



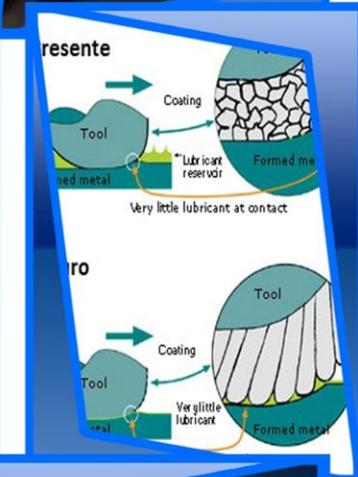
UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

Facultad de Ingeniería Mecánica
Centro de Investigación de Soldadura

TRABAJO DE DIPLOMA

TÍTULO

"Montaje de ensayos tribológicos."



Diplomante:

- Javier Echemendia Martínez

TUTORES:

- Dr. Amado Cruz Crespo
- MSc. Enrique Velásquez Pérez

Santa Clara
2013

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA



Pensamiento

El éxito no se logra sólo con cualidades especiales. Es sobre todo un trabajo de constancia, de método y de organización.

J.P.

Sergent

Dedicatoria

A mis padres, por darme la vida.

A mi esposa, por todo su amor.

A mi familia y amigos en general, por apoyarme y creer en mí.

Agradecimientos

A todas aquellas personas que me ayudaron a dar este paso cualitativo en mi carrera profesional, principalmente a mis tutores (Amado y Enrique) por todas las orientaciones y criterios que me brindaron de sus sabias experiencias, a todos los especialistas del centro de investigación de soldadura (CIS) en particular a Alexis, Lorenzo, Aidita y Arnaldo, en especial a mis padres(Jorge y Esther), a mi tío (Armando) y a mi esposa (Melkys) que de una forma u otra me ayudaron en el transcurso de la carrera para poder llegar a este último paso que es el desarrollo de este TRABAJO DE DIPLOMA, a todos mis amigos y en especial a los del cuarto Yunisbel, Yoan, Roberto, Ignacio y Perdomo. También a mis hermanos y primos a todas las personas que de un modo u otro contribuyeron a la realización de la tesis, ya sea mayor o menor su grado de participación, aunque no cite sus nombre igualmente les estoy agradecido.

ÍNDICE

Introducción.....	1
Objetivo:.....	4
Objetivos específicos:.....	4
Tareas:.....	4
Capítulo 1: Fundamentos Teóricos.....	5
1.1.Fricción.....	5
1.2.Leyes de la fricción.....	14
1.3.Fundamentos sobre el desgaste.....	16
1.3.1.Tipos de desgaste.....	17
1.3.2.Desgaste adhesivo.....	18
1.4.Desgaste abrasivo.....	19
1.4.1.Mecanismos de desgaste abrasivo.....	21
1.5.Propiedades de los Lubricantes.....	23
1.5.1.Viscosidad dinámica o absoluta (μ).....	24
1.5.2.Viscosidad cinemática (ν).....	24
1.6.Densidad.....	25
Capitulo 2: Materiales y métodos	27
2.1 Construcción de un dispositivo para la determinación del Coeficiente de Fricción.....	27
2.2 Determinación del Coeficiente de Fricción.....	28
2.3 Determinación del desgaste adhesivo en función de la rugosidad.....	29
2.3.1 Determinación del desgaste adhesivo por el volumen de la huella.....	31
2.4 Determinación del desgaste abrasivo en función de la carga.....	31
2.5 Determinación de la densidad y viscosidad de un lubricante.....	33
2.5.1 Determinación de la densidad.....	33
2.5.2 Determinación de la viscosidad dinámica (Absoluta).....	34
Capítulo 3: Resultados y análisis.....	35
3.1 Resultados del coeficiente de fricción.....	35
3.2 Influencia de la rugosidad del material sobre el desgaste adhesivo.....	38
3.3 Comportamiento del desgaste abrasivo en función de la carga.....	40

3.4 Resultados de la determinación de las propiedades físicas de un lubricante.....	42
3.4.1 Determinación de la densidad del lubricante.....	42
3.4.2 Determinación de la viscosidad del lubricante.....	42
3.5 Técnicas operatorias para la realización de los ensayos.....	44
3.5.1 Técnica operatoria para el coeficiente de fricción.....	44
3.5.2 Técnica operatoria para el ensayo del desgaste adhesivo.....	46
3.5.3 Técnica operatoria para el ensayo del desgaste abrasivo.....	47
3.5.4 Técnica operatoria para el ensayo de determinación de densidad y viscosidad de un lubricante.....	48
Conclusiones.....	52
Recomendaciones.....	53
Bibliografía.....	54

Resumen

En el trabajo se realiza el montaje y validación de ensayos tribológicos en las condiciones del Centro de Investigaciones de Soldadura. Se realiza una fundamentación teórica de los elementos esenciales sobre la fricción, el desgaste adhesivo, el desgaste abrasivo y las propiedades físicas de los lubricantes. Son abordados diferentes ensayos, según normas ASTM, para la determinación del coeficiente de fricción y el desgaste adhesivo y abrasivo, así como sobre la determinación de las propiedades físicas de lubricantes. Se aborda la construcción de un dispositivo para la determinación del coeficiente de fricción estático y dinámico y su validación. Se aborda también la determinación del desgaste adhesivo en función de la rugosidad del desgaste abrasivo en función de la carga y de la densidad de un lubricante y su viscosidad por el método Höppler.

Abstract

The paper assembles and tribological test validation conditions Welding Research Center. We performed a theoretical foundation of the essential elements of friction, adhesive wear, abrasive wear and physical properties of lubricants. Various tests are addressed, according to ASTM, for determining the coefficient of friction and abrasive and adhesive wear, as well as on the determination of the physical properties of lubricants. Discusses the construction of a device for determining the static friction coefficient and dynamic validation. Also addresses the adhesive wear determination depending on the roughness of the abrasive wear as a function of load and the density and viscosity of a lubricant by the Höppler method.

Introducción

La tribología es la ciencia que estudia la [fricción](#), el desgaste y la [lubricación](#) que tienen lugar durante el contacto entre superficies sólidas en movimiento. El término es usado universalmente desde finales del [siglo XX](#).

Para entender la tribología se requieren conocimientos de [física](#), de [química](#) y de tecnología de materiales. Las tareas del especialista en tribología (tribólogo) son las de reducir la fricción y desgaste para conservar y reducir energía, lograr movimientos más rápidos y precisos, incrementar la productividad y reducir el mantenimiento

La tribología se define como la ciencia y tecnología de la interacción entre superficies en movimiento relativo e involucra el estudio de la fricción, el desgaste y lubricación.

Antes del nacimiento de la tribología como ciencia se pensaba en el término “lubricación” o ingeniería de lubricación. No se había generalizado la disminución de la fricción y el desgaste como prácticas cotidianas. 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. Toma en cuenta, entre otros aspectos de la maquinaria industrial, los siguientes:

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

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 y la lubricación como un medio para reducir el desgaste.

En la vida actual conocer la esencia de los fenómenos de fricción, desgaste y

lubricación son aspectos de vital importancia en la formación de los profesionales actuales y en particular para el caso de los ingenieros mecánicos y otras ramas de la ingeniería vinculados a la construcción y fabricación de equipos partes y piezas. Estos fenómenos que hemos mencionado son una de las causas fundamentales y mayoritarias de fallas en la industria. Se puede decir que cuando un cuerpo se mueve sobre una superficie o a través de un medio viscoso, se origina entonces una resistencia al movimiento debido a que el cuerpo interactúa con sus alrededores, dicha resistencia recibe el nombre de fuerza de fricción y automáticamente se opone al movimiento, nunca lo favorecen y de hecho existen aun cuando no se produzca movimiento relativo.

La fuerza de fricción es muy importante en la vida cotidiana y es siempre tangencial a la superficie en los puntos de contacto con el cuerpo, y tiene un sentido tal que se opone al movimiento posible o existente del cuerpo respecto a esos puntos. Por otra parte estas fuerzas de fricción están limitadas en magnitud y no impedirán el movimiento si se aplican fuerzas lo suficientemente grandes.

La fricción es extremadamente útil e importante en algunas circunstancias y ejerce una función vital en frenos, embragues, acoplamientos y en las propiedades de los neumáticos. No obstante, en muchas situaciones es indeseable porque conduce a pérdidas de energía, por lo que muchos de los estudios de la tribología están concentrados en el sentido de minimizar sus efectos

Siempre que ocurre el movimiento relativo entre superficies de un par tribológico participan fuerzas de rozamiento que pueden ir acompañadas de la transformación de la energía en calor. A nivel microscópico, el contacto de las asperezas de las superficies es la causa primaria del surgimiento, a nivel macroscópico de la fuerza de fricción.

Una de las principales causas del deterioro y sustitución de piezas en máquinas y equipos se debe al desgaste de las mismas, prácticamente, el 80% de las piezas que se sustituyen en ambos se deben a esta causa.

El desgaste se ha reconocido como el fenómeno de levantamiento de material de una superficie debido a la interacción con otra superficie. Casi todas las máquinas pierden su durabilidad y fiabilidad debido al desgaste y las posibilidades de nuevas máquinas avanzadas están reducidas debido a los problemas de desgaste. Por consiguiente, el control de este se ha vuelto una fuerte necesidad para la tecnología avanzada y fiable del futuro. La durabilidad de las máquinas está definida en un alto por ciento (entre el 60% y 70%) por el desgaste, de allí que resulte de extrema importancia conocer las características del mismo, así como de los materiales que presentan un adecuado comportamiento ante este tipo de proceso de los materiales y equipos.

Según la bibliografía consultada se pudo encontrar diferentes conceptos del término desgaste y su significado depende del documento consultado (Cedre E-2004, Dobrovolski V-2005). Sin embargo, en todas las definiciones encontramos aspectos comunes como: Daño ocasionado por el exceso de uso bajo condiciones de fricción, disminución de las dimensiones de una pieza, cambio de las superficies producto del desprendimiento o pérdida del material por causa mecánica, erosión de material sufrida por una superficie sólida por acción de otra superficie, resultado de un proceso producido por el rozamiento. Hay autores como Koji Kato y Koshi Hadáis (Herrera A -2005), que consideran el desgaste como el resultado de la eliminación de material por la separación física como resultado de micro facturas, a consecuencia de la fusión debido al contacto entre superficies o por disolución química.

El estudio del desgaste adhesivo (ASTM G77-1998) ha demostrado la importancia de la interrelación de los materiales del par tribológico, recomendando que debe evitarse la compatibilidad metalúrgica. En este caso se cumple con el bronce y el acero, considerando que el latón es una aleación base cobre, no ferrosa y de baja dureza con respecto al acero

Los mecanismos de degradación en un par tribológico generalmente actúan combinados, ejerciendo unos sobre los otros efectos sinérgicos. Por ejemplo, la corrosión y el desgaste muchas veces se combinan acelerando la degradación de las superficies de los elementos en los pares tribológicos.

El rozamiento entre los cuerpos puede ser considerado como un problema mixto ya que él puede ponerse de manifiesto tanto entre dos sólidos como entre un sólido y un fluido, influyendo en el fenómeno la velocidad alcanzada por los cuerpos, (Stribeck) demostró que cuando entre dos superficies sólidas se aplica una pequeña capa de fluido lubricante podrá apreciarse que a bajas velocidades el rozamiento predominante se comporta de igual forma a como ocurre entre dos superficies secas, mientras a altas velocidades se pone de manifiesto un rozamiento hidrodinámico, sin embargo la mínima fricción se alcanza a una velocidad intermedia en dependencia de la presión del fluido “ de su viscosidad cinemática”

La lubricación por tanto consiste en la introducción de una capa intermedia de un material ajeno entre las superficies en movimiento. Estos materiales intermedios se denominan lubricantes y su función es disminuir la fricción y el desgaste. El término lubricante es muy general, y puede estar en cualquier estado material: líquido, sólido, gaseoso e incluso semisólido o pastoso produciéndose cambios en su comportamiento en función de la temperatura a que este actúe.

En la mecánica de fluidos es de vital importancia el conocimiento de las propiedades de los fluidos a estudiar ya que de ellos depende de manera directa la obtención de datos imprescindibles para el cálculo en un problema como lo es la viscosidad de un aceite.

Objetivo General: Montar y validar ensayos tribológicos en las condiciones del laboratorio de Tribología y Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

Objetivos específicos:

1. Montar y validar ensayos de fricción, de acuerdo a la norma G 115-2004 y G 143-2003
2. Validar ensayo de desgaste adhesivo, de acuerdo a la norma ASTM G 77-1998.
3. Validar ensayo de desgaste abrasivo en plato giratorio.
4. Determinar la densidad y la viscosidad por el método Höppler.

Tareas del Trabajo de Diploma.

- Revisión bibliográfica sobre los fenómenos tribológicos.

- Construcción de un dispositivo para la determinación del coeficiente de fricción estático y dinámico.
- Determinación del efecto de la rugosidad superficial sobre el desgaste adhesivo.
- Determinación del desgaste abrasivo en función de la carga aplicada.
- Determinación de la densidad y viscosidad de un lubricante.

Capítulo 1: Fundamentos Teóricos

1.1 Fricción

Se define como fuerza de rozamiento o fuerza de fricción, a la fuerza entre dos superficies en contacto, a aquella que se opone al movimiento entre ambas superficies (fuerza de fricción dinámica) o a la fuerza que se opone al inicio del deslizamiento (fuerza de fricción estática). Se genera debido a las imperfecciones, mayormente microscópicas, entre las superficies en contacto. Estas imperfecciones hacen que la fuerza perpendicular R entre ambas superficies no lo sea perfectamente, si no que forme un ángulo ϕ con la normal N (el ángulo de rozamiento). Por tanto, la fuerza resultante se compone de la fuerza normal N (perpendicular a las superficies en contacto) y de la fuerza de rozamiento F , paralela a las superficies en contacto. T William, V Whitman-1997.

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 μ , 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 microsoldaduras entre las superficies, factores que desaparecen en estado de movimiento. Éste fenómeno es tanto

mayor cuanto más perfectas son las superficies. Un caso más o menos común es el del gripaje de un motor por estar mucho tiempo parado (no sólo se arruina por una temperatura muy elevada), ya que al permanecer las superficies, del pistón y la camisa, durante largo tiempo en contacto y en reposo, pueden llegar a soldarse entre sí.

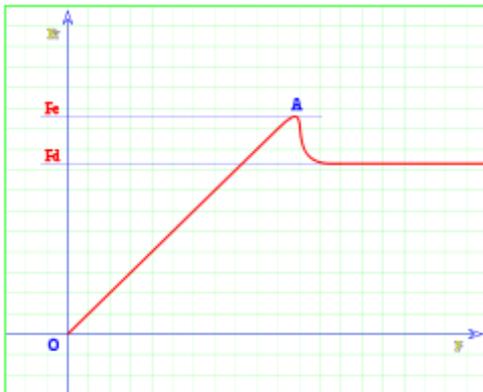
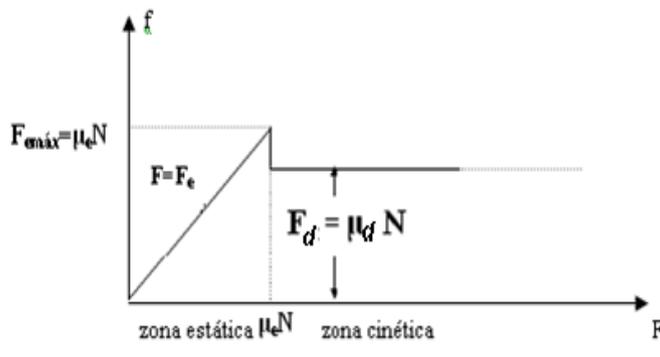


Figura 1a

Figura 1b

Figura 1a y 1b. Fuerzas de rozamiento en función de la fuerza aplicada.

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 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 (Figura 1b), 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, 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 a la constante de proporcionalidad se la llama μ :

$$F_r = \mu N$$

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

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

donde el coeficiente de rozamiento estático μ_e corresponde al de la mayor fuerza que el cuerpo puede soportar inmediatamente antes de iniciar el movimiento y el coeficiente de rozamiento dinámico μ_d corresponde a la fuerza necesaria para mantener el cuerpo en movimiento una vez iniciado.

Fuerza de Fricción Estática

Es la fuerza que se opone al inicio del deslizamiento. Sobre un cuerpo en reposo al que se aplica una fuerza horizontal F , intervienen cuatro fuerzas:

F : la fuerza aplicada.

F_r : la fuerza de rozamiento entre la superficie de apoyo y el cuerpo, y que se opone al deslizamiento.

P : el peso del propio cuerpo, igual a su masa por la aceleración de la gravedad.

N: la fuerza normal, con la que la superficie reacciona sobre el cuerpo sosteniéndolo.

Dado que el cuerpo está en reposo la fuerza aplicada y la fuerza de rozamiento son iguales, y el peso del cuerpo y la normal:

$$\begin{cases} P = N \\ F = F_r \end{cases}$$

Se sabe que el peso del cuerpo P es el producto de su masa por la aceleración de la gravedad (g), y que la fuerza de rozamiento es el coeficiente estático por la normal:

$$P = N = mg$$

$$F = F_r = \mu_e N$$

esto es:

$$F = F_r = \mu_e mg$$

La fuerza horizontal F máxima que se puede aplicar a un cuerpo en reposo es igual al coeficiente de rozamiento estático por su masa y por la aceleración de la gravedad.

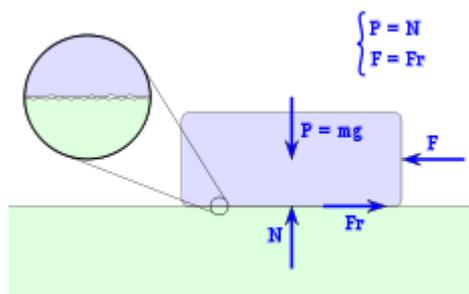


Figura 2. Fricción estática

Fuerza de Fricción Dinámica

Dado un cuerpo en movimiento sobre una superficie horizontal, deben considerarse las siguientes fuerzas:

F: la fuerza aplicada.

F_r : la fuerza de rozamiento entre la superficie de apoyo y el cuerpo, y que se opone al deslizamiento.

F_i : fuerza de inercia, que se opone a la aceleración de cuerpo, y que es igual a la masa del cuerpo m por la aceleración que sufre a .

P: el peso del propio cuerpo, igual a su masa por la aceleración de la gravedad.

N: la fuerza normal, que la superficie hace sobre el cuerpo sosteniéndolo.

Como equilibrio dinámico, se puede establecer que:

$$\begin{cases} P = N \\ F - F_r = F_i \end{cases}$$

Sabiendo que:

$$P = N = mg$$

$$F_r = \mu_d N$$

$$F_i = ma$$

se puede reescribir la segunda ecuación de equilibrio dinámico como:

$$F = \mu_d mg + ma$$

Es decir, la fuerza resultante F aplicada a un cuerpo es igual a la fuerza de rozamiento F_r más la fuerza de inercia F_i que el cuerpo opone a ser acelerado.

De lo que también se puede deducir:

$$F = m(\mu_d g + a)$$

$$\frac{F}{m} = \mu_d g + a$$

$$a = \frac{F}{m} - \mu_d g$$

Con lo que se tiene la aceleración a que sufre el cuerpo, al aplicarle una fuerza F mayor que la fuerza de rozamiento F_r con la superficie sobre la que se apoya.

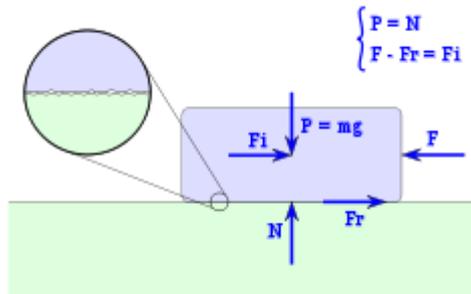


Figura 3. Rozamiento dinámico

Rozamiento en un plano inclinado

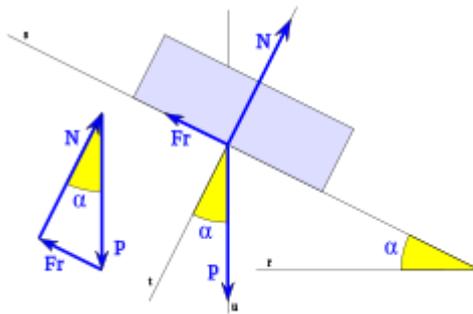


Figura 4. Rozamiento estático

Si sobre una línea horizontal r , se tiene un plano inclinado un ángulo α , y sobre este plano inclinado se coloca un cuerpo con rozamiento, se tendrán tres fuerzas que intervienen:

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.

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

$$\mathbf{P} + \mathbf{F}_r + \mathbf{N} = 0$$

Lo que gráficamente sería un triángulo cerrado formado por estas tres fuerzas, puestas una a continuación de otra, como se ve en la figura 5.

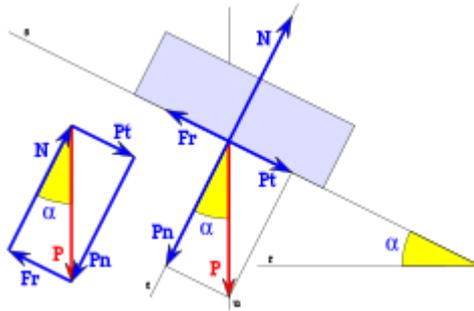


Figura 5. Representación de los vectores de la fuerza

Si el peso P del cuerpo se descompone en dos componentes: P_n , 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 esté 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:

$$F_r = \mu_e N$$

$$P = mg$$

y que la descomposición del peso es:

$$P_n = P \cos(\alpha)$$

$$P_t = P \sin(\alpha)$$

Por lo que se determinan las condiciones del equilibrio de un cuerpo en un plano inclinado con el que tiene fricción. Es de destacar la siguiente relación:

$$P \cos(\alpha) = N$$

$$P \sin(\alpha) = \mu_e N$$

Haciendo la sustitución de N:

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

que da finalmente como resultado:

$$\frac{\sin(\alpha)}{\cos(\alpha)} = \tan(\alpha) = \mu_e$$

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, inclinando 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.

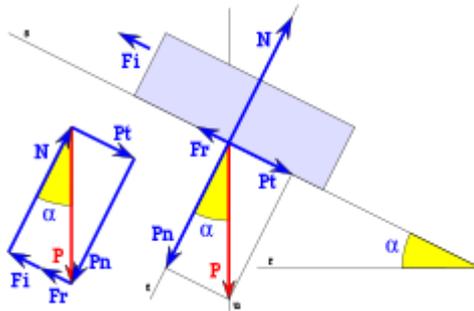


Figura 6. Rozamiento dinámico

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 μ_d , así como una fuerza de inercia F_i , que se opone al movimiento, el equilibrio de fuerzas se da cuando:

$$\mathbf{P} + \mathbf{F}_r + \mathbf{N} + \mathbf{F}_i = 0$$

descomponiendo los vectores en sus componentes normales y tangenciales se tiene:

$$\begin{cases} P_n = N \\ P_t - F_r = F_i \end{cases}$$

teniendo en cuenta que:

$$F_r = \mu_d N$$

$$P = mg$$

$$F_i = ma$$

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 de 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:

$$\frac{\sin(\alpha)}{\cos(\alpha)} = \tan(\alpha) = \mu_d$$

con lo que se puede decir que el coeficiente de rozamiento dinámico μ_d 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, por el plano.

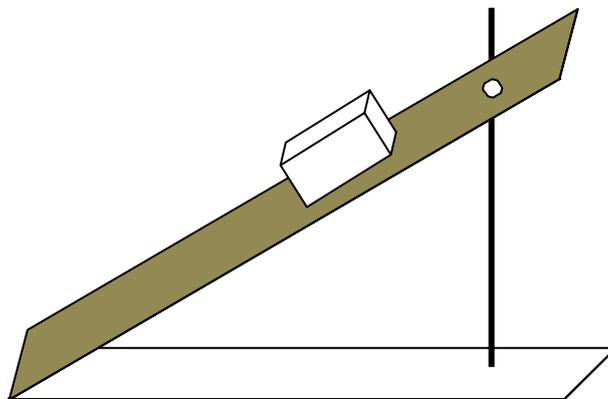


Figura 7. Plano Inclinado

1.2. Leyes de la fricción

Primera Ley: La fuerza de fricción es proporcional a la fuerza normal ($F_{em\acute{a}x} = \mu_e N$; $F_d = \mu_d N$).

Segunda Ley: La fuerza de fricción es independiente del área nominal (aparente) de contacto. Es por ello que objetos grandes y pequeños del mismo par de materiales, presentan el mismo coeficiente de fricción.

Tercera Ley: La fuerza de fricción es independiente de la velocidad de deslizamiento (aunque no es así en la práctica debido a la sensibilidad de los materiales de fricción, a la presión, a la velocidad y a la temperatura)...

Algunos autores refieren una Cuarta Ley, pero la mayor parte de la literatura solo refiere tres.

Cuarta Ley: La fuerza de fricción depende de la naturaleza de los materiales en contacto. Esto significa que un cambio de material en el par tribológico o del estado en que se encuentren las superficies de estos representa una variación significativa del coeficiente de fricción.

La Primera Ley se hace evidente en la figura 8, donde se muestra el comportamiento invariable del coeficiente de fricción μ en función de la carga Normal para un par aluminio acero sin lubricación. Si μ se mantiene constante es porque en la medida que aumenta la fuerza normal aumenta también la fuerza de fricción ($\mu=F/N$).

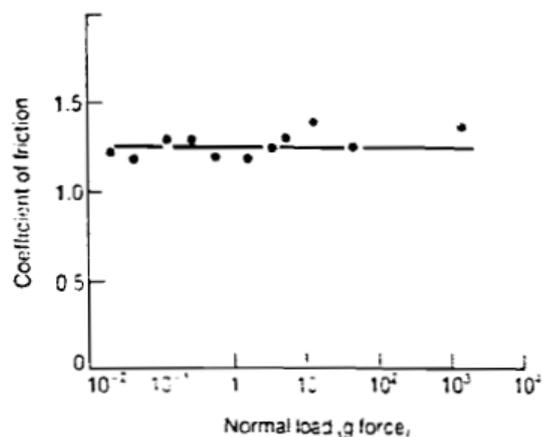


Figura 8. Variación del coeficiente de fricción en función de la carga normal.

La Segunda Ley se comprueba en la figura 9, para un par madera-acero no lubricado y manteniendo la carga constante. Se aprecia que para cualquier valor de área nominal (aparente) el coeficiente de fricción no varía.

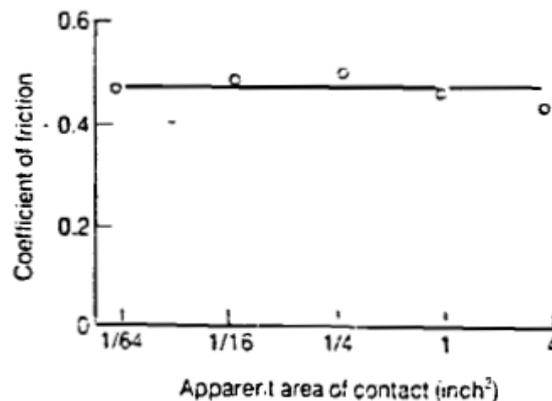


Figura 9. Variación del coeficiente de fricción en función del área aparente de contacto.

La Tercera Ley no ha sido tan explorada como las dos primeras. Es conocido que la fuerza de fricción para iniciar el movimiento es superior que la fuerza de fricción luego de iniciado el movimiento (el coeficiente de fricción estático es superior al dinámico ($\mu_e > \mu_d$)). Una vez establecido el movimiento la fuerza de fricción permanece constante en un alto rango de velocidad de deslizamiento.

La Norma (ASTM G-115-2004) muestra la configuración de diferentes ensayos para la determinación del Coeficiente de Fricción. Entre estas configuraciones se encuentran las del plano inclinado y el plano horizontal como muestran las figuras 10, 11 y 12.

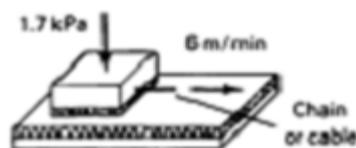


Figura 10. Determinación del coeficiente estático de fricción en panel de fibra sólida de cartón. (μ) (ASTM G-115-2004).



Figura 11. Se experimenta el deslizamiento de un cuerpo sobre tela tejida monofilamento (μ) (ASTM G-115-2004).

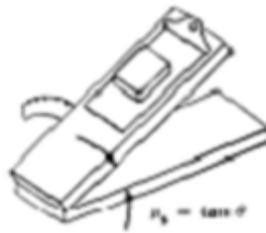


Figura 12.D3248 El plano inclinado muestra el coeficiente estático de fricción para un cuerpo corrugado (μ) (ASTM G-115-2004).

1.3. Fundamentos sobre el desgaste

Se denomina desgaste al proceso complejo que se produce en la superficie de los cuerpos producto de la fricción con otros cuerpos o fluidos y que trae como consecuencia la variación de la micro y macro geometría superficial, de las estructuras y de las propiedades de los cuerpos superficialmente.

Causa	Efecto
Fricción	Desgaste.

Producto de la fricción se provocan pérdidas de materiales y de energía.

Conocido el concepto de desgaste, es importante entonces hacernos una pregunta.

El desgaste es el daño de la superficie por remoción de material de una o ambas superficies sólidas en movimiento relativo. Es un proceso en el cual las capas superficiales de un sólido se rompen o se desprenden de la superficie. Al

igual que la fricción, el desgaste no es solamente una propiedad del material, es una respuesta integral del sistema. Los análisis de los sistemas han demostrado que 75% de las fallas mecánicas se deben al desgaste de las superficies en rozamiento. Se deduce fácilmente que para aumentar la vida útil de un equipo se debe disminuir el desgaste al mínimo posible. Williams, J-2005.

1.3.1. Tipos de desgaste

En muchas ocasiones nos referimos al desgaste de manera genérica (Rabinowicz, E- 1995) y no es posible hacerlo de esta forma, pues existen diferentes tipos y cada uno de ellos presenta sus características particulares y esas propiedades que caracterizan la resistencia al desgaste no las podemos generalizar para todos los tipos ejemplo de ello tenemos:

- Desgaste por Fatiga: surge por concentración de tensiones mayores a las que puede soportar el material. Incluye las dislocaciones, formación de cavidades y grietas.
- Desgaste Abrasivo: es el daño por la acción de partículas sólidas presentes en la zona del rozamiento.
- Desgaste por Erosión: es producido por una corriente de partículas abrasivas, muy común en turbinas de gas, tubos de escape y de motores.
- Desgaste por Corrosión: originado por la influencia del ambiente, principalmente la humedad, seguido de la eliminación por abrasión, fatiga o erosión, de la capa del compuesto formado. A este grupo pertenece el Desgaste por oxidación. Ocasionado principalmente por la acción del oxígeno atmosférico o disuelto en el lubricante, sobre las superficies en movimiento.
- Desgaste por Frotación: aquí se conjugan las cuatro formas de desgaste, en este caso los cuerpos en movimiento tienen movimientos

de oscilación de una amplitud menos de 100 μm . Generalmente se da en sistemas ensamblados.

- **Desgaste por deslizamiento:** También conocido como desgaste por adhesión es el proceso por el cual se transfiere material de una a otra superficie durante su movimiento relativo como resultado de soldadura en frío debido a las grandes presiones existentes entre las asperezas, en algunos casos parte del material desprendido regresa a su superficie original o se libera en forma de virutas o rebaba. Existen pruebas de este tipo en las que se emplea una máquina de perno o esfera en disco.

- **Desgaste Fretting:** es el desgaste producido por las vibraciones inducidas por un fluido a su paso por una conducción.

- **Desgaste de Impacto:** son las deformaciones producidas por golpes y que producen una erosión en el material.

- **El desgaste adhesivo:** es conocido a veces como el rayado, por agarramiento y depende de las condiciones de lubricación, la compatibilidad metalúrgica o solubilidad mutua de los materiales del par, la microgeometría superficial y las condiciones de explotación.

1.3.2. Desgaste adhesivo

El desgaste adhesivo se produce mayormente en cojinetes y guías de desplazamiento, transmisiones por engranajes como por ejemplo, tornillo sinfín, grupo pistón-aro-cilindro.

En la superficie de los materiales en el desgaste adhesivo, aparecen rayas o surcos en el sentido del movimiento del par de fricción y transferencia de metal.

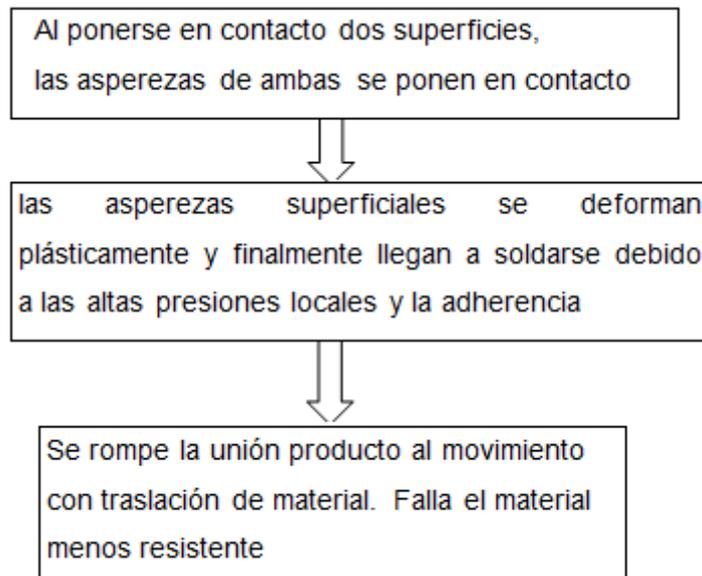


Figura 13. Representación del mecanismo del desgaste.

En el mecanismo clásico de desgaste adhesivo el papel principal lo juega la interacción atómica al estar en contacto bajo presión las asperezas de ambas superficies (figura 14). Hay una atracción molecular (cohesión) cuando la distancia entre los átomos de las superficies de los dos cuerpos sea menor que $4 \cdot 10^{-8} \text{cm.}$, surgiendo fuerzas de interacción mutua entre ellos que son de corta acción. Esto produce una unión adhesiva (micro-soldadura) entre las superficies en contacto como resultado de la destrucción superficial de uno o ambos materiales. Durante el contacto las asperezas se arrugan y se produce el efecto mecánico de engrane, siendo la primera causa de la adhesión.

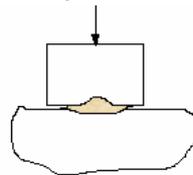


Figura 14. Representación del desgaste adhesivo.

El desgaste adhesivo, también llamado desgaste por fricción o deslizante, es una forma de deterioro que se presenta entre dos superficies en contacto deslizante. Este desgaste es el segundo más común en la industria y ocurre cuando dos superficies sólidas se deslizan una sobre la otra bajo presión. El aspecto de la superficie desgastada será de ralladuras irregulares y superficiales (Fuentes R, 2013).

Existen gran variedad de materiales resistentes al desgaste adhesivo, ejemplo de estos tenemos a los aceros grafiticos, fundición Gris, aleaciones base cobre y aleaciones para cojinetes.

1.4. Desgaste abrasivo

El desgaste abrasivo es el fenómeno que ocurre cuando partículas duras se deslizan o son forzadas contra una superficie metálica en relación a la cual están en movimiento, provocando la remoción de material por arranque o deformación.

El desgaste abrasivo ocurre producto de la acción de asperezas de alta dureza, estas asperezas pueden estar constituidas por:

- Masa Abrasiva: Por ejemplo la tierra que actúa sobre una grada cuando esta se mueve por la tierra o las condiciones de trabajo de equipos que manipulan y muelen abrasivos.

- Uniones de rozamiento: Por la acción de partículas abrasivas en un par de rozamiento.

- Hidro o gasoabrasivo: Por la acción de un fluido con partículas abrasivas. Ejemplo bombas de lodo.

Este tipo de desgaste se desarrolla según el siguiente mecanismo:

La acción de una aspereza sobre la superficie del metal produce un microcorte, produciendo una viruta que a su vez, puede actuar como abrasivo en el desarrollo del proceso.

El desgaste abrasivo, depende de la dureza relativa entre la sustancia que actúa como abrasivo y el material que se desgasta, mientras mayor dureza presenta el material, mayor es la resistencia al desgaste. La dureza del material, como conocemos, depende de su composición química, de su estructura y por supuesto, del tratamiento térmico que presente el material.

No existe una relación directa entre la dureza y el comportamiento al desgaste. Ello se debe a que no todos los tipos de desgaste tienen igual comportamiento ante la dureza. Por ejemplo, en el desgaste adhesivo la presencia de grafito en la estructura del acero o del hierro fundido, a pesar de ser una estructura de baja dureza, eleva su resistencia al desgaste adhesivo,

ya que actúa como lubricante, creando una película entre las superficies que rozan que reduce el coeficiente de fricción y por consiguiente el desgaste.

Concluyendo, podemos decir que para la selección de un material para la fabricación de una pieza sometida a un tipo de desgaste resulta imprescindible conocer su estructura y composición química, así como el mecanismo bajo el cual se desarrolla el desgaste y tener muy presente, los elementos de aleación y la influencia que estos ejercen sobre el material.

De acuerdo con el tipo de contacto el desgaste abrasivo se clasifica en de dos cuerpos y de tres cuerpos (figura 15). El de dos cuerpos es cuando un abrasivo se desliza a lo largo de una superficie sin que se triture, por ejemplo en el mezclado de minerales. El de tres cuerpos es cuando un abrasivo es aprisionado entre dos superficies, por ejemplo en la trituración de minerales. El desgaste de dos cuerpos es entre 10 y 1000 veces superior al de tres cuerpos para iguales condiciones de carga, recorrido y tipo de abrasivo (Gwidon W, Andrew W -2008).

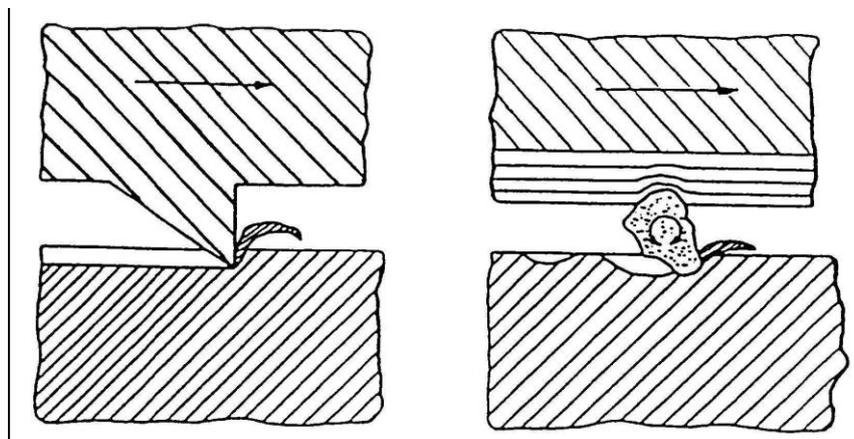


Figura 15. Representación esquemática de desgaste a dos cuerpos y a tres cuerpos.

Hay varios tipos de desgaste por abrasión descritos en la literatura, entre ellos:

- abrasión por arranque
- abrasión a alta tensión (desbaste)
- abrasión a baja tensión (rayado)

1.4.1. Mecanismos de desgaste abrasivo

El mecanismo básico de desgaste por abrasión fue propuesto por Khrushchov y Babichev. Según los cuales, existen dos procesos actuando cuando el abrasivo entra en contacto con la superficie (figura 16):

- El primero sería la formación de un surco debido a la deformación plástica, por tanto sin remoción de material de la superficie en forma de pequeñas virutas.
- El segundo el material es removido por virutas y el restante por deformación plástica (cizallamiento).

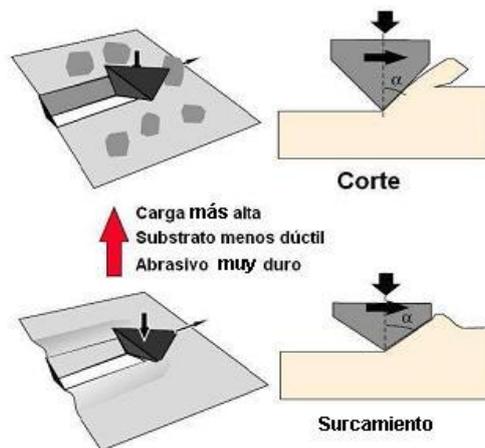


Figura 16. Mecanismos básicos de desgaste abrasivo (existe un ángulo crítico de partícula puntiaguda para la transición de surcamiento a corte).

Los mecanismos de desgaste pueden ser dúctiles (surcamiento y microcorte) o frágiles (Microagrietamiento y lascamiento).

El microagrietamiento o lascamiento (figura 17) es un proceso de fragmentación de la superficie frágil por la formación y crecimiento de grietas, debido a la acción de las partículas abrasivas.

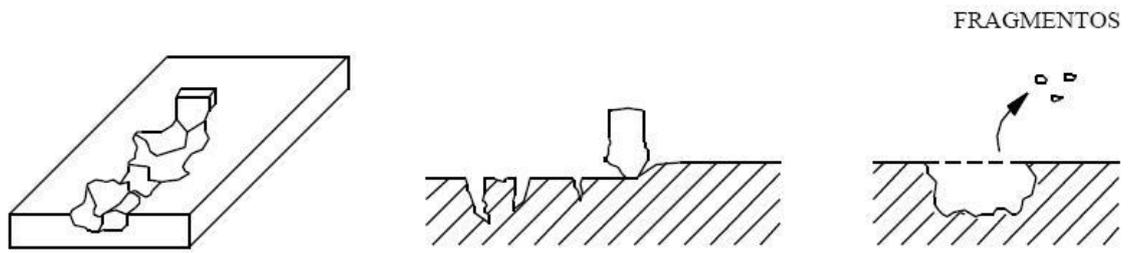


Figura 17. Esquema ilustrativo de mecanismo de desgaste abrasivo por microagrietamiento o lascamiento.

El fenómeno interfacial envuelto es complejo y los diferentes mecanismos pueden actuar de forma combinada.

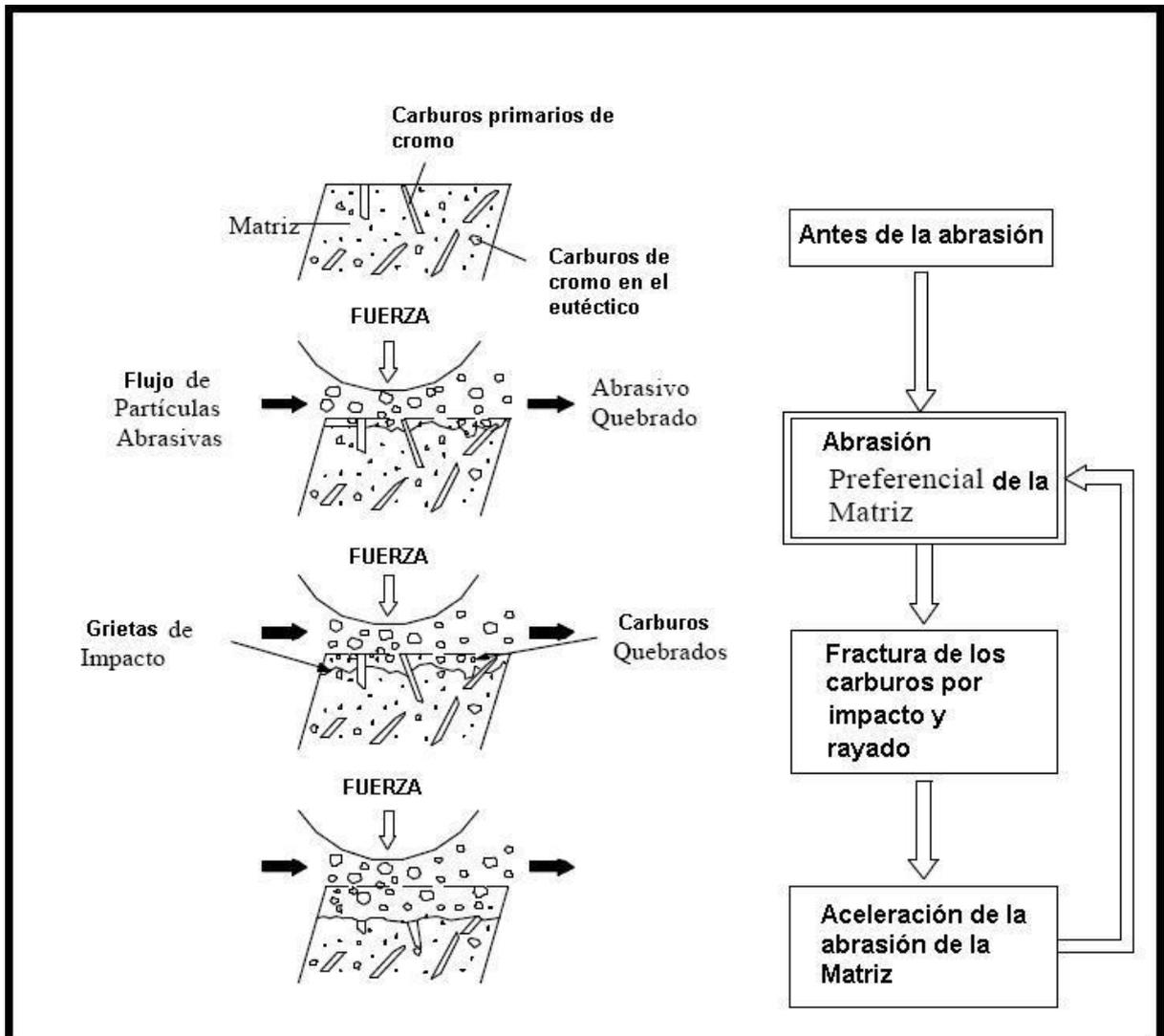


Figura 18. Representación esquemática de desgaste abrasivo de aleaciones del sistema aleante Fe-Cr-C.

1.5. Propiedades de los Lubricantes

La viscosidad es una de las propiedades más importante de un lubricante. De hecho buena parte de los sistemas de clasificación de los aceites están basados en ésta propiedad por lo tanto la viscosidad es una especificación de primer orden en los aceites lubricantes, ya que condiciona las cualidades requeridas para la lubricación.

La viscosidad se utiliza como un indicador cuantitativo de calidad en la industria de los aceites, la petroquímica, de los alimentos, la farmacéutica, la textil, de las pinturas, entre otras. A nivel industrial, existe un número indefinido de equipos, con diferentes diseños, que se utilizan para medir viscosidad. Por lo tanto, los resultados que se obtienen varían dependiendo de las unidades en que se reporta la viscosidad.

1.5.1. Viscosidad dinámica o absoluta (μ)

La viscosidad absoluta es una propiedad de los fluidos que indica la mayor o menor resistencia que éstos ofrecen al movimiento de sus partículas cuando son sometidos a un esfuerzo cortante. Algunas unidades, a través de las cuales se expresa esta propiedad, se observan en la Tabla I. Es importante resaltar que esta propiedad depende de manera muy importante de la temperatura, disminuyendo al aumentar la misma.

Tabla I. Unidades de viscosidad dinámica.

Sistema de unidades	Unidades de viscosidad dinámica
Sistema Internacional (SI)	$N*s/m$, $Pa*s$, o $Kg/(m*s)$
Sistema Británico de unidades	$(lb*s)/pie^2$ o $slug/(pie*s)$
Sistema c.g.s.	$poise=dina*s/cm^2 = g/(cm*s)=0.1 Pa*s$ Centipoise = poise /100

Uno de los equipos diseñados para determinar ésta propiedad es el Viscosímetro Stormer que se describe más adelante.

1.5.2. Viscosidad cinemática (μ)

Es la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido, ésta suele denotarse como μ . En la Tabla 2 se presentan las unidades de viscosidad cinemática en los tres sistemas utilizados con frecuencia.

Tabla 2. Unidades de viscosidad cinemática.

Sistema de unidades	Unidades de viscosidad cinemática
Sistema Internacional (SI)	m ² /s
Sistema Británico de unidades	pie ² /s
Sistema c.g.s.	stoke = cm ² /s = 1 X 10 ⁻⁴ m ² /s Centistoke = stoke /100 = 1 X 10 ⁻⁶ m ² /s

Para evaluar numéricamente la viscosidad de un aceite, cualquiera de las muchas pruebas estándar puede ser utilizada. Aunque estas pruebas difieren una de otras en mayor o menor grado, utilizan básicamente el mismo principio. Todas ellas miden el tiempo requerido para que una cantidad específica de aceite, a una temperatura dada, fluya por acción de la

gravedad a través de un orificio normalizado. Mientras más espeso sea el aceite, mayor será el tiempo para que pase.

Es importante tener un control estricto de la temperatura. La viscosidad de cualquier aceite aumenta cuando es enfriado y disminuye cuando es calentado. Por esta misma razón, el valor de la viscosidad de un aceite debe ir siempre acompañado por la temperatura a la cual fue determinado.

Usualmente en refinería se utiliza varias unidades para referirse a la viscosidad cinemática. Además de centistokes existen las escalas (SSU) segundos Saybolt Universal, (SSF) segundos Saybolt Furol que se utiliza en USA, (RI) Segundos Redwood que se utiliza en Inglaterra y (°E) grados Engler que se utiliza en Europa

1.6. Densidad

La densidad en [física](#) y [química](#), (símbolo ρ) es una [magnitud](#) escalar referida a la cantidad de [masa](#) contenida en un determinado [volumen](#) de una [sustancia](#). Se expresa como la masa de un cuerpo dividida por el volumen y sus unidades son Kg/m³ en el [S.I.U.](#)

La densidad ρ se define como la relación entre la masa y el volumen de un aceite a una temperatura dada ($\rho=m/V$, g/cm³). Esta varía con la temperatura por la expresión siguiente:

$$\rho_1 = \rho_{20} - \xi(t-20), \text{ g/cm}^3$$

En dependencia del valor de ρ_{20} , la constante ξ toma los siguientes valores:

$$\xi = 6,6 \cdot 10^{-4} \text{ para } \rho_{20} = 0,87-0,88$$

$$\xi = 6,47 \cdot 10^{-4} \text{ para } \rho_{20} = 0,88-0,89$$

$$\xi = 6,33 \cdot 10^{-4} \text{ para } \rho_{20} = 0,89-0,90$$

$$\xi = 6,73 \cdot 10^{-4} \text{ para } \rho_{20} = 0,90-0,96$$

Capítulo 2: Materiales y métodos

2.1 Construcción de un dispositivo para la determinación del Coeficiente de Fricción

En base a los criterios de la norma (ASTM G115-2004) se decidió fabricar un dispositivo para la determinación del Coeficiente de Fricción estático y dinámico. Toda vez que una de las formas más simples de determinación del Coeficiente de Fricción, de acuerdo a la norma referida, es el empleo de un plano inclinado o un plano horizontal con fuerza constante, lo cual obviamente lo hace más viable de realizar si se compara con otros métodos, se decide construir un dispositivo que posibilite estas dos formas de ensayo.

Para la construcción del dispositivo de plano inclinado (figura 19) fue elaborada una base de madera, reforzada en sus extremos con un angular de aluminio, al cual se le coloca un semicírculo para determinar los grados de inclinación de la canal de aluminio, unida por uno de los extremos a la base,

mediante una articulación. A la canal le fue colocado un sistema de fijación que permite mantener un ángulo estable.



Figura 19. Dispositivo para la determinación del Coeficiente de Fricción (Método del plano inclinado).

Para el mismo dispositivo, cuando el ángulo de inclinación es "0", fue colocada una polea en la mesa, mediante un soporte, posibilitando la determinación del Coeficiente de Fricción estático y dinámico mediante el sistema de plano horizontal con esfuerzo constante. Para ello, en uno de los extremos de la cuerda se fija la probeta o bloque y en el otro extremo se agrega la carga.



Figura 20. Dispositivo para la determinación de Coeficiente de Fricción (Método de plano horizontal).

2.2 Determinación del Coeficiente de Fricción

Para la determinación del coeficiente de fricción estático, se colocó la probeta sobre el plano inclinado (figura 19) y se aumentó lentamente el ángulo de inclinación, llegando al punto donde cualquier elevación del plano ponía en movimiento el cuerpo. Se midió el ángulo de inclinación. Se repitió la operación 20 veces y se obtuvo el valor promedio. Se determinó el valor del coeficiente de fricción estático como la tangente del ángulo medio. Se elevó el plano inclinado en un ángulo superior ligeramente al valor de inicio del movimiento de deslizamiento del bloque, con el fin de medir el tiempo de movimiento de la probeta en una distancia l y se repitió la medición del tiempo. Se realizaron 3 mediciones y se determinó el valor medio de tiempo. Fue calculado el valor del coeficiente de fricción dinámico ($\mu_d = (g \sin \alpha - (2l/t^2))/g \cos \alpha$). El experimento se repitió para probetas de diferentes materiales.

2.3 Determinación del desgaste adhesivo en función de la rugosidad

Para la determinación del desgaste adhesivo fue utilizado un dispositivo fabricado en el Centro de Investigaciones de Soldadura en un trabajo precedente (figura 21) (Wolpes D- 2011), en base a la norma (ASTM G77-1998).

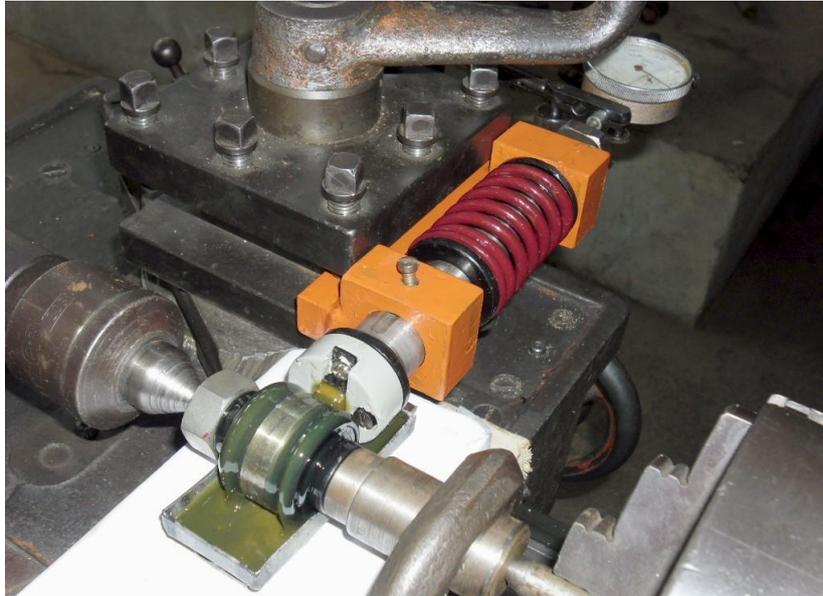


Figura 21. Montaje del dispositivo.

Fueron devastadas las superficies de diferentes probetas (una de las probetas se muestra en la figura 23), utilizando diferentes números de lijas (lija No 150 y lija No 400), para obtener diferentes rugosidades. Dichas superficies fueron comparadas cualitativamente, en cuanto a aspecto visual de la rugosidad. Se realizó un lavado cuidadoso con alcohol de las probetas a ser ensayadas. Luego de secadas, fue pesada cada una de las muestras en una balanza analítica (figura 22), determinándose la masa inicial.



Figura 22. Balanza analítica de precisión Sartorius.

Para el ensayo de desgaste la probeta fue colocada en el portamuestras del dispositivo y este con la probeta fue fijado al portacuchillas del torno. El contracuerpo del dispositivo (anillo de acero montado en un eje) fue colocado en el mandril del torno universal. Con un indicador de carátula fue regulado hasta que se verificó la carga aplicada por el resorte de 10 N. Cada ensayo se realizó durante un tiempo de 10 min, medido con un cronómetro, a 245 rpm como velocidad de giro del anillo de acero. La lubricación para el ensayo se logró mediante la inmersión de la parte inferior del anillo (contracuerpo) en aceite lubricante EP-90 (figura 21), al cual le fue añadida arena sílice para simular la contaminación del aceite.

Luego de realizado cada ensayo de desgaste adhesivo, las probetas fueron lavadas con alcohol y pesadas para determinar su masa final.

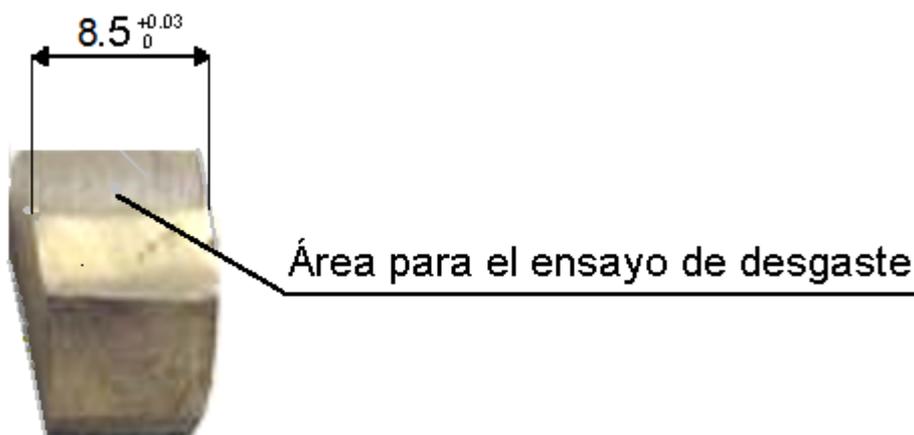
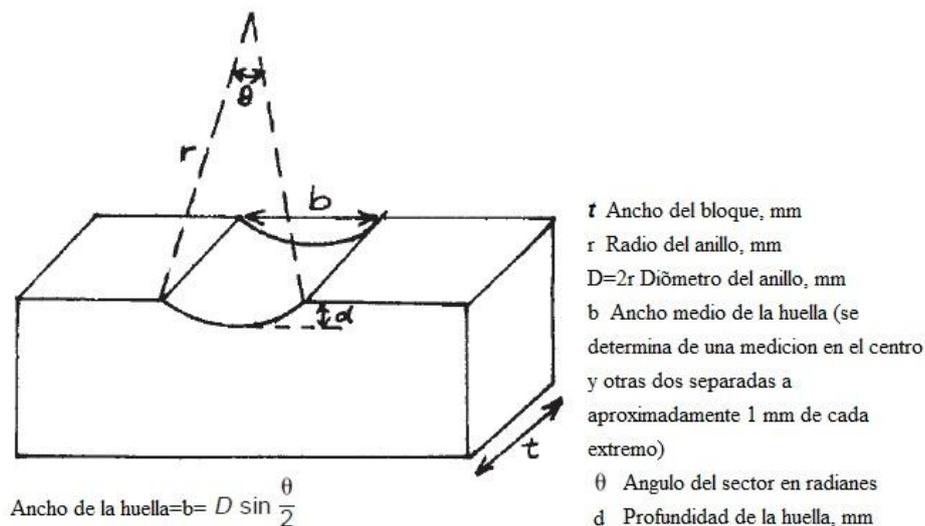


Figura 23. Probeta utilizada para ensayo de desgaste adhesivo

2.3.1 Determinación del desgaste adhesivo por el volumen de la huella

La determinación del desgaste por la pérdida de masa del bloque no es utilizado muchas veces porque puede estar influenciado por la transferencia de material, la creación de películas de óxidos y la penetración del material por el lubricante. En tales casos se utiliza la determinación de la huella de desgaste.

El volumen de la huella de desgaste puede ser determinado a partir del ancho de la huella, según una tabla aportada por la Norma ASTM G 77 (aplicable solo cuando el anillo es de $34,99 \pm 0,025$ mm ($1,377 \pm 0,001$ in) y la huella tiene un ancho de $6,35 + 0,00, -0,025$ mm ($0,250 + 0,00, 0,001$ in). Cuando no sea posible la determinación directa del volumen por la tabla de la norma ASTM G 77, se puede determinar en base a la figura 24.



$$\text{Ancho de la huella} = b = D \sin \frac{\theta}{2}$$

$$\text{Volumen de la huella} = \frac{D^2 t}{8} (\theta - \sin \theta)$$

$$\text{donde } \theta = 2 \sin^{-1} \frac{b}{D}$$

Por tanto, el volumen de la huella se obtiene como:

$$\text{Volumen de la huella} = \frac{D^2 t}{8} \left[2 \sin^{-1} \frac{b}{D} - \sin \left(2 \sin^{-1} \frac{b}{D} \right) \right]$$

Figura 24. Determinación de la pérdida de volumen a partir del ancho de la huella.

2.4 Determinación del desgaste abrasivo en función de la carga

El ensayo de desgaste abrasivo se realizó en una peletizadora de plato, adaptada a tales fines (Figura 25). En el interior de esta fue colocado un plato

con abrasivo (arena de sílice de 0,71 mm de diámetro medio de grano), al cual se le añadió lubricante para provocar el arrastre de las partículas abrasivas (figura 26).



Figura 25. Montaje del ensayo del desgaste abrasivo



Figura 26. Porta muestra y superficie de ensayo.

En la figura 26 se observa también el portamuestras en la parte inferior del portapesas, todo ello fijado a un soporte.

Previo al ensayo, se realizó el lavado cuidadoso con alcohol de las probetas a ser ensayadas, seguido a esto el pesaje de las mismas en una balanza analítica (figura 22), obteniéndose el valor inicial de la masa.

Para el ensayo las muestras fueron colocadas en el portamuestras (Figuras 25 y 26). Fueron ensayadas 3 muestras similares (identificadas como Y, U, Z), variando la carga de ensayo (200g, 500g 1000g, respectivamente). El ensayo duró un tiempo de 10 min, medidos con un cronómetro. Al culminar el ensayo se retiró la probeta, se lavó cuidadosamente con alcohol. Al finalizar los demás ensayo se hace un pesaje final en la balanza analítica. Fueron contadas las vueltas del plato durante 1 minuto (se realizó 5 veces) para determinar las rpm (34 rpm como valor medio).

2.5 Determinación de la densidad y viscosidad de un lubricante

2.5.1 Determinación de la densidad

La densidad puede obtenerse de forma indirecta y de forma directa. Para la obtención indirecta de la densidad, se miden la masa y el volumen por separado y posteriormente se calcula la densidad. La masa se mide habitualmente con una [balanza](#), mientras que el volumen puede medirse determinando la forma del objeto y midiendo las dimensiones apropiadas o mediante el desplazamiento de un líquido, entre otros métodos.

Entre los instrumentos más comunes para la medida de densidades tenemos:

- El [densímetro](#), que permite la medida directa de la densidad de un líquido
- El [picnómetro](#), que permite la medida precisa de la densidad de sólidos, líquidos y gases (picnómetro de gas).
- La [balanza hidrostática](#), que permite calcular densidades de sólidos.

- La [balanza de Mohr](#) (variante de balanza hidrostática), que permite la medida precisa de la densidad de líquidos.

Otra posibilidad para determinar las densidades de líquidos y gases es utilizar un instrumento digital basado en el principio del tubo en U oscilante. August - 2004.

La densidad se mide con un hidrómetro, de acuerdo con la norma (ASTM D 287-2000). La medición, según la referida norma debe realizarse a 15 °C. En un viquer (un tubo de vidrio) se adiciona aceite hasta cierto nivel, luego se introduce el hidrómetro, el cual flotará en el líquido. La lectura se realiza por el valor de la escala coincidente con la superficie del líquido.

Esta propiedad no da criterio suficiente de la calidad de un lubricante usado.

En este trabajo, la densidad fue determinada a partir de la relación de la masa y el volumen. Fue realizado el pesaje de un matraz aforado, cuyo volumen es conocido, en una balanza analítica (figura 22). Luego del pesaje del matraz, le fue adicionado el lubricante hasta el nivel de la marca que coincide con los bordes del menisco. Fue pesado el matraz aforado con el lubricante.

2.5.2 Determinación de la viscosidad dinámica (Absoluta)

Para la determinación de la viscosidad se utiliza el método Höppler, el cual en su esencia consiste de una probeta con dos trazos a una distancia > 50 cm. Se basa en determinar el tiempo en descender una esfera entre los trazos (la velocidad de la esfera dentro del lubricante), se emplea la siguiente ecuación, deducida de la Ley de Stokes:

$$\mu = \frac{2 R^2 (\rho - \rho_1) g}{9 v}$$

Donde,

μ - Viscosidad dinámica, absoluta, centipoise (cPo) (1 cPo=0,01 Po= 0,01 g/cms).

R- Radio de la esfera, mm

ρ y ρ_1 - densidad de la esfera y del lubricante, respectivamente, g/cm^3 .

v- Velocidad de la esfera entre las dos marcas de la probeta, cm/s .

Esta expresión es el resultado de igualar, en la situación de equilibrio aproximadamente estático del descenso de la bola, el valor de la resistencia de desplazamiento de Stokes, $F = -6\pi R\mu v$, y la fuerza peso, $mg = \frac{4}{3}\pi R^3(\rho - \rho_1)g$, corregida para el empuje de Arquímedes, siendo la velocidad v el cociente entre la distancia recorrida, l y el tiempo empleado, t .

Debe ser realizada una corrección debido a la influencia de las paredes de la probeta de radio r sobre la velocidad de caída:

$$K = 1 / (1 + 24R/r)$$

El coeficiente corregido de viscosidad dinámico será: $\mu_{\text{corr}} = \mu k$

Para la determinación de la viscosidad fue medido el diámetro de las esferas con un Pie de Rey. Luego las esferas fueron lavadas con alcohol. Estas fueron pesadas en una balanza analítica (figura 22). Las esferas fueron arrojadas en una probeta con lubricante que tiene una escala y fue medido el tiempo con que cada esfera recorre una distancia dada. Fue medido el diámetro interior de la probeta con el pie de Rey para hacer la corrección de μ .

Capítulo 3: Resultados y análisis.

3.1 Resultados del coeficiente de fricción

Los resultados de las mediciones obtenidos del coeficiente de fricción estático por el método del plano inclinado, como se detalla en el capítulo 2, se muestran en la tabla 3 para pares tribológicos de diferentes materiales. Son mostrados los ángulos de inclinación del plano para el cual la probeta se pone en movimiento inminente para 20 mediciones; así como son dados los valores medios de dichos ángulos y la desviación estándar. En base a los valores de desviación estándar de los ángulos y los valores absolutos obtenidos se hace evidente que no hay una alta dispersión de los valores. A partir de los valores medios del ángulo de inclinación del plano fue determinado el Coeficiente de Fricción Estático como la tangente de dicho ángulo, cuyos resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Valores de los ángulos del plano inclinado y del Coeficiente de Fricción Estático.

Medición	Pares tribológicos		
	Aluminio-Aluminio	Acero inox.-Aluminio	Acero al C.-Aluminio
1	30	22	25
2	32	25	27
3	29	24	28

4	30	23	29
5	27	21	27
6	27	25	26
7	28	26	24
8	29	25	25
9	28	24	26
10	27	23	28
11	29	25	27
12	29	21	24
13	28	27	26

Tabla 3. Valores de los ángulos del plano inclinado y del Coeficiente de Fricción Estático.(Continuación).

14	27	24	30
15	27	26	29
16	30	25	27
17	31	22	24
18	27	23	26
19	28	24	27
20	27	25	26
Media	28,5	24	26,55
Desv. Est.	2,47	1,15	1,93
$\mu_e = \tan\alpha$	0,54	0,44	0,50

A partir de los resultados de la tabla 3 se construye el gráfico de la figura 27, donde se hace más visible el comportamiento comparativo del coeficiente de fricción estático de pares de diferentes materiales.

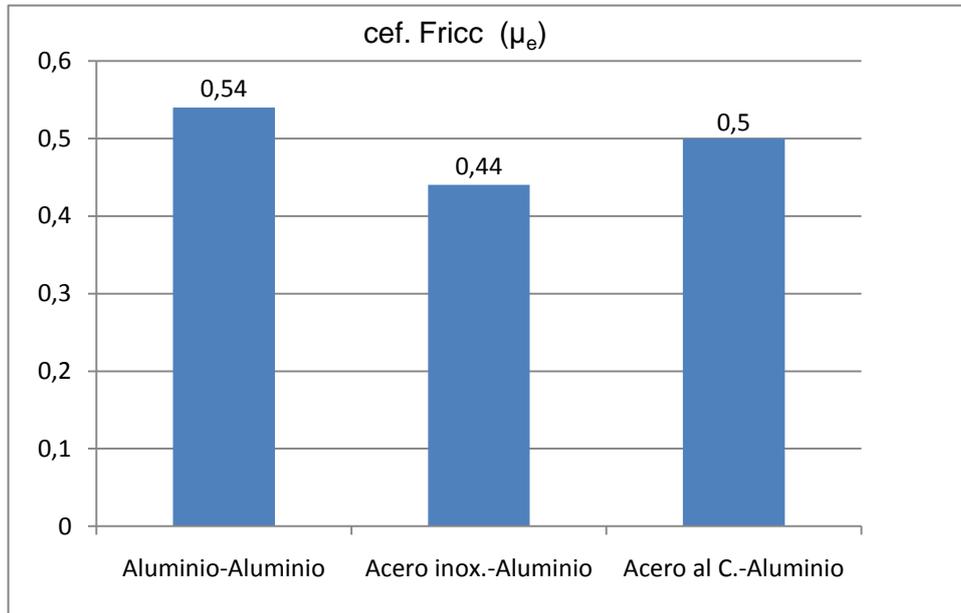


Figura 27. Comportamiento del coeficiente de fricción estático en pares de diferentes materiales.

A la primera observación se hace evidente en la figura 27, que el coeficiente de fricción estático del par aluminio-aluminio es mayor que para los pares aluminio-acero, al tiempo que los pares acero inoxidable-aluminio y acero al carbono-aluminio, muestran valores relativamente próximos entre sí. Una primera explicación está dada por la compatibilidad metalúrgica que como es conocido los materiales que son similares (mayor solubilidad) presentan una mayor adherencia entre sí (Rabinowicz, E- 1995). También pueden existir agentes externos afectando el ensayo a niveles microscópicos, como la rugosidad y la presencia de óxidos que pueden variar la estructura de la superficie del material pudiendo así dar resultados diferentes a los teóricamente esperados. Tales factores deben ser objeto de estudios posteriores.

En la tabla 4 se dan los resultados de las mediciones para la determinación del coeficiente de fricción dinámico. En la tabla se muestran los resultados para

tres mediciones del tiempo de deslizamiento de la probeta por el plano con velocidad uniforme (un ángulo de inclinación ligeramente por encima del ángulo medio obtenido en la medición del coeficiente de fricción estático); así como los valores medios del tiempo y el valor del coeficiente de fricción dinámicos, determinado como por la ecuación: $\mu_d = (g \sin \alpha - (2l/t^2)) / g \cos \alpha$, donde $l = 1.27m$, es el recorrido que realizan las probetas en la canal.

Tabla 4. Comportamiento del tiempo de recorrido para diferentes materiales

Pares de Materiales	Valores del tiempo de deslizamiento para diferentes mediciones (t), s				
	1	2	3	media	Coef.Fric(μ_d)
Aluminio-Aluminio	2.1 7	2.19	2.23	2.19	0.516
Acero inox-Aluminio	1.8 5	1.83	1.80	1.67	0.472
Acero al C-Aluminio	1.2 3	1.35	1.00	1.19	0.370

A partir de los resultados de la tabla 4 se construyó el gráfico de la figura 28, donde se refleja el valor del Coeficiente de Fricción Dinámico. Se puede observar claramente la diferencia entre los materiales, donde se refleja que el par aluminio-aluminio presenta el mayor valor. Esto podría estar relacionado con la compatibilidad metalúrgica y la plasticidad del material que contribuyen al aumento de las componentes adhesiva y deformacional de la fricción (Crespo A-2004). Otro factor que puede estar influenciando es la rugosidad superficial de las muestras ensayadas. Estos aspectos deben ser tomados en consideración para estudios posteriores. Para el caso de los pares acero inoxidable –aluminio y acero al carbono-aluminio hay cierta proximidad de los valores, lo cual se atribuye a la similitud metalúrgica de estos pares tribológicos.

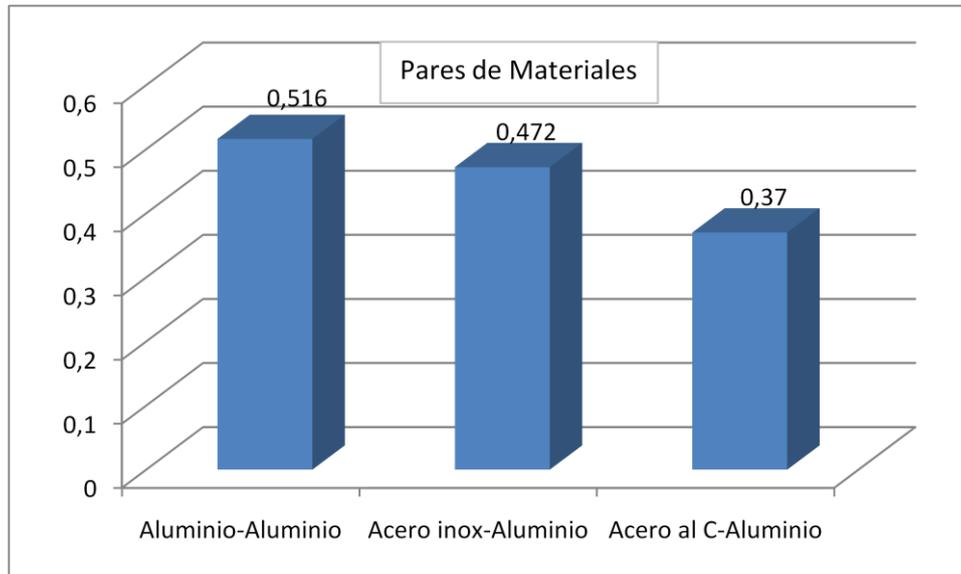


Figura 28. Comportamiento del coeficiente de fricción dinámico en diferentes materiales respecto al tiempo de ensayo.

3.2 Influencia de la rugosidad del material sobre el desgaste adhesivo

Los resultados del comportamiento del desgaste adhesivo en función de la rugosidad, determinados como describe en el capítulo 2, son mostrados en la tabla 5. En la tabla se dan para 2 probetas, con superficies de diferentes rugosidades (la rugosidad no fue medida, fue solo hecho de manera cualitativa a partir del desbaste de la probeta con diferentes lijas), los valores de masa inicial y final de las probetas; así como el tiempo de ensayo, las rpm del torno y el diámetro del anillo contracuerpo.

A partir del tiempo, las rpm del torno y el diámetro del anillo fue determinado el recorrido de ensayo ($R = \text{rpm} \times \text{Perímetro anillo} \times t$), cuyo valor se muestra en la tabla 5. De igual modo, en base a las masas iniciales y finales de las probetas fue determinada la pérdida de masa ($\Delta M = M_i - M_f$), cuyo valor también se muestra en la tabla 5. Finalmente, en base a la pérdida de masa y el recorrido de ensayo fue determinada la resistencia al desgaste ($W = 1 / (\Delta M / R)$), cuyo valor es también dado en la tabla 5.

Tabla: 5. Resultados obtenidos del ensayo del desgaste adhesivo.

Prob	Masa inic. Prob. Mi, g	Masa final Prob. Mf, g	Tiempo ensayo, t, min	rpm torno	Diámetro anillo, mm	Pérd. Masa, ΔM , g	Rec. ensayo R, m	Resist. desg. W, 1/(g/m)	Ancho huella, b, mm	Vol. Huella, mm ³	Masa mat. huella, Δm , g
4	8.8730	8.8638	10:00	245	40	0.0092	307.72	33448.17	4	19159	0.014
5	8.9455	8.9132	10:00	245	40	0.0323	307.72	9527.43	5.25	25194	0.015

Fue utilizada la vía del volumen de la huella para evaluar también el desgaste de las probetas. Para ello se siguió el procedimiento, según describe el capítulo 2. A partir del ancho de la huella, cuyo valor se refleja en la tabla , se determinó el volumen de dicha huella (volumen de material retirado por desgaste) por la ecuación:

$$v = \frac{D^2 t}{8} \left[2 \sin^{-1} \frac{b}{D} - \sin \left(2 \sin^{-1} \frac{b}{D} \right) \right]$$

Donde, t-ancho del bloque o muestra, D-diámetro del anillo y b-ancho de la huella.

El volumen de desgaste fue multiplicado por la densidad del latón (8,80 g/cm³ (Callister,Jr-1995) para obtener la masa de material retirado de la huella, cuyo valor de muestra en la tabla 5.

A partir de los resultados de la tabla 5 se construye el gráfico de la figura 29, que refleja el comportamiento del desgaste para muestras de diferentes rugosidades (diferentes desbastes).

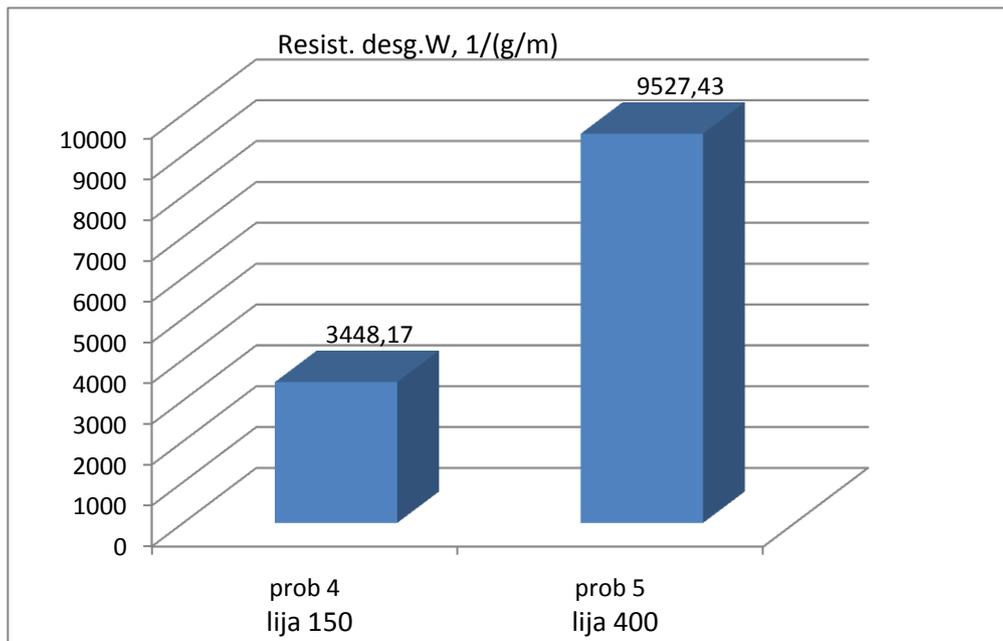


Figura 29. Comportamiento del desgaste adhesivo en función de la rugosidad.

De la observación de la figura 29, se observa que la probeta de menor rugosidad (lija 400) muestra una menor pérdida de masa (mayor resistencia al desgaste) que la probeta de mayor rugosidad (lija 150). Lo anterior era algo esperado, una mayor rugosidad provoca inicialmente un mayor desgaste porque las crestas de las asperezas son retiradas con relativa facilidad, o sea dicho en otras palabras, la probeta de menor rugosidad está más próxima de la rugosidad óptima.

Un análisis particular merecen los resultados obtenidos de desgaste a partir del volumen de la huella, los cuales superan el 5 % de diferencia si se les compara con el resultado por pérdida de masa (la norma ASTM G-77 -1998, da criterios acerca de la validez de estos valores). La diferencia tan significativa de los valores obtenidos puede estar dada por la falta de uniformidad en el contacto de la muestra y el anillo contracuerpo, es también declarado en la norma que este factor es el punto crítico en la realización de este ensayo. Otro factor que influye en la diferencia de resultados a partir del volumen de la huella es el valor de la densidad del latón, el cual fue tomado de la literatura y evidentemente difiere del latón que realmente se utilizó para la fabricación de la probeta.

3.3 Comportamiento del desgaste abrasivo en función de la carga

El efecto de la carga sobre el desgaste abrasivo fue realizado según lo descrito en el capítulo 2. En la tabla 6 se muestran la carga aplicada, los valores de masa inicial y final de las probetas, el tiempo de ensayo y las rpm del plato. La pérdida de masa fue determinada por la diferencia entre la masa inicial y final. El recorrido de ensayo ($R = \text{rpm} \cdot \text{Perímetro} \cdot t$, $R = 186.83 \text{ m}$) fue calculado en base al perímetro de una vuelta (perímetro = $\pi \cdot d = 3.14 \cdot 0.175 = 0.5495 \text{ m}$), a las rpm y al tiempo de ensayo. La resistencia al desgaste ($W = 1 / (\Delta M / R)$) fue determinada en base a la pérdida de masa y el recorrido de ensayo. Todos los resultados determinados se reportan en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados obtenidos del ensayo del desgaste abrasivo.

Probeta	Carga, g	Mi, g	Mf, g	t, min	rpm del disco	ΔM , g	R, m	W, 1/(g/m)
Y	200	92,8050	92,7798	10	34	0,0252	186,83	7413,8889
U	500	103,0820	102,4230	10	34	0,0691	186,83	2703,7627
Z	1000	85,8110	83,9370	10	34	0,1874	186,83	996,9584

En base a los resultados de la tabla 6 se construyó el gráfico de la figura 30 que refleja el comportamiento al desgaste abrasivo en función de la carga. Se observa que el aumento de la carga provoca un aumento lineal del desgaste, lo cual se corresponde a lo reportado en la literatura (Zun Gahr-1987)). Ello se explica por una mayor penetración de las partículas abrasivas en la superficie de la probeta en la medida que aumenta la carga, provocando surcos más profundos. Si la carga fuese suficientemente alta podría llegar un momento en que las partículas del abrasivo se redondean y se pierde el comportamiento lineal.

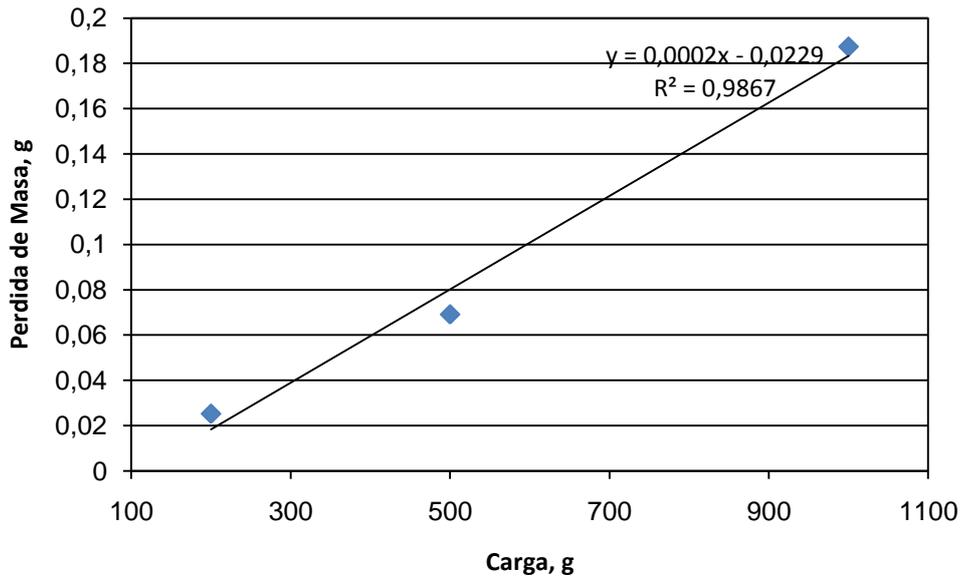


Figura 30. Comportamiento del desgaste abrasivo en función a la carga aplicada.

3.4 Resultados de la determinación de las propiedades físicas de un lubricante

3.4.1 Determinación de la densidad del lubricante

Para la determinación de la densidad fueron pesados dos matraces aforados, en correspondencia a lo descrito en el capítulo 2. Los valores de las masas de cada uno de los matraces sin lubricante y con este se muestran en la tabla 7. También se muestra en la referida tabla el valor de la masa del lubricante en cada caso, obtenida de la diferencia de la masa del matraz con lubricante y sin este ($m_L = m_{m+L} - m_m$); así como los valores obtenidos de densidad en cada caso ($\rho_L = m_L / V_m$, g/cm³).

Tabla 7. Valores de masa de los matraces y de la densidad del lubricante.

Matraz	Volumen del matraz, (V_m), cm ³	Masa del matraz vacío (m_m), g	Masa del matraz con lubricante (m_{m+L}), g	Masa del lubricante, g	Densidad del lubricante, g/cm ³
Matraz 1	25	14,6885	36,6707	21.9822	0,8792
Matraz 2	25	17,7158	39,6265	21.9107	0,8764

Desde el punto de vista de aplicación del lubricante su densidad no se considera una propiedad de alto significado, ya que no define mucho en su desempeño. En este trabajo se ha determinado con el propósito fundamental de utilizar su valor en la determinación posterior de la viscosidad.

3.4.2 Determinación de la viscosidad del lubricante

La viscosidad del lubricante fue determinada en correspondencia a lo descrito en el capítulo 2. En la tabla 8 se dan los resultados de las mediciones para la determinación de la viscosidad del lubricante (radio de las esferas, peso de las esferas).

A partir de la relación de la masa promedio de las esferas y de su volumen fue determinada la densidad de las esferas ($\rho_e = (m_{em}/V_e) = m_{em} / (4/3\pi R_e^3)$), cuyos valores se dan en la tabla 8.

Tabla 8. Masas de las esferas y sus densidades respectivas.

Esfera	Radio de la esfera (Re), mm	Masa de las esferas, g					Densidad de las esferas, g/cm ³
		m _{e1}	m _{e2}	m _{e3}	m _{em}	Desv Est., S _{me}	ρ_e
Cristal	6	2,3492	2,3809	2,3731	2,3676	0,0134	2,619

Los valores del tiempo en que cada esfera recorre la distancia de 200 mm en la probeta son mostrados en la tabla 9. También son mostrados los valores de velocidad con que cada esfera desciende.

Tabla 9. Tiempo de descenso y velocidad de las esferas en el lubricante.

Esfera	Tiempo en que las esferas recorren la distancia (t), s	Velocidad de las esferas (v_e) cm/s
Cristal 1	18	1,11
Cristal 2	20	1
Cristal 3	22	0,90

Fue calculada la viscosidad para cada una de las esferas, sustituyendo en la fórmula que sigue:

$$\mu_L = \frac{2 R_{em}^2 (\rho_e - \rho_L) g}{9 v_e}$$

Donde, μ_L - viscosidad del lubricante (cPo) , R_e - radio de la esfera (cm), ρ_e - densidad de la esfera (g/cm^3), ρ_L - densidad del lubricante (g/cm^3), v_e - velocidad de la esfera (cm/s) y g - aceleración de la gravedad (cm/s^2).

Los valores de viscosidad del lubricante para cada medición, el valor medio para cada tipo de esfera y la desviación estándar son mostrados en la tabla 10. Fue determinado el valor corregido de viscosidad en base a los valores de los diámetros de la esfera y el de la probeta ($\mu_{\text{corr.}} = \mu k$, $k = 1/(1 + 24R_e/r_{\text{prob.}})$). Los valores de viscosidad corregida son dados en la tabla 10

Tabla 10. Valores de viscosidad del lubricante.

Esfera	Viscosidad del lubricante (μ_L), cPo
Cristal 1	125,39
Cristal 2	139,18
Cristal 3	154,65
Visc. Media μ_{Lm} , cPo	139,74
Desv. Est. S_{μ_L} , cPo	11,96
Viscosidad corregida del lubricante, μ_{Lcorr} , cPo	7,35

De los resultados de viscosidad de la tabla 10 se hace evidente que los valores obtenidos con las esferas de cristal es un cierto criterio de reproducibilidad del método de ensayo.

En base a los resultados de la viscosidad dinámica y de la densidad del lubricante se obtiene el valor de la densidad cinemática ($\nu = \mu_{Lcorr} / \rho_L$), el cual es de 8,36 cSt a la temperatura ambiente.

3.5 Técnicas operatorias para la realización de los ensayos

3.5.1 Técnica operatoria para el coeficiente de fricción

En el desarrollo del ensayo se realizarán las siguientes operaciones:

1. Coloque el bloque sobre el plano inclinado y aumente lentamente el ángulo de inclinación, llegando al punto donde cualquier elevación del plano pone en movimiento el cuerpo. Mida el ángulo de inclinación. Repita la operación no menos de 20 veces para obtener un valor promedio. Determine el valor del coeficiente de fricción estático como la tangente del ángulo medio. Repita la operación para diferentes materiales.

4. Fije el plano inclinado en un ángulo que supere ligeramente el valor de inicio del movimiento de deslizamiento del bloque. Mida el tiempo de movimiento del bloque en una distancia l, repita la medición del tiempo no menos de 20 veces. Determine el valor medio de tiempo y calcule el valor del coeficiente de fricción dinámico ($\mu_d = (g \sin \alpha - (2l/t^2)) / g \cos \alpha$). Repita el experimento para bloques de diferentes materiales.

Mat.	Valores del tiempo de deslizamiento para diferentes mediciones (t), s																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

3.5.2 Técnica operatoria para el ensayo del desgaste adhesivo

En el desarrollo del ensayo se realizarán las siguientes operaciones:

1. Hacer un desbaste en la superficie de diferentes probetas utilizando diferentes números de lijas (lija No 80 y lija No 400), de modo que se elaboren probetas de diferentes rugosidades.
2. Escribir una comparación cualitativa de las superficies de cada una de las probetas a ensayar, en cuanto a aspecto visual de la rugosidad.
3. Lavar cuidadosamente con alcohol las probetas a ser ensayadas.
4. Pesaje de cada una de las probetas lavadas en una balanza analítica (Determinación de la masa inicial, Mi y escribirla en la tabla).

5. Montaje de la probeta en el dispositivo para el ensayo de desgaste, el cual fue previamente montado en el torno.
6. Realización del ensayo de desgaste durante un tiempo de 10 min, medido con un cronómetro (Tiempo de ensayo, t). Escribir el tiempo en la tabla.
7. Extraer la probeta del portamuestras del dispositivo.
8. Realizar las operaciones 4, 5 y 6 tantas veces como probetas fueron pesadas en la operación 3.
9. Lavado de cada una de las probetas ensayadas al desgaste.
10. Pesaje de manera independiente de cada una de las probetas (Determinación de la masa final, M_f y escribirla en la tabla).
11. Escribir una comparación cualitativa de las superficies de cada una de las probetas ensayadas, en cuanto a aspecto visual de la rugosidad.
12. Medir el diámetro del anillo del dispositivo (D, mm) y escribir en la tabla.
13. Escribir en la tabla las rpm del torno.
14. Con ayuda de un microscopio de bajo aumento con escala en el ocular, determinar el ancho medio de la huella de desgaste (b, mm).

Prob	Mas inic. Prot Mi, g	Mas final Prot Mf, g	Tiempo ensayo t, s	rpm torno	Diám anillo D, mm	Anch huella b, mm	Pérd. Masa ΔM , g	Rec. ensay R, m	Resist. desg. W, 1/(g/m	Vol. Huella mm ³	Masa mat. huella Δm , g

15. Completar la tabla, determinando:

- la Pérdida de masa ($\Delta M = M_i - M_f$, g),
- el recorrido del ensayo ($R = \text{rpm} \times \text{Perímetro anillo} \times t$, m),
- la resistencia al desgaste ($W = 1/(\Delta M/R)$).

- volumen de la huella de desgaste en base a la figura 24. El volumen de la huella obtenido, llevarlo a cm^3 y multiplicarlo por la densidad del material de la muestra para obtener la masa de material retirado de la huella ($\Delta m = \rho \times \text{vol. huella}$, g). Comparar los valores obtenidos de ΔM y Δm .

3.5.3 Técnica operatoria para el ensayo del desgaste abrasivo

En el desarrollo del ensayo se realizarán las siguientes operaciones:

1. Lavado cuidadoso con alcohol de las probetas a ser ensayadas.
2. Pesaje en una balanza analítica de cada una de las probetas lavadas (Determinación de la masa inicial, M_i y escribirla en la Tabla).

Probeta	M_i , g	M_f , g	t, min	rpm del disco	ΔM , g	R, m	W, $1/(\text{g/m})$

3. Montaje de la probeta en el portamuestras del equipo para el ensayo de desgaste.
4. Realización del ensayo de desgaste durante un tiempo de 10 min, medido con un cronómetro (Tiempo de ensayo, t).
5. Extraer la probeta del portamuestras del dispositivo.
6. Realizar las operaciones 3, 4 y 5 tantas veces como probetas fueron pesadas en la operación 2, pero variando la carga.
7. Lavar cada una de las probetas ensayadas al desgaste.
8. Pesaje de manera independiente de cada una de las probetas (Determinación de la masa final, M_f y escribirla en la tabla).
9. Realizar la observación visual de la superficie de las probetas ensayadas y hacer una descripción cualitativa de cada una.

10. Determinar las rpm del plato del equipo.
11. Determinar el diámetro desde el centro del disco hasta la probeta.
12. Completar la tabla 1, determinando: la Pérdida de masa ($\Delta M = M_i - M_f$), el recorrido ($R = \text{rpm del disco} \times \text{Perímetro de recorrido} \times t$) y la resistencia al desgaste ($W = 1 / (\Delta M / R)$).

3.5.4 Técnica operatoria para el ensayo de determinación de densidad y viscosidad de un lubricante

En el desarrollo del ensayo se realizarán las siguientes operaciones:

Parte I: Determinación de la densidad del lubricante.

1. Realice el pesaje del matraz aforado, cuyo volumen es conocido, en una balanza analítica (realizar no menos de tres pesadas).

Masa del matraz aforado, g					Volumen del matraz, cm ³
m _{m1}	m _{m2}	m _{m3}	m _{mm}	Desviación Estándar, S _m	V _m

2. Adicione lubricante en el matraz aforado hasta el nivel de la marca que coincida con los bordes del menisco.
3. Realice el pesaje del matraz aforado con el lubricante.

Masa del matraz aforado con lubricante, g

--	--	--	--	--	--	--	--

6. Pese las esferas en la balanza analítica (no tomarlas con las manos para no ensuciarlas), realice no menos de tres pesajes. Determine el valor medio de la masa de las esferas y la desviación estándar.

Esfera	Masa de las esferas, g					Densidad de las esferas, g/cm ³
	m _{e1}	m _{e2}	m _{e3}	m _{em}	Desv. Est., S _{me}	ρ _e

7. Calcule la densidad de cada esfera a partir de su masa m_{em} y su radio R_{em} y escriba el resultado en la tabla anterior

$$\rho_e = (m_{em}/V_e) = m_{em} / (4/3\pi R_{em}^3)$$

8. Vierta el lubricante en la probeta que tiene una marca en la parte inferior y superior. El líquido debe estar bien por encima de la marca superior.
9. Arroje las esferas en la probeta con lubricante y mida el tiempo con que cada esfera recorre la distancia entre las marcas. Mida la distancia entre las marcas y calcule la velocidad límite de cada esfera.

Esfera	Tiempo en que las esferas recorren la distancia	Velocidad de las esferas

	t, s	v _e , cm/s

10. Calcule la viscosidad para cada una de las esferas, sustituyendo en la fórmula y determine el valor medio y la desviación estándar:

$$\mu_L = \frac{2 R_{em}^2 (\rho_e - \rho_L) g}{9 v_e}$$

Esfera	Viscosidad del lubricante
	μ _L , cPo
Visc. Media μ _{Lm} , cPo	
Desv. Est. S _{μL} , cPo	
Viscosidad corregida del lubricante, μ _{Lcorr.} , cPo	

11. Mida el radio interior de la probeta y haga la corrección de μ. Escriba el resultado en la tabla anterior.

$$\mu_{\text{corr.}} = \mu k,$$

$$\text{donde: } k = 1 / (1 + 24R_{\text{em}} / r_{\text{prob.}})$$

Conclusiones

1. Los ensayos de determinación del coeficiente de fricción, de desgaste adhesivo y abrasivo y de determinación de las propiedades de los lubricantes montados y validados permiten, en base a las técnicas operatorias propuestas, la realización de ensayos con fines docentes y con fines investigativos.

2. Los resultados del coeficiente de fricción estático muestran su mayor valor para el par aluminio-aluminio, al tiempo que para los pares acero inoxidable-aluminio y acero al carbono-aluminio los resultados son similares, lo cual se debe a la componente adhesiva del coeficiente de fricción, vinculada a la compatibilidad metalúrgica de los pares. De igual modo, el coeficiente de fricción dinámico del par aluminio-aluminio es mayor, asociado a la misma causa.

3. Con el aumento de la rugosidad aumenta el desgaste de la probeta (la probeta de menor rugosidad (lija 400) muestra una menor pérdida de masa (mayor resistencia al desgaste) que la probeta de mayor rugosidad (lija 150)). Ello se asocia fundamentalmente a que la probeta de menor rugosidad está más próxima de la rugosidad óptima.

4. Los resultados obtenidos de desgaste adhesivo a partir del volumen de la huella superan el 5 % de diferencia si se les compara con el resultado por pérdida de masa. La diferencia de los valores obtenidos puede estar dada por la falta de uniformidad en el contacto de la muestra y el anillo contracuerpo, lo cual constituye un elemento crítico de este tipo de ensayo.

5. Con el aumento de la carga el desgaste abrasivo aumenta linealmente, debido a una mayor penetración de las partículas abrasivas en la superficie de la probeta en la medida que aumenta la carga, provocando surcos más profundos.

6. De los resultados de viscosidad 10 se hace evidente que los valores obtenidos con las esferas de cristal es un cierto criterio de reproducibilidad del método de ensayo. Al comparar el valor de viscosidad obtenido (7,35 cPo) para el aceite EP 90 (SAE 90) con el valor de viscosidad para este tipo de lubricante según la norma (DIN 51512-2000) (12,53-22,01 cPo,), se hace evidente que el método utilizado es relativamente adecuado. El valor de la densidad cinemática es de 8,36 a la temperatura ambiente.

Recomendaciones

1. Aplicar los resultados del montaje y validación de los ensayos a prácticas de laboratorio en la docencia y a la investigación en la ejecución de proyectos.
2. Aplicar la experiencia adquirida en el presente trabajo al montaje y la validación de otros ensayos tribológicos.

Bibliografía

1. ASTM G-40 ASTM G 40-02 Standard Terminology Relating to Wear and Erosion.
2. ASTM G115-04 Standard Guide for Measuring and Reporting Friction
3. ASTM G77-98. Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test Designation: G 77 – 98. 1998.
4. Albella, J. M., A. M. Cintas, T. Miranda y J. M. Serratos. "Introducción a la ciencia de los materiales". Ed. C.S.I.C, Madrid, 1993, 749 pág

5. Axén N. y otros. Modern Tribology Handbook Cap. 13. 2001.
6. Bhushan B. Modern Tribology Handbook. Department of Mechanical Engineering. The Ohio State University, 2009.
7. Casado M., P.O., Basterra A., Acuña L. Técnicas de ensayos no destructivos CIDEMCO. 2005.
8. Cedre E. Recuperación de piezas afectadas por desgaste, Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), 2004.
9. Cruz-Crespo A. Material Didáctico "Temas I, II y III. Coefficients Diploma. UCLV, 2004.
10. Current edition adopted Aug. 15, 1992. Published October 1992. Originally published as D 287 – 28 T, replacing former D 47. Last previous edition D 287 – 82 (1987) e1. (Reapproved 2000)
11. Colectivo de autores. Procedimiento para el análisis metalográfico. 2008.
12. Colectivo de autores. Tribología: Fricción desgaste y lubricación Cap. 4. 2002.
13. Colectivo de autores. Handbook de Tribología. Desgaste de los cuerpos sólidos, Cap. 4. 2001.
14. Correa E. O. Evaluación de la resistencia al desgaste de aleaciones
15. Desarrolladas para soldadura de revestimiento duro para uso bajo condiciones altamente abrasivas. Disertación de Maestría. Universidad Federal de Sao Carlos. Sao Carlos, 2005.
16. Dobrovolski V. y otros, Elementos de Máquina. 1970. Anónimo CIS UCLV, Inspección basada en riesgo en calderas y recipientes a presión. 2005.
17. Eugene A. Avallone, Theodore Bauemeister III, Manual del Ing. Mecánico, Tercera Edición. Editorial McGraw-Hill, 1999.
- 18.
19. Fuentes, R. el desgaste <http://quimica.ugto.mx/revista/2/Desgaste.htm>. Consultado en febrero de 2013.
20. Gwidon W. Stachowiak & Andrew W. Batchelor. Engineering Tribology. Second Edition. Butterworth Heinemann, 2008.

21. Herrera A. Administración del Mantenimiento. Monografía. Ed. UPONIC. Managua. 2005.
22. Introducción a la ciencia de los materiales Callister, Jr 1995.
23. Kato K. y otros, Wear Mechanisms. 2001.
24. Lázaro Pino. Hierros aleados resistentes al desgaste. <http://www.monografias.com/trabajos15/hierros-aleados/hierros-aleados.shtml>. Consultado en febrero de 2013
25. Rabinowicz, E. (1995). Friction and Wear of Materials. New York, John Wiley and Sons.
26. Robell Raul Ochoa Casal. Valoración teórica sobre el desgaste abrasivo en los elementos de trabajo de las maquinas agrícolas. Departamento de Mecanización. Facultad de Ingeniería. Universidad de Granma 1998.
27. Ribeiro R. Evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo de revestimientos soldados tipo Fe-C-Cr utilizados en la industria sucroalcoholera. Disertación de Maestría. Universidad Estatal Paulista. Ilha Solteira, 2004.
28. T. William Lambe, Robert V. Whitman. Mecánica de Suelos. Instituto Tecnológico de Massachusetts. Noriega Editores. México. 1997. ISBN 9691818946
29. The first Eureka moment, Science 305: 1219, August 2004.
30. Williams, J. A. (2005). "Wear and wear particles - Some fundamentals." Tribology International 38(10): 863-870
31. Zun Gahr K. H. Microestructure and ware of materials. Elsevier, 1987, 561 pág.