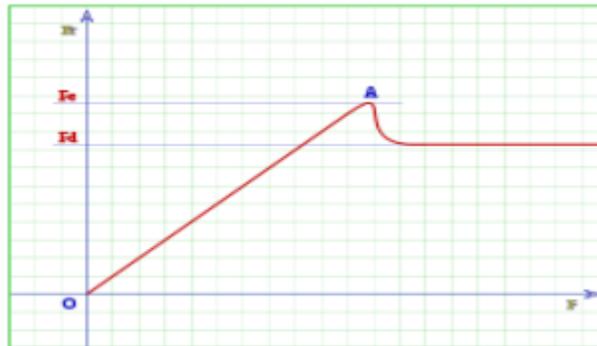
$\tau$ : Esfuerzo cortante.

$Y$ : Esfuerzo de fluencia a la compresión de las asperezas.

Existen dos tipos de rozamiento o fricción, la fricción estática ( $F_e$ ) y la fricción dinámica ( $F_d$ ). El primero es la resistencia que se debe superar para poner en movimiento un cuerpo con respecto a otro que se encuentra en contacto. El segundo, es la resistencia, de magnitud considerada constante, que se opone al movimiento pero una vez que éste ya comenzó.

En resumen, lo que diferencia a un roce con el otro, es que el estático actúa cuando los cuerpos están en reposo relativo en tanto que el dinámico lo hace cuando ya están en movimiento. La fuerza de fricción estática, necesaria para vencer la fricción homóloga, es siempre menor o igual al coeficiente de rozamiento entre los dos objetos (número medido empíricamente y que se encuentra tabulado) multiplicado por la fuerza normal. La fuerza cinética, en cambio, es igual al coeficiente de rozamiento dinámico, denotado por la letra

griega, por la normal en todo instante. No se tiene una idea perfectamente clara de la diferencia entre el rozamiento dinámico y el estático, pero se tiende a pensar que el estático es algo mayor que el dinámico, porque al permanecer en reposo ambas superficies pueden aparecer enlaces iónicos, o incluso micro soldaduras entre las superficies, factores que desaparecen en estado de movimiento. Éste fenómeno es tanto mayor cuanto más perfectas son las superficies. Un ejemplo bastante común de fricción dinámica es la ocurrida entre los neumáticos de un auto y el pavimento en un frenado abrupto. Se representa en el eje horizontal la fuerza  $F$  aplicada, y en el eje vertical la fuerza de rozamiento  $F_r$  [8].



**Figura 1.4 Fricción Dinámica**

Como comprobación de lo anterior, se realiza el siguiente ensayo, sobre una superficie horizontal se coloca un cuerpo, y le aplica un fuerza horizontal  $F$ , muy pequeña en un principio, se puede ver que el cuerpo no se desplaza, la fuerza de rozamiento iguala a la fuerza aplicada y el cuerpo permanece en reposo, en la gráfica de la figura 1.4 se representa en el eje horizontal la fuerza  $F$  aplicada, y en el eje vertical la fuerza de rozamiento  $F_r$ . Entre los puntos O y A, ambas fuerzas son iguales y el cuerpo permanece estático; al sobrepasar el punto A el cuerpo súbitamente se comienza a desplazar, la fuerza ejercida en A es la máxima que el cuerpo puede soportar sin deslizarse, y se denomina  $F_e$  o fuerza

estática de fricción; la fuerza necesaria para mantener el cuerpo en movimiento una vez iniciado el desplazamiento es  $F_d$  o fuerza dinámica, es menor que la que fue necesaria para iniciarlo ( $F_e$ ). La fuerza dinámica permanece constante. Si la fuerza de rozamiento  $F_r$  es proporcional a la normal  $N$ , y la constante de proporcionalidad es  $\mu$  entonces:

$$F_r = \mu N \quad [4]$$

Si permanece la fuerza normal constante, se puede calcular dos coeficientes de rozamiento: el estático y el dinámico como:

$$\mu_e = \frac{F_e}{N}, \quad \mu_d = \frac{F_d}{N} \quad [5]$$

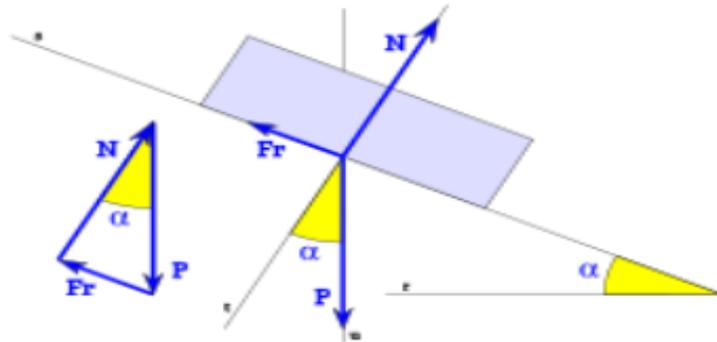
Donde el coeficiente de rozamiento estático  $\mu_e$  corresponde al de la mayor fuerza que el cuerpo puede soportar inmediatamente antes de iniciar el movimiento y el coeficiente de rozamiento dinámico  $\mu_d$  corresponde a la fuerza necesaria para mantener el cuerpo en movimiento una vez iniciado.

Se tiene un plano inclinado a un ángulo  $\alpha$ , y sobre este plano inclinado se coloca un cuerpo con rozamiento, se tendrán tres fuerzas que intervienen, como la que se muestra en la figura 5 se tiene:

P: el peso del cuerpo vertical hacia abajo según la recta  $u$ , y con un valor igual a su masa por la aceleración de la gravedad:  $P = mg$ .

N: la fuerza normal que hace el plano sobre el cuerpo, perpendicular al plano inclinado, según la recta  $t$

$F_r$ : la fuerza de rozamiento entre el plano y el cuerpo, paralela al plano inclinado y que se opone a su deslizamiento.

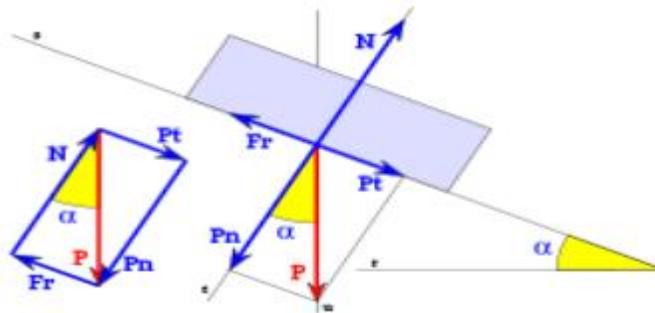


**Figura 1.5 Rozamiento en un plano inclinado (estático)**

Si el cuerpo está en equilibrio, no se desliza, la suma vectorial de estas tres fuerzas es cero:

$$P + Fr + N = 0$$

Gráficamente sería un triángulo cerrado formado por estas tres fuerzas, puestas una a continuación de otra, como se ve en la figura 6



**Figura 1.6. Triángulo cerrado formado por estas tres fuerzas.**

Si el peso  $P$  del cuerpo se descompone en dos componentes:  $Pn$ , peso normal, perpendicular al plano, que es la componente del peso que el plano inclinado

soporta y  $P_t$ , peso tangencial, que es la componente del peso tangencial al plano inclinado y que tiende a desplazar el cuerpo descendientemente por el plano inclinado. Se puede ver que el  $P_n$  se opone a la normal,  $N$ , y el peso tangencial  $P_t$  a la fuerza de rozamiento  $F_r$ .

Se puede decir que el  $P_n$  es la fuerza que el cuerpo ejerce sobre el plano inclinado y la normal,  $N$ , es la fuerza que el plano inclinado hace sobre el cuerpo impidiendo que se hunda,  $P_n = N$  para que este en equilibrio.

El peso tangencial  $P_t$  es la fuerza que hace que el cuerpo tienda a deslizarse por el plano y  $F_r$  es la fuerza de rozamiento que impide que el cuerpo se deslice, para que este en equilibrio  $P_t = F_r$ .

$$P_n = N$$

$$P_t = F_r$$

Cuando el cuerpo está en equilibrio estas dos ecuaciones determinan la igualdad de fuerzas, también es necesario saber que:

$$F_r = \mu_e N$$

$$P = mg \quad [6]$$

Y que la descomposición del peso es

$$P \cos \alpha = N$$

$$P \sin \alpha = \mu_e N \quad [8]$$

Se sustituye  $N$ :

$$P \sin \alpha = \mu_e P \cos \alpha$$

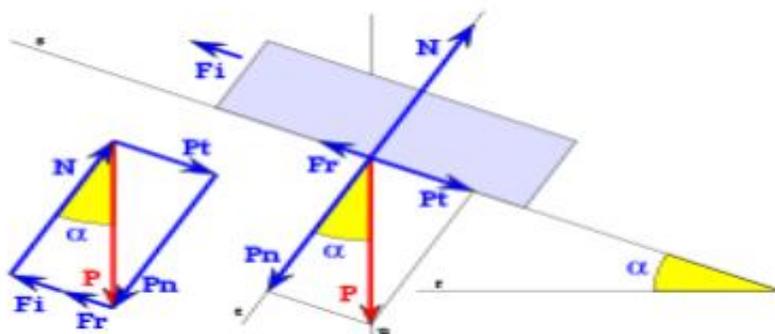
Que da finalmente como resultado:

$$\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha = \mu_e \quad [7][9]$$

El coeficiente de rozamiento estático es igual a la tangente del ángulo del plano inclinado, en el que el cuerpo se mantiene en equilibrio sin deslizar, ello permite calcular los distintos coeficientes de rozamiento, simplemente colocando un cuerpo de un material concreto sobre un plano inclinado del material con el que se pretende calcular su coeficiente de rozamiento, inclinándolo el plano progresivamente se observa el momento en el que el cuerpo comienza a deslizarse, la tangente de este ángulo es el valor del coeficiente de rozamiento.

Del mismo modo conocido el coeficiente de rozamiento entre dos materiales podemos saber el ángulo máximo de inclinación que puede soportar sin deslizarse.

En el caso de rozamiento dinámico en un plano inclinado, se tiene un cuerpo que se desliza, y siendo que está en movimiento, el coeficiente que interviene es el dinámico  $\mu_d$ , así como una fuerza de inercia  $F_i$ , que se opone al movimiento, el equilibrio de fuerzas se da cuando Figura 1.7:



**Figura 1.7 Rozamiento en un plano inclinado (dinámico)**

$$P + F_r + N + F_i$$

Al descomponer los vectores en sus componentes normales y tangenciales se tiene:

$$P_n = N \quad y \quad P_t - F_r = F_i$$

Teniendo en cuenta que:

$$F_r = \mu_d N \quad P = mg \quad F_i = ma$$

Y como en el caso de equilibrio estático, se tiene:

$$P_n = P \cos \alpha$$

$$P_t = P \sin \alpha$$

Con estas ecuaciones se determina las condiciones del equilibrio dinámico del cuerpo con fricción en un plano inclinado. Si el cuerpo se desliza sin aceleración (a velocidad constante) su fuerza de inercia  $F_i$  será cero, y se puede ver que:

$$P \sin \alpha = \mu_d P \cos \alpha$$

Esto es, de forma semejante al caso estático:

$$\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha = \mu_d \quad [10]$$

Por tanto el coeficiente de rozamiento dinámico de un cuerpo con la superficie de un plano inclinado, es igual a la tangente del ángulo del plano inclinado con el que el cuerpo se desliza sin aceleración, con velocidad constante en el plano.

### **Estados de Fricción**

Existen diferentes estados de fricción que dependen directamente de los materiales en contacto y se clasifican en:

- **Fricción metal-metal.**

La fricción metal-metal es un estado de fricción que se presenta en diferentes fenómenos tribotécnicos. Tiene lugar en un elemento lubricado como consecuencia del rompimiento de la película límite o por agotamiento de los aditivos antidesgastes del lubricante. La fricción metal-metal no siempre se debe evitar. Hay casos en donde es imprescindible que ocurra, como por ejemplo en las líneas de ferrocarril, en donde es necesario que las superficies estén completamente exentas de algún tipo de lubricante para poder rodar y frenar rápidamente [9].

- **Fricción pura.**

Es un estado de fricción en el cual el sistema tribológico está constituido por dos elementos que corresponden a los materiales base. La fricción pura raras veces se encuentra en la práctica industrial y por lo general, se obtiene a nivel de laboratorio, bajo un control muy riguroso de los experimentos. Durante la fricción pura las superficies están libres de cualquier película contaminante. La magnitud del coeficiente de fricción pura varía entre 0.8 a 10 y más.

- **Fricción sólida.**

Estado de fricción en el cual el sistema tribológico está constituido por tres elementos que presentan características de cuerpos sólidos. Durante la fricción sólida el tercer elemento está presente en forma de capas de un compuesto

adheridas al metal base. En la práctica industrial este estado de fricción se halla ampliamente difundido. Se entienden como compuestos la película límite de aditivo antidesgaste, las capas de óxidos, suciedad, etc. La magnitud del coeficiente de fricción varía entre 0.2 a 0.8.

### **1.2.2 Desgaste**

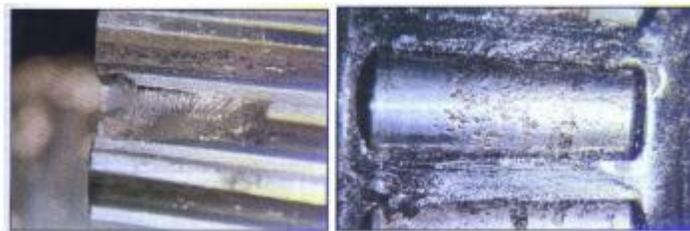
El desgaste puede definirse como la remoción del material superficial como resultado de una acción mecánica (movimiento relativo entre dos superficies sólidas). En la mayoría de los casos el desgaste ocurre por la interacción de asperezas superficiales de los pares en contacto.

Existen cuatro formas principales o mecanismos de desgaste: adhesivo, abrasivo, por fatiga, por impacto y químico

- 1. Desgaste adhesivo**, se presenta cuando dos superficies suaves se deslizan una sobre otra, y fragmentos son arrancados de una superficie para adherirse a la otra, a causa de las fuerzas adhesivas entre los átomos adyacentes a través de la superficie de contacto.
- 2. Desgaste abrasivo**, se presenta cuando una superficie dura y rugosa se desliza sobre una superficie más suave, el resultado es una serie de ralladuras en el material suave y la formación resultante de partículas de desgaste.
- 3. Desgaste por fatiga**, se presenta cuando se tiene deslizamiento y aplicación de carga repetida, que provocan la formación de grietas que causan la falla del material.
- 4. Desgaste por impacto**, comprende dos fenómenos de desgaste combinados, el erosivo y por fatiga, que causan la falla del material.
- 5. Desgaste químico**, también llamado corrosivo se da cuando el deslizamiento entre dos superficies tiene lugar en un ambiente corrosivo.

### **Desgaste Adhesivo**

En los puntos de contacto reales entre dos superficies en deslizamiento, puede ocurrir la adhesión instantáneamente entre las asperezas de cada superficie y con el movimiento, los contactos adheridos son cortados por el deslizamiento generando fragmentos. Los fragmentos resultantes pueden quedar adheridos y transferidos a la otra superficie o bien desprenderse y ser partículas de desgaste libres. El desgaste por adhesión también puede ocurrir átomo a átomo, resultando una huella de desgaste muy suave. Este tipo de desgaste se produce debido a las importantes fuerzas de adhesión que aparecen cuando dos superficies entran en contacto. Durante el deslizamiento, se puede formar un contacto entre las dos superficies, y existe una pequeña probabilidad de que cuando la unión se rompa, lo haga en una interfaz diferente a la original, de modo que un elemento transferido se habrá formado. El aspecto de la superficie desgastada será de ciertas ralladuras irregulares y superficiales. Se presenta cuando las irregularidades de una superficie interactúan directamente con las de otra, se adhieren y se sueldan, dando lugar en la mayoría de los casos al desprendimiento de partículas. En la figura 1.8 se muestra este tipo de desgaste.



**Figura 1.8 Desgaste por adhesión**

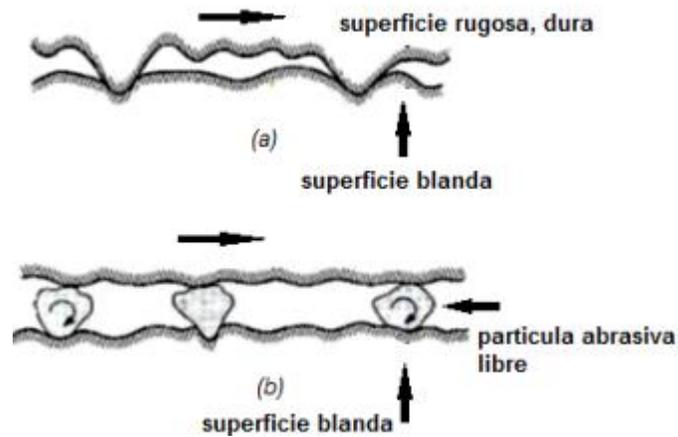
Las causas que pueden generar este tipo de desgaste son: falta de aplicación de un lubricante; rompimiento de la película límite por agotamiento o por sobrecarga.

Un bajo nivel; viscosidad o presión del aceite en el sistema; un alto nivel, viscosidad o presión del aceite en el sistema.

### **Desgaste abrasivo**

Este tipo de desgaste sucede cuando asperezas de una superficie dura o en partículas libres duras deslizan sobre una superficie más blanda y producen daño en esta superficie por deformación plástica y fractura. Las dos situaciones de desgaste abrasivo son presentadas en la figura 1.9. En el primer caso, la superficie más dura de las dos que rozan (abrasión de un cuerpo sobre otro) produce abrasión en la superficie más blanda y en el segundo caso, la parte más dura es el tercer cuerpo generalmente pequeñas partículas abrasivas atrapadas entre las dos superficies y lo suficientemente duras como para producir abrasión en una o ambas superficies del contacto (abrasión por tercer cuerpo). En algunos casos el mecanismo de desgaste puede ser adhesivo al inicio, con lo que se generan partículas de desgaste que quedan atrapadas en la Interface actuando como un tercer cuerpo de desgaste abrasivo.

La figura 1.9 muestran dos formas de desgaste abrasivo: (a) una superficie áspera y dura deslizando sobre una superficie más blanda y (b) partículas abrasivas libres (tercer cuerpo) atrapadas entre las superficies.



**Figura 1.9 Formas de desgaste abrasivo**

Es el resultado de la presencia entre las superficies en movimiento relativo de partículas extrañas de igual o mayor dureza a la de los materiales que los conforman. Las partículas abrasivas se incrustan ellas mismas en una de las superficies y actúan como una herramienta de corte, removiendo material de la otra superficie.

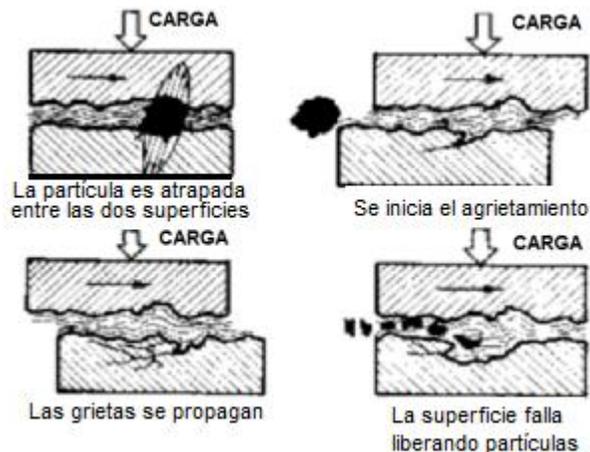
Las causas que pueden provocar este tipo de desgaste son: problemas de filtración; presencia de partículas sólidas de igual o mayor tamaño al juego dinámico; presencia de partículas sólidas de menor tamaño al juego dinámico con incremento de la carga; las partículas sólidas provienen de algún otro tipo de desgaste o del medio ambiente.

### **Desgaste por fatiga**

La fatiga en la superficie y debajo de la superficie se observa durante deslizamiento y apisonamiento repetido. Los ciclos repetidos de carga y descarga a los cuales los materiales son expuestos pueden inducir la formación de grietas superficiales, que eventualmente, después de un número crítico de ciclos resultarán en la rotura de la superficie. Antes de este punto crítico el desgaste del material es despreciable, lo que no sucede con el desgaste causado por un

mecanismo adhesivo o abrasivo, donde el desgaste causa un deterioro gradual del material desde el inicio del proceso. Por lo tanto, la cantidad de material eliminado debido a la fatiga no es un parámetro útil. Mucho más relevante es la vida útil en términos del número de revoluciones o ciclos de trabajo antes de que ocurra la falla por fatiga.

La fatiga superficial se presenta como consecuencia de los esfuerzos cíclicos de tensión, compresión y esfuerzos cortantes sobre una superficie, como se observa en la figura 1.10 los cuales dan como resultado grietas profundas de fatiga que causan finalmente la aparición de picaduras y escamas.



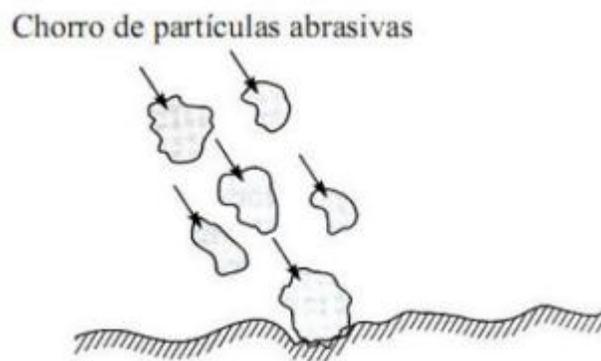
**Figura 1.10 Proceso de desgaste por fatiga**

### **Desgaste por impacto**

El desgaste por impacto comprende dos amplios tipos de fenómenos de desgaste: el erosivo (partículas al azar) y el percusivo (impactos repetidos en un punto). La erosión puede ocurrir por chorros y flujos de partículas sólidas pequeñas transportadas por un fluido, en general aire o agua, o también por gotas líquidas. La percusión ocurre por impactos repetidos de cuerpos sólidos de

tamaño mayor. La figura 1.11 muestra el mecanismo de erosión causado por el choque de partículas sólidas.

Esto es una forma de abrasión, que generalmente se trata diferente porque la presión del contacto crece con la energía cinética del flujo de partículas en un chorro de aire o líquido cuando encuentra la superficie. La velocidad de las partículas, el ángulo de impacto y el tamaño medio de las partículas de abrasivo dan una medida de la energía cinética de las partículas que chocan. Como en el caso del desgaste abrasivo, el desgaste erosivo ocurre por deformación plástica y fractura frágil, dependiendo del material que está siendo erosionado y de los parámetros de operación.



**Figura 1.11 Mecanismo de erosión por choque de partículas sólidas.**

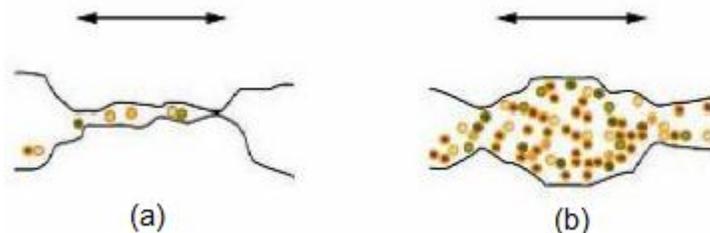
Los materiales dúctiles experimentan desgaste por deformación plástica. En los materiales frágiles, en cambio, el material es removido por la formación e intersección de grietas que se difunden desde el punto de impacto de la partícula erosionada. El desgaste por percusión se da por el impacto repetitivo de un cuerpo sólido, (martillado). En la mayoría de las aplicaciones prácticas de maquinaria, el impacto está asociado con deslizamiento ejerciendo fuerzas con componentes normal y tangencial conocidas como impacto compuesto. El desgaste percusivo ocurre por mecanismos de desgaste híbridos los cuales

combinan varios de los siguientes mecanismos: adhesivo, abrasivo, fatiga superficial, fractura y desgaste triboquímico.

### **Desgaste triboquímico**

El desgaste triboquímico o corrosivo ocurre cuando el deslizamiento entre dos superficies tiene lugar en un ambiente corrosivo, la figura 1.12 ilustra este tipo de desgaste. En aire, el medio corrosivo más dominante es el oxígeno. Por tanto el desgaste químico en aire generalmente es llamado desgaste por oxidación. En la ausencia de deslizamiento los productos químicos de corrosión (es decir, óxidos) podrían formar una película que podría detener la corrosión, pero la acción por deslizamiento desgasta la película, así que el ataque químico puede continuar. De esta forma, el desgaste químico requiere ambas, la reacción química (corrosión) y el frotamiento.

En la figura 1.12 e muestra el desgaste químico entre dos superficies en deslizamiento, (a) inicio el desgaste y (b) desgaste avanzado de las superficies.



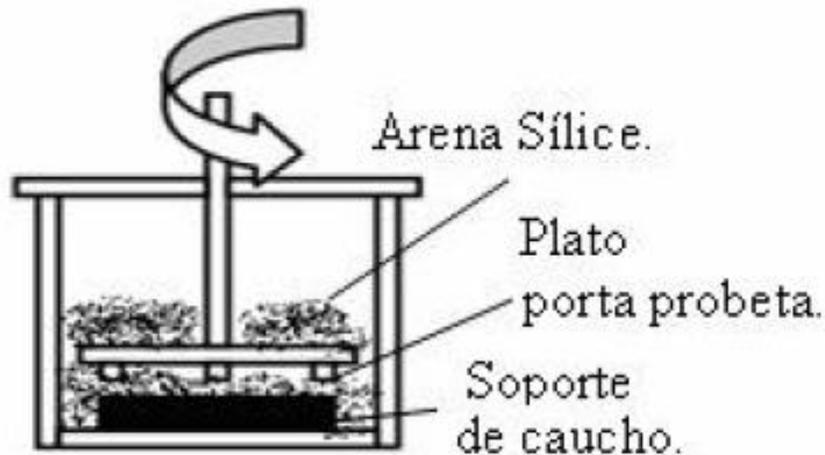
**Figura 1.12 Desgaste químico entre dos superficies en deslizamiento**

### **1.3. Máquinas de desgaste.**

En la búsqueda de información sobre máquinas de desgaste se han encontrado 5 tipos de máquinas que se pueden utilizar para el objetivo el trabajo con sus características que se describen a continuación:

### 1.3.1. Máquina de desgaste abrasivo de plato horizontal [10].

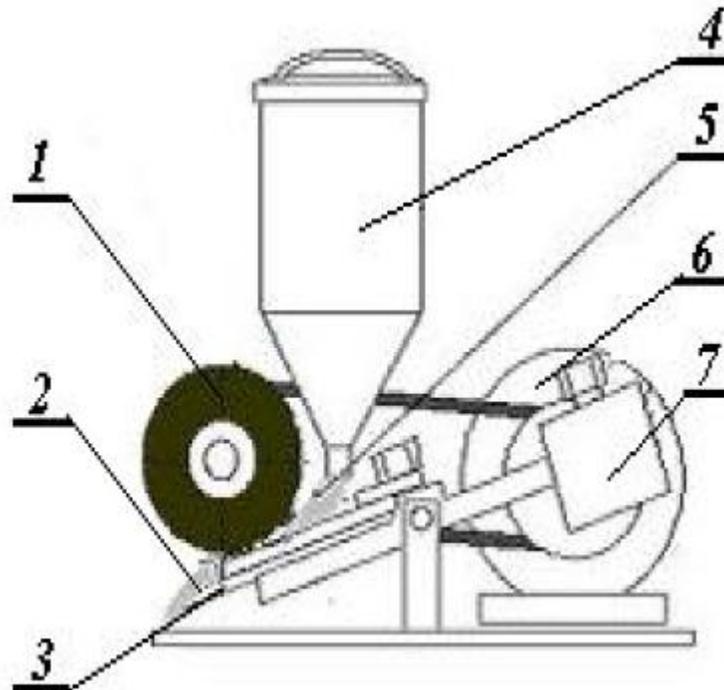
Esta máquina muy sencilla se muestra en la figura 1.13 con una carga de 50 N, 500 r.p.m. en intervalos de 20 minutos para las prueba realizadas en la misma.



**Figura 1.13. Máquina de desgaste abrasivo de plato horizontal.**

### 1.3.2. Máquina de ensayo por abrasión del tipo Fargo [11].

Esta máquina se muestra en la figura 1.14 y se observa como la muestra se comprime contra el rodillo de goma bajo una carga de 44 N, al parecer no aparecen datos sobre la cantidad de arena y su control, el peso que debe ocasionar la presión con la probeta, ni tampoco la cantidad arena, etc.



**Figura 1.14. Esquema de la máquina por abrasión del tipo Fargo.**

- 1) Rueda de goma, (2) Probeta, (3) Porta muestra, (4) Tolva de arena, (5) Arena sílice, (Motor) y (7) Peso**

### **1.3.3. Tribómetro montado sobre un torno [12]**

En este dispositivo se acopla un tribómetro sobre un torno para aprovechar la potencia y la caja reductora del mismo. En la figura 1.15 (a y b) se muestra el montaje del tribómetro. Se utiliza el plato de tres mordazas del torno que soporta un acople (A) al cual se monta una de las piezas a ensayar (B). La pieza estática del ensayo (C) se monta sobre el brazo de la palanca (D) y en un extremo de la misma se aplica una carga (E), que será transmitida por el brazo de la palanca a la carga aplicada sobre la pieza estática. Por debajo se sitúa un recolector de partículas de desgaste (F), con el fin de evaluar la cantidad de material desprendido. No se dan datos sobre la carga, tipo de arena, etc.

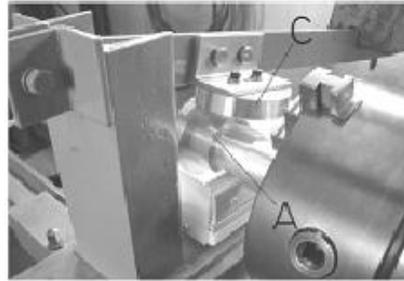
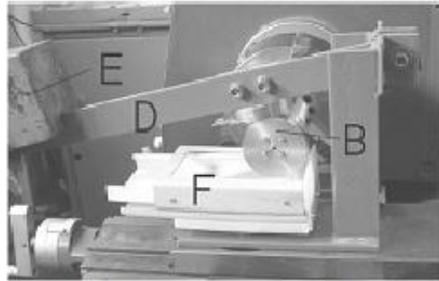
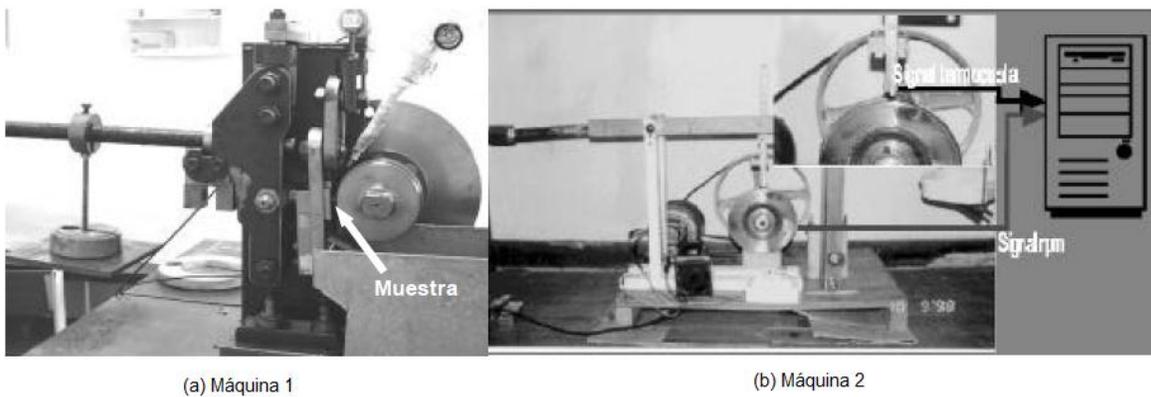


Figura 1.15.(a) Tribómetro acoplado a un torno    Figuras 1.15 (b) Vista superior del dispositivo

**Figura 1.15. Tribómetro acoplado a un torno.**

**1.3.4. Equipos de ensayos por abrasión del tipo pin on ring [13].**

Estos son dos equipos utilizados para los ensayos de desgaste y se muestran en la figura 1.16.



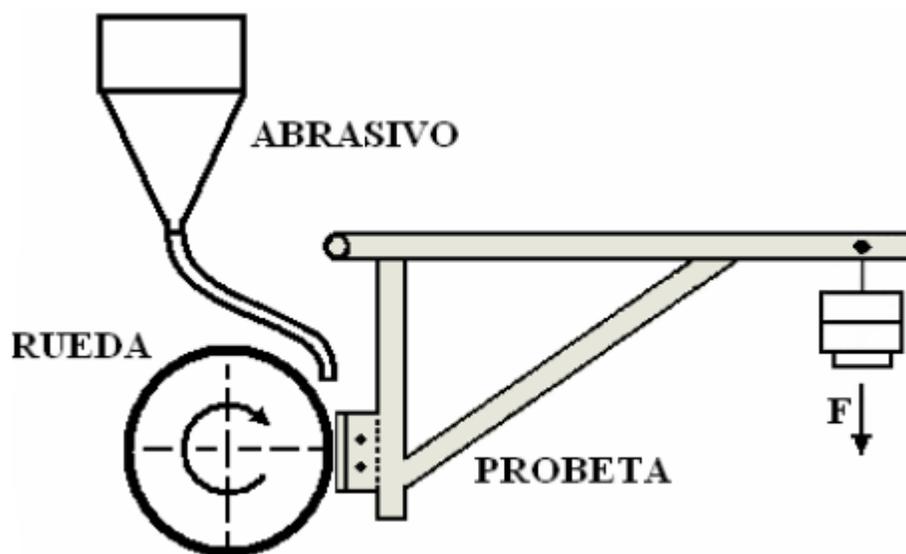
**Figura 1.16. Equipos de ensayos por abrasión del tipo pin on ring.**

No se brindan datos para poder realizar las pruebas, tales como: presión de contacto, tipo de arena, etc.

### 1.3.5. Máquina para ensayo por abrasión según norma ASTM G-65 [14].

Esta máquina es muy completa, permite regular las revoluciones de la rueda, la presión de la probeta, el flujo de la cantidad de arena y otras variables necesarias para su diseño y uso.

Es por esto que se selecciona esta máquina para el cumplimiento de nuestro trabajo, además existe una construida en la Universidad de Oriente. En la figura 1.17 se muestra un esquema de la máquina.



**Figura 1.17. Máquina para ensayo por abrasión según norma ASTM G-65 [15].**

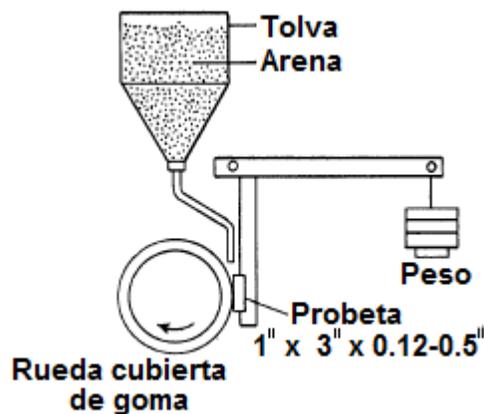
A continuación se realiza una descripción de la misma y las características y usos de sus diferentes partes.

### 1.4. Estudio de las diferentes partes de la máquina de ensayo por abrasión según norma ASTM G-65

La máquina de ensayo por abrasión basada en la norma **ASTM G65** utiliza arena seca y una rueda de goma, tal y como se muestra en la figura 1.18. La arena seca o abrasivo se introduce entre la pieza de ensayo y una rueda rotatoria recubierta

de goma (clorobutilo) de una dureza específica. La pieza de ensayo es presionada contra la rueda rotatoria a una fuerza específica por medio de un brazo palanca, mientras que un flujo controlado de arena desgasta la superficie de la muestra. La rotación de la rueda es tal que su cara superficial se mueve en la dirección del flujo de arena. Observe que el pivote central del brazo palanca se encuentra dentro de un plano que se encuentra tangente con relación a la superficie de la rueda de goma y normal con relación al  $\emptyset$  en el cual se aplica la carga. La duración del ensayo y la fuerza aplicada por la palanca varía según sea el procedimiento seleccionado, existen varios procedimientos [14].

Las muestras se pesan antes y después del ensayo y se registra la pérdida de masa. Es necesario convertir las pérdidas de masa en milímetros cúbicos debido a las grandes diferencias de densidad entre los diversos materiales. La abrasión se reporta como pérdida de volumen por el procedimiento especificado.



**Figura 1.17 Esquema del método de ensayo por abrasión con arena y una rueda de goma.**

#### **1.4.1. Partes principales de la máquina de desgaste.**

La máquina de referencia se muestra en las figuras 1.18, 1.19 y 1.20 y sus principales partes son: motor, poleas y correa, chumaceras, chasis, disco encauchado, brazo porta probeta, tolva con arena y el peso.



**Figura 1.18. Vista lateral de la máquina**

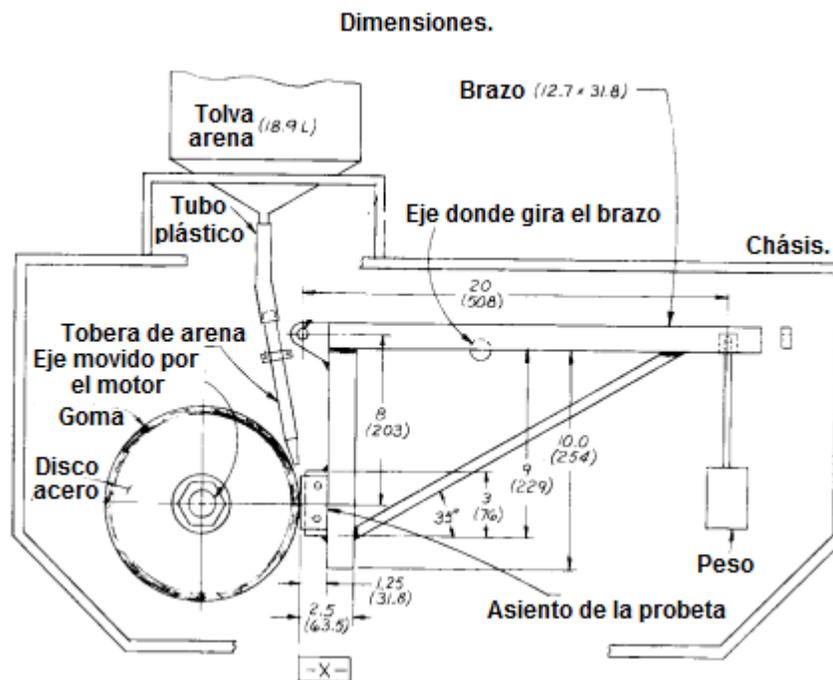


**Figura 1.19. Vista superior de la máquina**

La agresividad del desgaste abrasivo en cualquier sistema depende del tamaño de la partícula abrasiva, la forma, la dureza, la magnitud de la tensión impuesta por la partícula y la frecuencia de contacto de la partícula abrasiva. Este proceso se normaliza para obtener una condición uniforme de desgaste al que se le da el nombre de abrasión por rayado [1,2]. Los datos de pérdida de volumen obtenidos de los materiales de ensayo cuyo comportamiento es desconocido en un entorno abrasivo específico pueden ser, sin embargo, comparados con los datos obtenidos de un material cuyo comportamiento en el mismo entorno es conocido.

La comparación dará una indicación general del valor de los materiales desconocidos si la abrasión es el factor predominante que causa el deterioro de los materiales.

Existen varios elementos de importancia para asegurar la uniformidad en los resultados de ensayo. Estos son: los tipos de goma usados en la rueda, el tipo de abrasivo, la forma, posición y tamaño de la abertura de la boquilla y un sistema adecuado de brazo palanca para aplicar la fuerza requerida.

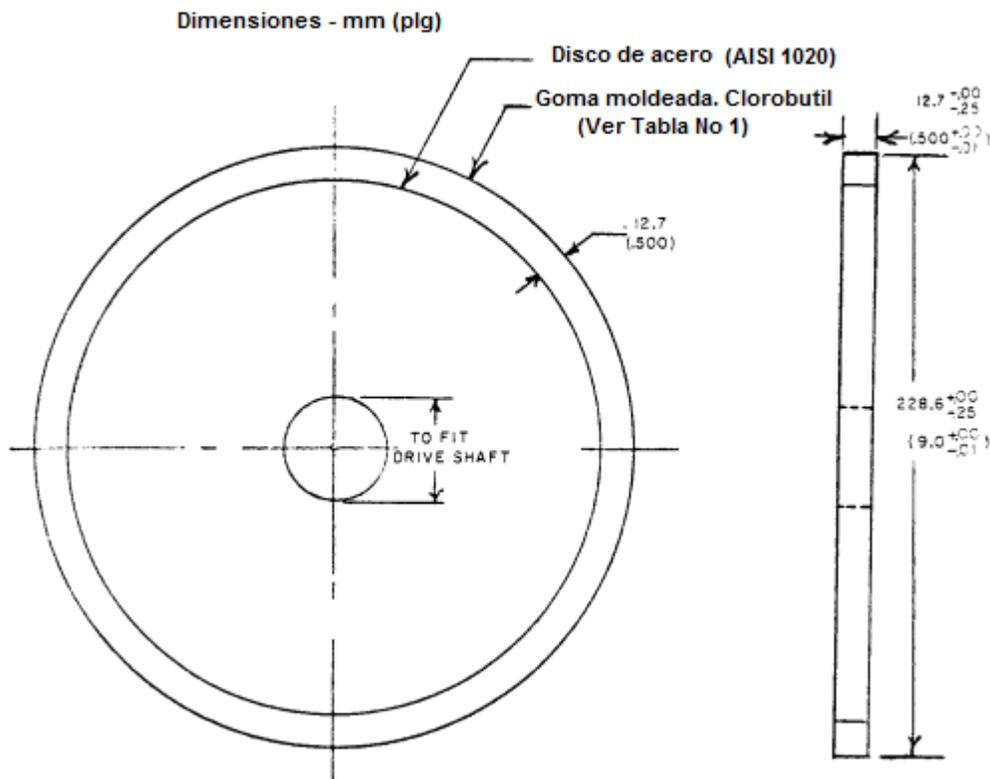


**Figura 1.20. Máquina de prueba mediante arena seca y una rueda de goma**

### Rueda de goma.

La **rueda** mostrada en la Fig. 1.21 consiste en un disco de acero con una capa externa moldeado en toda su periferia de clorobutilo. La goma no curada se adhiere a la llanta y luego se cocina con un molde de acero. La dureza máxima de

la goma curada es la Durometer A-60. Un rango entre A58 y 62 es aceptable. Se deberán hacerse por lo menos cuatro lecturas con la goma, aproximadamente a 90° alrededor de la periferia de la rueda, usando un dispositivo de ensayo Shore A Durometer, de acuerdo con el Método de Ensayo D 2240. Las lecturas del indicador serán tomadas después de una pausa de 5 segundos. En la Tabla 1 se pueden observar la composición recomendada de la goma y la fuente de moldeo calificada.



**Figura 1.21. Rueda con goma**

**Tabla 1. Fórmula de la goma Clorobutilo**

<b>Materiales</b>	<b>Proporciones en peso</b>
Chlorobutyl No. HT 10-66 (Enjay Chemical)	100
Agerite Staylite-S	1
HAF black	60
Circolight oil	5
Stearic acid	1
Zinc oxide	5
Ledate	2

**Nota 1. Gravedad específica muestra: 1.15**

**Presión de cura: 20 min a 160°C**

### **Abrasivo.**

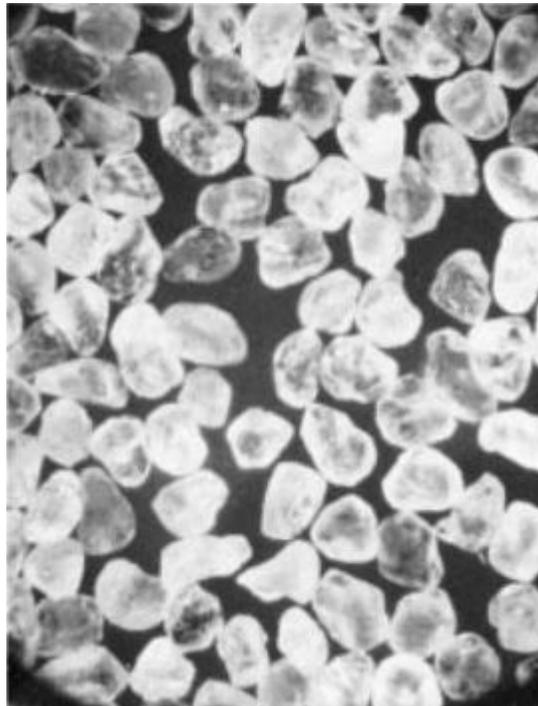
El **tipo de abrasivo** es una arena de grano de cuarzo, según se tipifica en la norma Arena de Ensayo AFS 50/70 (Fig.1.22). El contenido de humedad no debe exceder del 0.5% del peso. La arena que tiene presencia de humedad puede afectar los resultados del ensayo. El contenido de humedad puede ser determinado midiendo la pérdida de peso después de calentar la muestra hasta aproximadamente 120°C (250°F) con 1 hora como mínimo. Si la arena de ensayo contiene una humedad excesiva del 5% esta debe ser secada mediante calentamiento hasta 100°C (212°F) por 1 hora como mínimo y el ensayo de humedad debe ser repetido. En zonas de alta humedad la arena puede ser almacenada con efectividad en locales con temperatura y humedad constantes o en recipientes herméticos de acero equipados con un bombillo eléctrico de 100-W. También resultan adecuados los hornos de secado de electrodos de soldadura que pueden obtenerse de los suministradores de equipos de soldadura. El uso repetido de la arena puede afectar los resultados del ensayo por lo que no es recomendable.

La arena de ensayo AFS 50-70 debe tenerse en el siguiente rango de tamaño: usando mallas de EE UU (Especificación E 11).

---

Tamaño de la Malla de EE UU / Abertura de la Malla / % Retenido en la malla

40 425  $\mu\text{m}$  (0.0165 pulg.) ninguno  
50 300  $\mu\text{m}$  (0.0117 pulg.) 5 max  
70 212  $\mu\text{m}$  (0.0083 pulg.) 95 min  
100 150  $\mu\text{m}$  (0.0059 pulg.) ninguno pasa



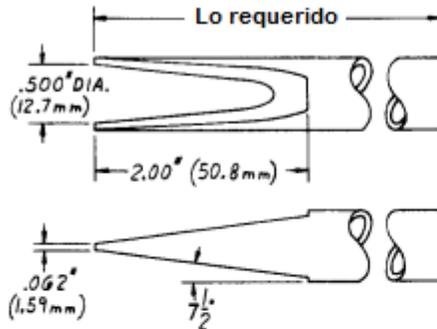
**Figura 1.22. Arena sílice de Ottawa AFS 50/70. Aumento 25X**

**Boquilla de la arena.**

En la figura 1.23 se muestra el diseño de la boquilla y por la misma fluye una cantidad adecuada de arena. La boquilla debe tener una longitud conveniente, de manera tal que pueda desplazarse a una velocidad de 300 a 400 g/min. Durante su uso, la abertura de la boquilla debe colocarse tan cerca de la unión de la muestra de ensayo con la rueda de goma como lo permita el diseño (Figura 1.24).

**Diseño de la boquilla para la alimentación de la arena**

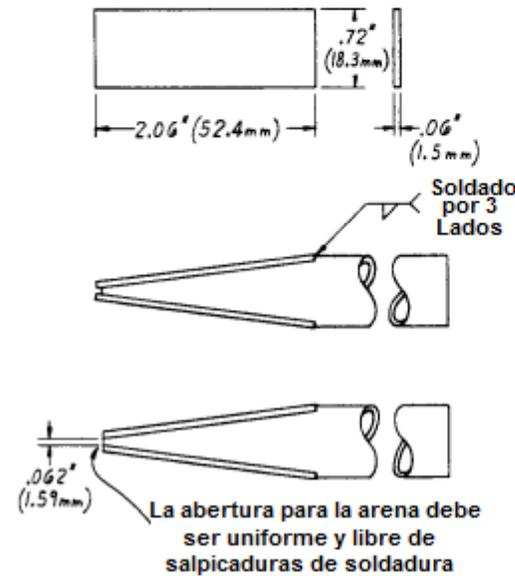
**Pieza 1 Lo requerido**



- 1- 3/8" SCHEDULE 40 STAINLESS PIPE OR METRIC EQUIVALENT. O.D. - 0.675" (17.0 mm) I.D. - 0.493" (12.4 mm) CUT TO LENGTH AS REQUIRED
- 2- MACHINE I.D. TO 0.500" (12.7mm)

- 3- MILL 7-1/2° TAPER ON O.D. TO OBTAIN FLAT SURFACE LEAVING A BUTT EDGE 2.00" (50.8mm) FROM BEGINNING OF TAPER

**Pieza 2 Lo requerido**



- 4- STAINLESS STEEL STRIP 16 GAGE GAGE OR METRIC EQUIVALENT. THICKNESS 0.063" (1.59mm) MACHINE TO SIZE AND FLATTEN

- 5- WELD FLAT SECTION OF (ITEM2) TO TAPERED SURFACES OF (ITEM 1)
- 6- GRIND END OF NOZZLE TO OBTAIN 0.062 (1.59mm) WIDTH OF SLOT

- 7- DETERMINE FLOW RATE OF NOZZLE USING AFS 50/70 TEST SAND (300 TO 400g/MIN)

- 8- TO INCREASE FLOW RATE GRIND BACK NOZZLE END IN 0.004" (0.10mm) INCREMENTS.

**Figura 1.23. Boquilla de arena**

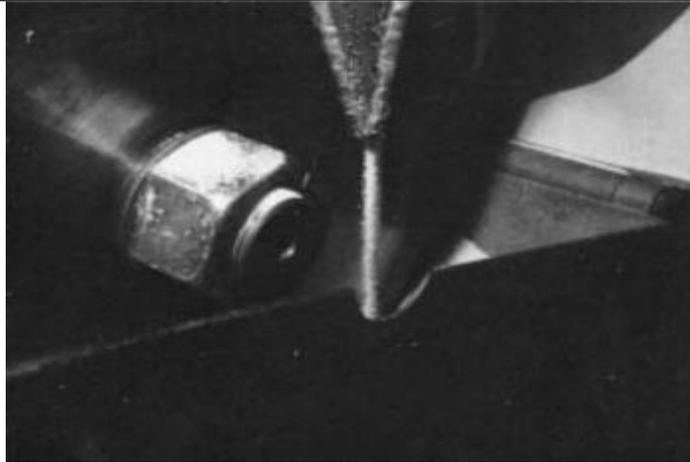
Para la construcción de la boquilla pueden ser usados cualquier material conveniente de construcción como tubos soldados o sin costuras que estén disponibles. Se prefiere el acero inoxidable debido a su resistencia a la corrosión y facilidad de soldadura. El cobre y el acero también pueden ser usados con éxito.

### **Boquillas de tubos.**

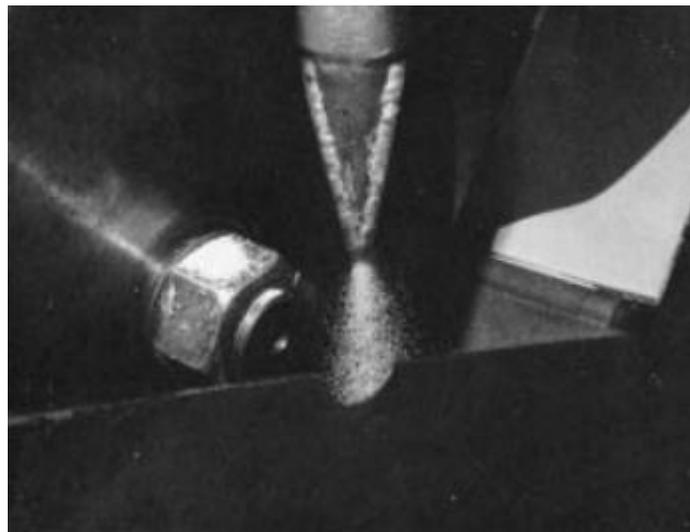
Las boquillas hechas de tubos pueden ser usadas solamente cuando duplican el tamaño y la forma (orificio rectangular y estrecho) y las características del flujo de arena (velocidad de flujo y flujo racionalizado) de las boquillas industriales. (Ver Fig. 1.25 y 1.26



**Figura 1.24. Posición de la tobera de arena**



**Figura 1.25. Flujo de arena aerodinámico**



**Figura 1.26. Flujo de arena turbulento**

**Flujo de arena.**

La boquilla debe propiciar una velocidad de flujo de 300 a 400g/min.

**Cortina de arena.**

En la figura 1.25 se muestra un flujo de arena aerodinámica apropiada y con una forma estrecha de la cortina de arena a medida que sale de la boquilla. Un flujo de arena turbulento, como puede verse en la figura 1.26, produce malos resultados.

El propósito es que el flujo de arena fluya de manera uniforme y pase entre la muestra y la rueda de goma

**Motor.**

La rueda es accionada por un motor de 0.7-kW (1-hp) DC a través de una caja de velocidad de 10/1 para asegurar que se produzca una fuerza de torsión total durante el ensayo. La velocidad ( $200 \pm 10$  rpm) debe permanecer constante bajo carga.

**Soporte de la muestra y brazo de la palanca.**

El soporte de la muestra está incorporado al brazo palanca al cual se añaden los pesos, de forma tal que se aplique una fuerza a lo largo de la línea diametral horizontal de la rueda. Debe haber disponible un número apropiado de pesos para aplicar la fuerza apropiada (Tabla 2) entre la muestra y la rueda.

**Balanza analítica.**

La balanza analítica utilizada para medir la pérdida de masa de la muestra de ensayo deberá tener una sensibilidad de 0.001 g.

**1.4.2 Preparación de la muestra y muestreo.**

**Materiales.**

Es el propósito de este método permitir el ensayo de abrasión de cualquier material, incluyendo metales forjados, metales fundidos, recubrimientos de soldaduras eléctricas o por llama, rociado por plasma, metales en polvo, electro recubrimientos, materiales metal cerámicos, cerámica, etc. El tipo de material determina, hasta cierto punto, el tamaño total de la muestra de ensayo.

**Muestra típica de forma rectangular.**

La muestra es rectangular de 25 por 76 mm y entre 3.2 y 12.7 mm de espesor. El tamaño puede variar de acuerdo con las necesidades del usuario, con la restricción de que la longitud y el ancho sean suficientes como para poder mostrar la longitud total de la huellas de desgaste de la forma en que se produjo en el

ensayo. La superficie de prueba debe ser plana, dentro de los 0.125 mm como máximo.

**Material de las muestras.**

Las muestras deben ser obtenidas y trabajadas desde el mismo material en bruto hasta que alcancen el tamaño adecuado.

**Depósitos de cordones con soldadura eléctrica y con llama.**

En ocasiones se realizan depósitos mediante soldadura eléctrica o con llama y se aplican a una superficie plana de la muestra de ensayo. Se recomiendan pases de dobles cordones de soldadura para evitar el debilitamiento de la soldadura por el metal base. El calor de la soldadura puede deformar la muestra de ensayo y cuando esto ocurre se puede enderezar mecánicamente. Para poder producir una huella de desgaste adecuada, la superficie que va a ser desgastada por la fricción debe estar lisa para que tenga una superficie suave con, al menos, 63.4 mm de largo y 19.1 mm de ancho para el ensayo. Se debe observar que la soldadura tiene un efecto sobre la resistencia a la abrasión del depósito de la soldadura.

**Acabado.**

Las muestras de ensayo deben tener un acabado suave, plano y libre de costra. Los defectos superficiales tales como poros y rugosidades pueden influir en los resultados del ensayo y tales muestras deben ser evitadas a menos que la superficie como tal se quiera someter a una investigación. Las superficies típicamente adecuadas son las que han pasado por un molino de rodillos como en el caso del acero laminado en frío y depósitos similares, superficies planas y superficies que han pasado por rodillos o han sido maquinadas y tienen un acabado fino. Un acabado superficial plano de 0.8  $\mu\text{m}$  o menos es aceptable.

---

### Parámetros de ensayo.

En la tabla 2 se indica la fuerza aplicada contra la muestra de ensayo y el número de revoluciones de la rueda para los procedimientos de ensayo desde la A hasta la E.

**Tabla 2. Parámetros de prueba**

Tipo de procedimiento	Fuerza contra probeta (N)	Revoluciones de la rueda	Línea de abrasión
A	130 (30)	6000	4309
B	130 (30)	2000	1436
C	130 (30)	100	71.8
D	45 (10.1)	6000	4309
E	130 (30)	1000	718

### Flujo de arena.

La velocidad del flujo de arena debe ser de 300 a 400g/min.

### Tiempo.

El tiempo de ensayo debe ser de 30 minutos para los procedimientos A y D, 10 minutos para el procedimiento B, 5 minutos para el procedimiento E y 30 segundos para el procedimiento C, dependiendo de la velocidad real de la rueda. En todos los casos será el número de revoluciones de la rueda y no el tiempo, el parámetro de control.

### Abrasión lineal.

En la tabla 2 se muestra la distancia lineal de la abrasión por rayado utilizando una rueda con un  $\varnothing$  de 228.6-mm y rotando a un número específico de revoluciones. Como la rueda de goma reduce el  $\varnothing$ , el número de revoluciones de la rueda deberá ser ajustado para igualar la distancia de deslizamiento de la rueda verdadera (Tabla 2) o debe tomarse en cuenta la reducción de la velocidad de abrasión ajustando la pérdida de volumen producida por la rueda gastada a la pérdida de volumen normalizada de una nueva rueda.

### 1.4.3. Procedimiento para el ensayo

Se debe quitar toda la suciedad o materias extrañas de la muestra, se debe limpiar bien la muestra con un solvente y posteriormente debe ser secada.. Las muestras de acero con magnetismo residual se deben ser desmagnetizadas o no deben ser usadas. La muestra se debe pesar.

Se deben asegurar la muestra en el soporte y coloque las pesas apropiadas al brazo palanca para que desarrolle la fuerza adecuada oprimiendo la muestra contra la rueda. Esto puede ser medido con precisión por medio de una balanza de resorte que está colgada alrededor de la muestra y es halada hacia atrás para que levante la muestra lejos de la rueda.

Deberá colocarse una cuña bajo el brazo palanca de forma tal que la muestra se mantenga lejos de la rueda antes de comenzar el ensayo.

Se debe ajustar el cuentarrevoluciones en el número preciso de revoluciones de la rueda.

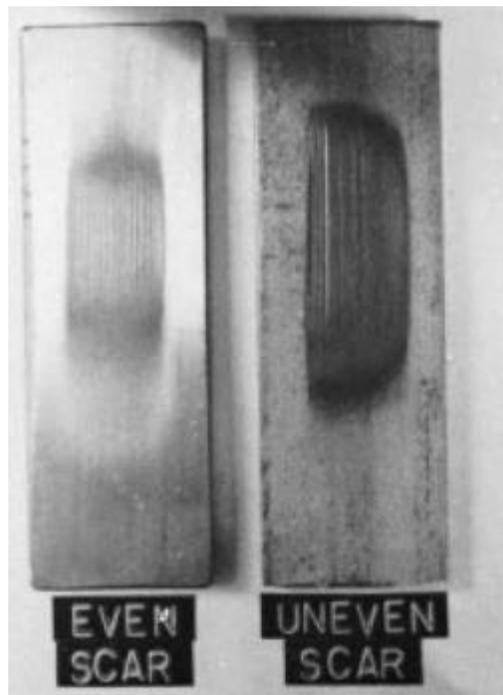
**Flujo y cortina de arena.** La velocidad del flujo de arena a través de la boquilla deberá estar entre 300 y 400 g/min. No comience la rotación de la rueda hasta que se establezca una cortina uniforme adecuada de arena (Fig. 1.25).

La pausa entre los ensayos deberá ser el tiempo que se requiera para que la temperatura de la rueda de goma retorne a la temperatura ambiente.

Comience la rotación de la rueda e inmediatamente baje el brazo palanca cuidadosamente, permitiendo que la muestra entre en contacto con la rueda

Cuando en el ensayo se haya dado el número deseado de revoluciones de la rueda, aleje la muestra de la rueda, detenga el flujo de arena y la rotación de la rueda. La velocidad del flujo de arena debe ser medida antes y después del ensayo, a menos que se haya establecido un flujo constante de arena. Quite la muestra y vuélvala a pesar lo más cercano posible a 0.001 g

Observe la huella de desgaste y compárela con las fotografías de huellas uniformes y no uniformes en la Fig. 1.27. Un patrón irregular indica una alineación inadecuada de la llanta de goma con relación a la muestra o una rueda de goma gastada en forma irregular. Esta condición puede reducir la precisión del ensayo.



**Figura 1.27. Las huellas no uniformes indican una alineación inadecuada de la rueda de goma.**

#### **1.4.3. Preparación y cuidado de las ruedas de goma.**

La goma que se coloca sobre la rueda debe ser nueva y quedar concéntrica con respecto a la rueda. La concentricidad de la rueda debe estar dentro de los 0.05 mm según la lectura del indicador sobre el  $\emptyset$ .

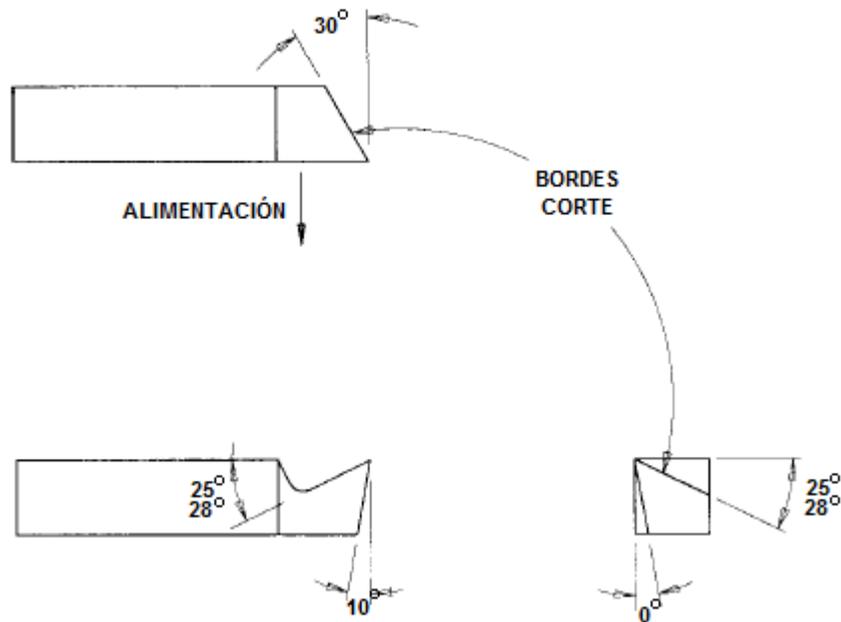
Se debe seguir el mismo procedimiento en la preparación de las ruedas que se han usado y les hayan salido ranuras o estén gastadas en forma irregular y puedan causar huellas de desgaste irregular en la muestra de ensayo. El propósito es producir una superficie uniforme que se desplace tangencialmente

con relación a la muestra, sin causar vibración o saltos del brazo palanca. Las huellas de desgaste deben tener forma rectangular y la profundidad debe ser uniforme en cualquier sección a través de todo su ancho. La rueda de goma puede ser usada hasta que el  $\varnothing$  se desgaste hasta 215.9 mm. Las nuevas llantas de goma pueden ser montadas en discos de acero por personas calificadas.

**Procedimiento para la preparación de la rueda.**

El procedimiento de preparación mas adecuado para la periferia de la llanta de goma es montar una cuchilla en el lugar de la muestra, echar a andar la máquina con carga hasta que esté limpia la rueda.

Otro procedimiento de preparación para la periferia de la llanta de goma es montar la rueda en un torno y maquinar la superficie. Amole una barrena de herramienta de carburo o acero de alta velocidad hasta ángulos de inclinación muy profundos (Fig. 1.28).



**Figura 1.28. Detalle de la cuchilla de corte de goma**

Los parámetros del maquinado recomendados son: velocidad de alimentación: 25 mm/min; velocidad de rotación (200 rpm), profundidad de corte 0.254 mm.) hasta 0.762 mm.). La rueda preparada deberá usarse primero sobre una muestra de ensayo de acero al carbono (AISI 1020 o equivalente). Esto trae como resultado una superficie suave y no pegajosa. Un método alternativo de preparación implicaría el uso de una amoladora de alta velocidad, con esto se debe tener mucho cuidado ya que el amolado tiende a calentar la goma, dejando una superficie pegajosa. Sobre tal superficie se adherirán y quedarán partículas de arena durante el ensayo. Si se usa el método de amolado, solo se debe hacer en un espesor no mayor de 0.05 mm, para poder evitar el sobrecalentamiento.

#### **1.4.5. Operación y calibración inicial de la máquina.**

El número de ensayos para establecer la precisión inicial de la máquina debe ser 5 como mínimo. Después de la calibración inicial se deben hacer un mínimo de tres ensayos para monitorear periódicamente la precisión de la misma.

Después que la máquina haya sido inicialmente calibrada se requiere que uno o más materiales de referencia normalizados sean probados periódicamente para asegurar la precisión de los datos generados

---

## **Capítulo 2. CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PARA MEDIR DESGASTE**

En la figura 2.1 se muestra una foto de la máquina para medir desgaste construida en la Universidad de Holguín Oscar Lucero Moya.



**Figura 2.1. Vista lateral de la máquina de medir desgaste.**

### **2.1. SECUENCIA TECNOLÓGICA DE LA FABRICACIÓN.**

#### **2.1.1. Medidas de seguridad para el proceso de fabricación.**

- Se deben usar los medios fundamentales de protección (espejuelos, caretas, etc.)
- Se prohíbe laborar con camisas de mangas largas, reloj, cadenas, anillos, etc.
- No emplear las manos para retirar las virutas, se debe de usar la escobilla.
- No variar los parámetros de corte con el husillo funcionando.
- Tener la bancada y la mesa libre de objetos.

- Deben trabajar en las diferentes operaciones aquellos operarios que estén preparados para realizar el oficio.
- Debe existir la ventilación adecuada para facilitar el trabajo del operario.
- Se prohíbe dejar las herramientas en el plato cuando no se está trabajando.

### **2.1.2 Pasos tecnológicos de la fabricación del eje de la rueda.**

#### **Secuencia operacional.**

0.05 Torneado en el torno 16k20.

A1 Colocar la pieza en bruto en el plato auto centrante de tres garras.

01 Centrar con precisión la pieza en bruto.

02 Refrentar la cara hasta lograr una superficie completamente plana con una cuchilla acodada de 45° P20.

03 Elaborar agujero centro con una broca de centro HSS.

B1 Colocar la pieza en bruto entre plato y punto.

04 Cilindrado de desgaste de Ø 40 mm a Ø 38 mm con una longitud de 180 mm con cuchilla P20 de 90°.

05 Cilindrado de semiacabado de Ø 38 mm a Ø 36 mm con una longitud de 40 mm con cuchilla P20 de 90°.

06 Cilindrado de acabado de Ø 36 mm a Ø 35,3 mm con una longitud de 40 mm con cuchilla P20 de 90°.

C1 Invertir colocación

07 Refrentar la cara hasta lograr un longitud de 260 mm con cuchilla acodada P20 de 45°.

08 Elaborar agujero centro con una broca de centro HSS.

09 Colocar pieza en bruto entre punto con perro de arrastre.

10 Cilindrado de desgaste de Ø 40 mm a Ø 37 mm con longitud de 90 mm y con cuchilla P20 de 90°.

11 Cilindrado de desbaste de  $\varnothing$  37 mm a  $\varnothing$  33 mm con una longitud de 50 mm con cuchilla P20 de  $90^{\circ}$ .

12 Cilindrado de semiacabado de  $\varnothing$  37 mm a  $\varnothing$  35,3 mm con una longitud de 50 mm con cuchilla P20 de  $90^{\circ}$ .

13 Cilindrado de semiacabado de  $\varnothing$  33 mm a  $\varnothing$  30,3 mm con longitud de 50 mm con cuchilla P20 de  $90^{\circ}$ .

010 Rectificado

A2 Colocar la pieza entre puntos

14 Rectificado de  $\varnothing$  35,3 a  $\varnothing$  35 (0.270) mm a una longitud de 40 mm con una rueda abrasiva de colindón.

15 Rectificado de  $\varnothing$  30,3 a  $\varnothing$  30 (0.270) mm a una longitud de 40 mm con una rueda abrasiva de colindón.

B2 Invertir colocación.

16 Rectificado de  $\varnothing$  35,3 a  $\varnothing$  35 (0.270) mm a una longitud de 40 mm con una rueda abrasiva de colindón.

015 Mortajado.

A3 Colocar la pieza semiacabada en el plato auto centrado de 3 agarres.

17 Elaborar chavetero de 4 x 3 mm a una longitud de 50 mm.

020 Control.

### **2.1.3 Pasos tecnológicos de la fabricación de la polea conductora**

#### **005 Torneado**

A1 Colocar pieza en bruto en el plato auto centrante de 3 garras.

01 Refrentar la cara hasta lograr una superficie completamente plana con una cuchilla P20 45°.

02 Elaborar agujero central con una broca de centro HSS.

03 Taladrar un orificio Ø 20 mm garantizando una longitud de 25 mm con una broca de HSS.

04 Retaladrar de Ø 20 mm a Ø 23 mm a una longitud de 25 mm con una broca de HSS.

05 Barrenar de Ø 23 mm a 23,8 mm a una longitud de 25 mm.

06 Escariar a Ø 24 mm a una longitud de 25 mm.

07 Cilindrado de desbaste de Ø 45 mm a Ø 42 mm con longitud 50 mm con una cuchilla P20 de 90°.

08 Cilindrado de desbaste de Ø 42 mm a Ø 34 mm a una longitud de 25 mm con una cuchilla P 20 de 90°.

09 Cilindrado de semiacabado de Ø 42 mm a Ø 40 mm a una longitud de 25 mm con una cuchilla P20 de 90°.

10 Cilindrado de semiacabado de Ø 34 mm a Ø 32 mm a una longitud de 25 mm con una cuchilla P20 de 90°.

11 Elaborar ranura cuadrada de 5 mm de ancho a una profundidad de 12,5 mm con cuchilla.

12 Elaborar superficie trapezoidal de 60° a una longitud de 10 mm x 12,5 mm de profundidad.

13 Tronchar la pieza semiacabada garantizando un longitud total de 47 mm.

#### **010 Taladrado**

A2 Colocar a pieza.

14 Taladrar orificio pasante de  $\varnothing$  6,8 mm.

15 Elaborar rosca M8 con un macho de roscar HSS.

015 Control.

#### **2.1.4 Pasos tecnológicos de la fabricación de la polea conducida.**

##### **005 Torneado**

A1 Colocar pieza en bruto en el lato auto centrante de 3 garras con muelas exteriores.

01 Refrentar la cara hasta lograr una superficie completamente plana con una cuchilla P20 de  $45^{\circ}$ .

02 Elaborar agujero de centro con una broca de centro HSS.

03 Taladrar un orificio a  $\varnothing$  20 mm con una broca HSS.

04 Retaladrar de  $\varnothing$  20 a  $\varnothing$  27 mm con una broca HSS.

05 Barrenar de  $\varnothing$  27 mm a 29,8 mm con una barrena HSS.

06 Escariar de  $\varnothing$  29,8 mm a  $\varnothing$  30 mm con un escariador HSS.

07 Elaborar un vaciado de  $\varnothing$  326 mm hasta  $\varnothing$  50 mm por una profundidad de 5 mm.

B1 Invertir colocación.

08 Cilindrado de desbaste de  $\varnothing$  360 mm a  $\varnothing$  353 mm por una longitud pasante, con una cuchilla P20 de  $90^{\circ}$ .

09 Cilindrado de semiacabado de  $\varnothing$  353 mm a  $\varnothing$  350 mm con una cuchilla P20 de  $90^{\circ}$ .

10 Refrentar cara hasta lograr 28 mm de ancho.

11 Elaborar un vaciado de  $\varnothing$  326 mm hasta  $\varnothing$  50 mm por una profundidad de 5 mm.

12 Elaborar ranura cuadrada de 5 mm de ancho a una profundidad de 12,5 mm con una cuchilla.

13 Elaborar superficie trapezoidal de  $60^{\circ}$  a una longitud de 10 mm x 12,5 mm de profundidad.

### 010 Taladrado

A2 Colocar la pieza semiacabada en el taladro.

14 Taladrar  $\varnothing$  25 mm 6 orificios pasante (a  $60^{\circ}$  entre centros) con broca HSS.

15 Retaladrar a  $\varnothing$  50 mm con una broca HSS.

015 Mortajado.

A3 Colocar la pieza semiacabada en el plato auto centrado de 3 agarres.

16 Elaborar chavetero de 4 x 3 mm a una longitud de 50 mm.

020 Control.

### 2.2.2. Sistema de transmisión por poleas. Cálculos

1-  $n'=1750$  rpm,  $n''=200$  rpm,  $P=0.7$  kW

2-  $F=1.4$

3-  $P_{dis}=0.7 \cdot 1.4=0.98$  kW

4- Sección A

5-  $i=$

6-  $d=40$  mm

7-  $D=40 \cdot 8.75=350$  mm

$$V_c = \frac{3.14 \cdot 40 \cdot 1750}{60000} = 3.66 \text{ m/s}$$

8-  $C_o = D = 350$  mm

9-  $C_m = 0.5(350+40)+3 \cdot 8 = 219$  mm

$$L_p = 2 \cdot 350 + 1,57(350 + 40) + \frac{(350 + 40)^2}{4 \cdot 350} = 1470 \text{ mm}$$

10-  $L = 1481$  corresponde a una correa A57.

$$C_c = 350 - 0,5(1470 - 1481) = 344,5$$

12 Hay que interpolar.

Para $P_b$		Para $P_d$	
$A = 1600$	$D = 3,82$	$A = 1600$	$D = 0,22$
$B = 1750$	$X$	$B = 1750$	$X$
$C = 1800$	$E = 4,13$	$C = 1800$	$E = 0,24$

$$X = D - \left[ \frac{(A - B) \cdot (D - E)}{A - C} \right]$$

$$X = 3,82 - \left[ \frac{(1600 - 1750) \cdot (3,82 - 4,13)}{1600 - 1800} \right]$$

$$X = 0,22 - \left[ \frac{(1600 - 1750) \cdot (0,22 - 0,24)}{1600 - 1800} \right]$$

$$P_b = 0,7$$

kW/correa

$$P_d = 0,24 \text{ kW/correa}$$

### **3. CONCLUSIONES.**

1. Se construye una máquina de medición de desgaste abrasivo con el objetivo de realizar investigaciones científicas para el Dpto. de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería en la Universidad de Holguín Oscar Lucero Moya.
2. Se realizan las comprobaciones pertinentes mediante corridas experimentales a una pieza compleja que se le aplican tres materiales depositados mediante el proceso de soldadura manual por arco eléctrico
3. Se tiene la posibilidad real de montar prácticas de laboratorios en la asignatura Fricción, Desgaste y Lubricación del Plan de estudio de la carrera de mecánica y para la Maestría de Mantenimiento y Reacondicionamiento de Máquinas.
4. Este trabajo contribuye a la actual política del MES sobre el desarrollo de conocimientos, habilidades y competencias profesionales enfocadas a la práctica, y el impulso de la creación de los técnicos superiores no universitarios y la creación de técnicos superiores no universitarios.

#### **4. Recomendaciones.**

1. Se debe construir otra rueda encauchada con goma resistente a altas temperaturas, con el objetivo de poder realizar pruebas de desgaste a diferentes temperaturas.

## **Bibliografía**

- [1] M. Vite, et.al., Necesidades de la enseñanza de la tribología en los programas de Ingeniería de la Universidades Públicas Mexicanas, México 1994.
- [2] Norma ASTM G83
- [3] S. Báez, et. al., “Evaluación del desgaste adhesivo de recubrimientos metálicos duros depositados por procesos de soldadura, con un tribómetro de cilindros cruzados” en 2003 III Congreso Internacional de Materiales.
- [4] La tribología ciencia y técnica para el mantenimiento editorial luminosa S;A de C.V Grupo noriega editores Francisco Martínez Pérez
- [5] Ingenieros de Lubricación LTDA, Herramienta eficaz de incrementar la productividad de los equipos. [Online] Avialable: <http://www.ingenierosdelubricacion.com/articulos>
- [6] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Wear Testing with a Crossed – Cylinder Apparatus. ASTM Standards,1996, (ASTM G83-96
- [7] Gwidon W. Stachowiak, Andrew W. Batchelor. Engineering Tribology. United Kingdom, 2001 Butterworth Heinemann
- [8] K.C Ludema. Friction, Wear, Lubircation – A textbook in Tribology. New York, 1996 CRC
- [9] M, Vite., M, Flórez and V, Villeta., ¿Por qué el desgaste?, 1994.
- [10] R. Collazo Carceller, H. López Salinas, A. Días Romero. Propuesta para la recuperación de los machetes Zuazaga de los centrales azucareros con electrodos de acero al cromo. Revista Ingeniería Mecánica. 3. 2009, 26-32.
- [11] C. J. Diez Cicero, G. R. Fernández López, U. Ordoñez Hernández, C. R. Figueroa Hernández y F. Mondelo. Efecto del conteo de nódulos en la resistencia

al desgaste por abrasión de los hierros dúctiles austemperados. Revista Ingeniería Mecánica. 2. 2009, 67-73.

[12] M. Zanin, F. Aguera, V. Fierro, A. Ansaldi y N. Alvarez Villar. Evaluación del desgaste de bronce al aluminio utilizando un tribómetro AD HOC. 2. Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencias y Tecnología de Materiales-Posadas-Misiones, 16-17 Octubre 2008.

[13] M. Rosenberger, N. Martínez, M.D. Salvador, E. Forlerer, V. Amigó y C. Schvezov. Estudio comparativo del desgaste de materiales compuestos en diferentes condiciones y equipos. VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos. Gandía. 2002. 533-538

[14] José Luddey Marulanda, Alberto Zapata Menése y Carlos Augusto Estrada. Construcción de una máquina para ensayo de desgaste abrasivo según Norma Técnica ASTM G-65. Scientia et Technica. 5. 2009. 373-378