



# 1. Marco Referencial

---

## 1.1. Antecedentes

A nivel internacional, en Ecuador, Acurio [7], realizó el diseño, construcción y puesta en marcha de un equipo para ensayos de desgaste abrasivo. El diseño cuenta con referencia a métodos de prueba estandarizados, tales como la norma ASTM G65, para la medición de la abrasión usando el equipo arena seca/rueda de caucho; norma ASTM G105, para la medición de la abrasión usando el equipo arena húmeda/rueda de caucho y, la norma ASTM B611 para la evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo de carburos cementados. Primero, diseñó los componentes principales de la máquina que, son el disco, el difusor de arena y el sistema de brazo de palanca. Una vez que se completó el diseño, llevó a cabo los cálculos analíticos para el mecanismo, la potencia requerida y el diseño de los demás componentes. Posteriormente, determinó el tamaño del motor, el sistema de tacómetro o contador de vueltas y la regulación de velocidad. Efectuó la construcción de las partes mecánicas y el montaje del sistema eléctrico, y finalmente, puso en marcha la máquina, incluyendo la prueba por separado de los diferentes mecanismos: el sistema de brazo, el motor y el punto de tangente al disco. En Santo Domingo en el año 2013, Soto y sus colaboradores [8], diseñaron una máquina que simula el desgaste abrasivo en seco y el desgaste abrasivo en húmedo según los parámetros de la norma ASTM G65 y ASTM G105 respectivamente, la combinación de los dos métodos permitió una configuración que se ajusta totalmente al procedimiento descrito, para lo cual, llevaron a cabo cálculos y evaluaciones de la resistencia mecánica. Además, se analizaron las cargas y esfuerzos para determinar la geometría del diseño, parámetros mecánicos y físicos utilizando la teoría de cálculo de resistencia de materiales. Luego, se seleccionaron los materiales y dimensiones más adecuados, usando herramientas de simulación por medio de un factor de seguridad específico que puede mejorar la fiabilidad del equipo. A nivel nacional. Marulanda y otros [9], diseñaron, construyeron y pusieron en operación un tribómetro que se ajustaba a la norma técnica ASTM G65, adelantaron pruebas para demostrar la confiabilidad de la máquina bajo esta norma. El propósito del tribómetro, consistía en hacer pruebas de desgaste confiables, entendida como una herramienta más para evaluar las propiedades de los

materiales, mejorar el conocimiento tribológico y analizar el comportamiento de diferentes materiales, para predecir el ciclo de vida de las piezas mecánicas; determinar cuándo reemplazarlas y ahorrar tiempo y recursos a la industria.

W. Gutiérrez [10], construyó y puso en marcha un banco de ensayo para la evaluación del desgaste abrasivo con arena seca y rueda de caucho de dos recubrimientos con base níquel según norma ASTM G 65. El primero, Metaceram 23075, con agregados cerámicos de carburo de tungsteno y cobalto WC/Co y el segundo, Nitec 10224 con adiciones de hierro, boro y silicio; aplicados sobre sustratos de fundición gris y bronce fosforado, mediante la técnica de proyección térmica a la llama. En este trabajo, se calibraron las variables como el diámetro y la dureza del revestimiento de caucho, el tamaño de las partículas, la humedad, el flujo de abrasivo, la velocidad del motor y la fuerza aplicada a la muestra. Adicionalmente, se verificó el funcionamiento del equipo por medio de pruebas de desgaste abrasivo de acuerdo con el Procedimiento B de la norma ASTM G65, para obtener resultados repetibles para cada material.

F. Romo y D. Ochoa [11], diseñaron e implementaron una máquina tribológica para evaluar la resistencia al desgaste en seco, la cual cumplió con los lineamientos establecidos por la norma ASTM G65; para la implementación, se validó la máquina por medio de diferentes materiales. La metodología empleada para el diseño, tuvo como finalidad complementar lo obtenido en los cálculos verificados, con los resultados que arrojaron las simulaciones en el software SolidWorks; de esa manera, se procedió a seleccionar los elementos necesarios para la construcción del equipo, y su puesta a punto.

En cuanto al control de los procesos, este ha evolucionado desde el manual hasta el tipo distribuido actualmente, en él, se integran componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos, dando origen a lo que se conoce hoy en día, como la Automatización Moderna [12], en gran parte, gracias a la aparición y el bajo costo del Controlador Lógico Programable (PLC por sus siglas en inglés, Programmable Logic Controller), que ha permitido la integración de sensores, transmisores, y elementos finales de control, para coordinar las tres acciones básicas de un sistema de control: medición, decisión y acción [13]. Para que los equipos de laboratorio de ingeniería



e investigación efectúen una fácil operación y una correcta regulación, es necesario establecer un buen control, que permita obtener el máximo de seguridad y fiabilidad en la muestra. Hoy en día, la automatización en los equipos de evaluación de datos es tal, que la figura del hombre solo se ve en la parte de control y supervisión del sistema [12,13].

## **1.2. Marco Teórico**

### **1.2.1. Tribología**

Según la norma ASTM G40-22a [14], la tribología es la ciencia encargada de estudiar el comportamiento de superficies frente al desgaste, la fricción y la lubricación y cómo estos fenómenos, en caso de no ser bien entendidos, llevan al deterioro de piezas y equipos industriales. Por tanto, es un tema de carácter interdisciplinar, coadyuvado por varias disciplinas, dentro de las que se destacan la física, la química, la ingeniería mecánica, la ingeniería de materiales, entre muchas otras. Incluso, la naturaleza misma, nos muestra numerosos ejemplos de la presencia de este fenómeno y la forma en la que puede ser evidenciada [3, 4,5]. El principal objetivo de la tribología, es alargar la vida de una máquina, reduciendo la fricción y el desgaste de sus componentes, evitando interrupciones en el funcionamiento por sobrecalentamiento, fallas y otros fenómenos asociados al descuido de la lubricación, así como al desgaste, optimizando la transferencia de energía en los componentes mecánicos. Aunque el término tribología se ha utilizado desde mediados del siglo XX.

El interés por la tribología va más allá de la historia misma, ya que, se descubrió que las herramientas de perforación utilizadas en la era Paleolítica, se sujetaban con un casquillo hecho de asta o hueso. Documentos históricos registran, el uso de la rueda cerca del 3500 a. C [15], prueba del interés ancestral por promover movimientos de traslación. Por otro lado, se sabe que los egipcios adquirieron conocimientos sobre la fricción y la lubricación, un ejemplo de ello, se encuentra en sus carruajes, en los que utilizaban primitivos lubricantes a base de grasas animales para soportar los cojinetes de sus ejes [16]. La tribología existe en casi todos los aspectos de la industria moderna; no obstante, algunos de los componentes más populares de esta ciencia son: cojinetes, sellos, frenos, embragues, pistones, engranajes, levas y más. Las aplicaciones comunes consideradas para estudiar la tribología en su operación incluyen motores eléctricos,

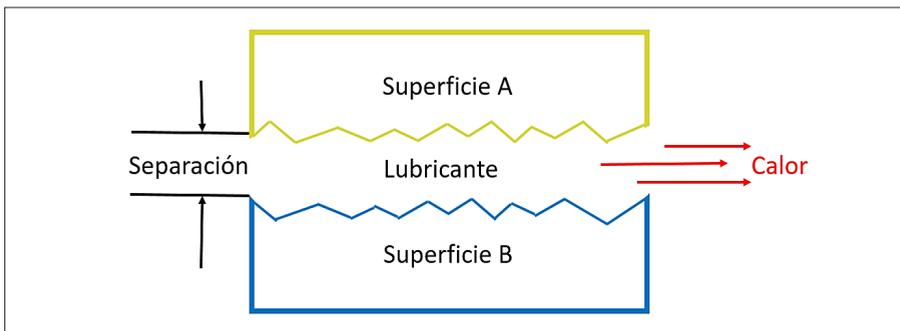
motores de combustión interna, turbinas, procesos de corte, fundiciones y maquinaria en general [16]. En resumen, la aplicación del conocimiento tribológico conduce a:

- Ahorro de materia prima
- Prolongar la vida útil de las máquinas y herramientas
- Conservar los recursos naturales
- Ahorro y optimización de energía
- Protección al medio ambiente
- Ahorro económico

### 1.2.2. Lubricación

Se define como una técnica para reducir la fricción entre dos superficies en contacto y que exhiben movimiento relativo entre sí [15]. El propósito de la lubricación, es separar dos superficies deslizantes opuestas, permitiendo que el proceso de deslizamiento avance con la menor fricción posible para que no haya daños asociados por la fricción entre ellas. La Figura 1., muestra que, mediante la aplicación de una película lubricante de suficiente espesor entre las dos superficies en contacto, se ayuda a soportar la carga o presión desarrollada entre las superficies opuestas para evitar el desgaste.

Durante las operaciones de lubricación, la mayoría de las aplicaciones consideran que el lubricante tiene diferentes tareas durante su operación, que incluyen limpieza, refrigeración, protección, etc. [15]:



**Figura 1.** Película de lubricante entre dos superficies [15]. Figura modificada



- **Lubricante:** Su propósito, es reducir la fricción entre las superficies en contacto, lo que reduce la fricción, el desgaste y, por lo tanto, permite una mejor transferencia de energía.
- **Refrigerante:** Cualquier material que reduzca la fricción, actuará como refrigerante, ya que, la reducción de la fricción reduce la temperatura de funcionamiento de los componentes. Por otra parte, algunas máquinas, aunque correctamente lubricadas, generan mucho calor durante su funcionamiento. Para evitar el sobrecalentamiento, los lubricantes a menudo, pueden transferir calor de áreas más calientes a áreas más frías. Un ejemplo de tal aplicación, es la de lubricantes/refrigerantes durante el mecanizado, donde el lubricante previene el desgaste excesivo durante el desbaste, lo que a su vez, puede disipar el exceso de calor del proceso.
- **Anticorrosiva:** Por naturaleza, los lubricantes no deberían crear corrosión en las superficies, lo ideal es que protejan o inhiban los daños causados por el agua, los ácidos y otros agentes, que, pueden contaminar el sistema. La protección contra la corrosión de los lubricantes toma dos formas: una, es proporcionar una barrera física para prevenir el ataque químico, y la otra, es neutralizar los químicos corrosivos que pueden generarse durante la operación del equipo.
- **Mantenimiento o limpieza:** La eficiencia de un equipo puede verse afectada por la contaminación de sus componentes con sustancias comunes como polvo, arena, productos corrosivos o abrasivos. Las partículas sólidas pueden aumentar el desgaste, corroer o bloquear las líneas de lubricación y los filtros. Durante el proceso de lubricación, estos ayudan a limpiar los dispositivos mecánicos, y en algunos casos, se agregan aditivos especiales a los lubricantes para dispersar partículas contaminantes en el aceite, partículas en suspensión, antioxidantes, etc.

### 1.2.3. Fricción

Es definido como el rozamiento o fricción dado entre dos superficies en contacto con la fuerza, y que a su vez, impide que una superficie se mueva sobre la otra (rozamiento cinético), o la fuerza que no deja iniciar el movimiento (rozamiento estático). Todas las fuerzas de fricción, están en

dirección opuesta al movimiento relativo entre las superficies [16]. Existen dos tipos principales de rozamiento o fricción, el rozamiento estático y el rozamiento dinámico o cinético.

### 1.2.3.1. Fuerza de rozamiento estática

Conocida como la fuerza que se produce entre dos objetos que no se mueven entre sí. En la Figura 2., se muestra que la fuerza ( $F$ ) aplicada a un lado del bloque con peso  $W=mg$  aumenta gradualmente, pero, el bloque permanece estacionario. Dado que la aceleración es cero, la fuerza aplicada es igual y contraria a la fuerza de rozamiento estático ( $F_s$ ). La fuerza máxima de rozamiento, corresponde al momento en el que el bloque está a punto de deslizarse, esto es:

$$F_s = \mu_s \cdot N \quad (\text{Ec 1})$$

Donde,

$F_s =$  Fuerza de fricción estática (N)

$\mu_s =$  Coeficiente de fricción

$N =$  Fuerza normal (N)

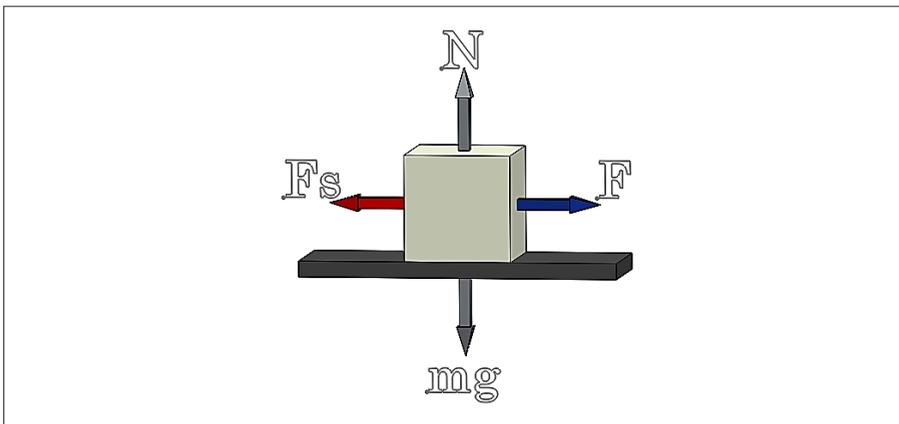


Figura 2. Fuerza de rozamiento estática  $F_s$  [15].



### 1.2.3.2. Fuerza de rozamiento cinemática

La Figura 3., muestra un bloque, el cual es arrastrado por una fuerza horizontal ( $F$ ). De igual forma, se visualizan en el bloque otras fuerzas como el peso ( $m.g$ ), la fuerza normal equivalente al peso y la fuerza de rozamiento al plano sobre el que se desliza. Si el bloque se desliza con rapidez constante, la fuerza aplicada será igual a la fuerza de fricción. Al duplicarse la masa del bloque, consecuentemente, se duplica la fuerza normal, la fuerza para jalar el bloque; y, finalmente, la fuerza cinética ( $F_k$ ). Por lo tanto, la fuerza de fricción cinética es proporcional a la fuerza normal ( $N$ ).

$$F_k = \mu_K \cdot N \quad (\text{Ec } 2)$$

Donde,

$F_k$  = Fuerza de Fricción Cinemática (N)

$\mu_K$  = Coeficiente de Fricción Dinámico

$N$  = Fuerza normal (N)

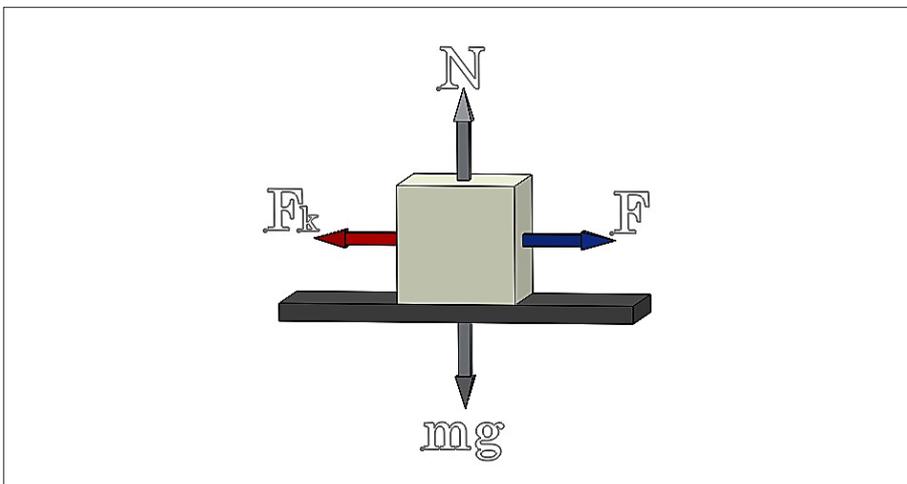


Figura 3. Fuerza de rozamiento cinética  $F_k$  [15].

### 1.2.3.3. Fuerzas de rozamiento en el disco

Para entender la física del proceso en el diagrama (Figura 4), se puede observar, que, coinciden las fuerzas que interactúan en el plano, ellas son: la fuerza normal y la fuerza de empuje resultante, que, al sumarse arrojan un mismo valor y este se aprecia en la igualdad  $N = Fr$ .

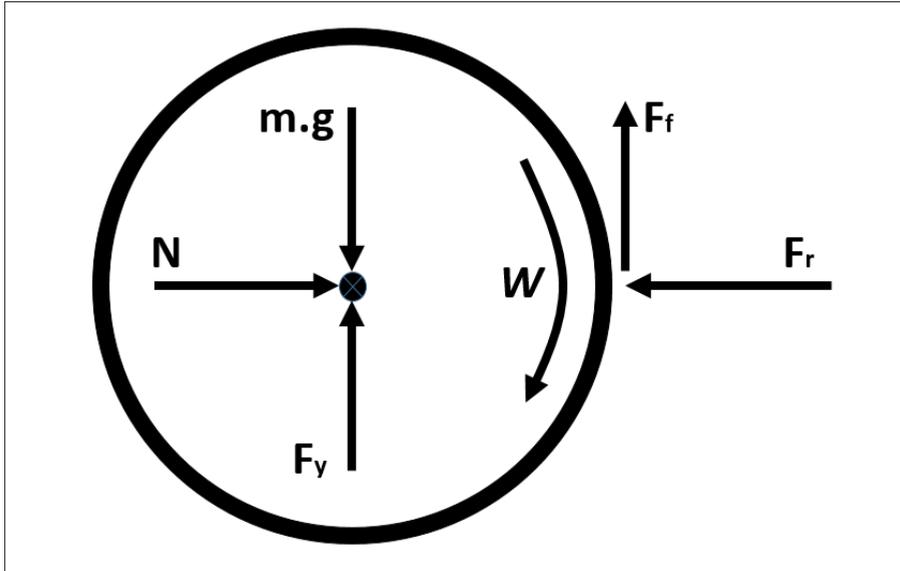


Figura 4. Diagrama de fuerzas resultantes en un disco.

Sumatoria de fuerzas en el eje x:

$$\sum F_x = 0$$

$$Fr - N = 0$$

$$N = Fr$$

La fuerza de rozamiento es tangencial al movimiento del disco, por lo tanto, se tiene:

$$P = T \cdot w$$

$$P = F \cdot r \cdot w \quad (\text{Ec 3})$$



dónde,  $P$  es la potencia,  $F$  es la fuerza,  $r$  es el radio del disco con mayor fuerza y  $w$  es la velocidad angular. Ahora bien, se conoce que la fricción estática es mayor que la fricción cinética porque la primera solo se aplica en el umbral del movimiento, debido a lo anterior se tiene que:

$$\mu_s > \mu_k$$

Si se asume que los coeficientes estáticos y cinéticos pertenecen al mismo conjunto de materiales sometidos a rozamiento, en este caso, la fuerza normal o fuerza resultante se reduce debido al coeficiente estático, este enfoque se expone a continuación por medio de la ecuación (4) cuando se reemplaza la fuerza máxima por la fuerza estática ( $F \cong f_s$ )

$$P = f_s * r * w$$

Y se procede a reemplazar  $f_s$  :

$$P = \mu_s * N * r * w$$

Se despeja la normal ( $N$ );

$$\downarrow N = \frac{P}{\mu_s * r * w} \quad (\text{Ec 4})$$

A diferencia de la ecuación que se presentó anteriormente, para el caso con el coeficiente cinético, la fuerza normal aumenta; entonces, del mismo modo, en la ecuación (4) se reemplaza la fuerza máxima por la fuerza cinética ( $F \cong f_k$ )

$$P = f_k * r * w$$

Y se procede a reemplazar  $f_k$  :

$$P = \mu_k * N * r * w$$

Se despeja la normal ( $N$ );

$$\uparrow N = \frac{P}{\mu_k * r * w} \quad (\text{Ec 5})$$

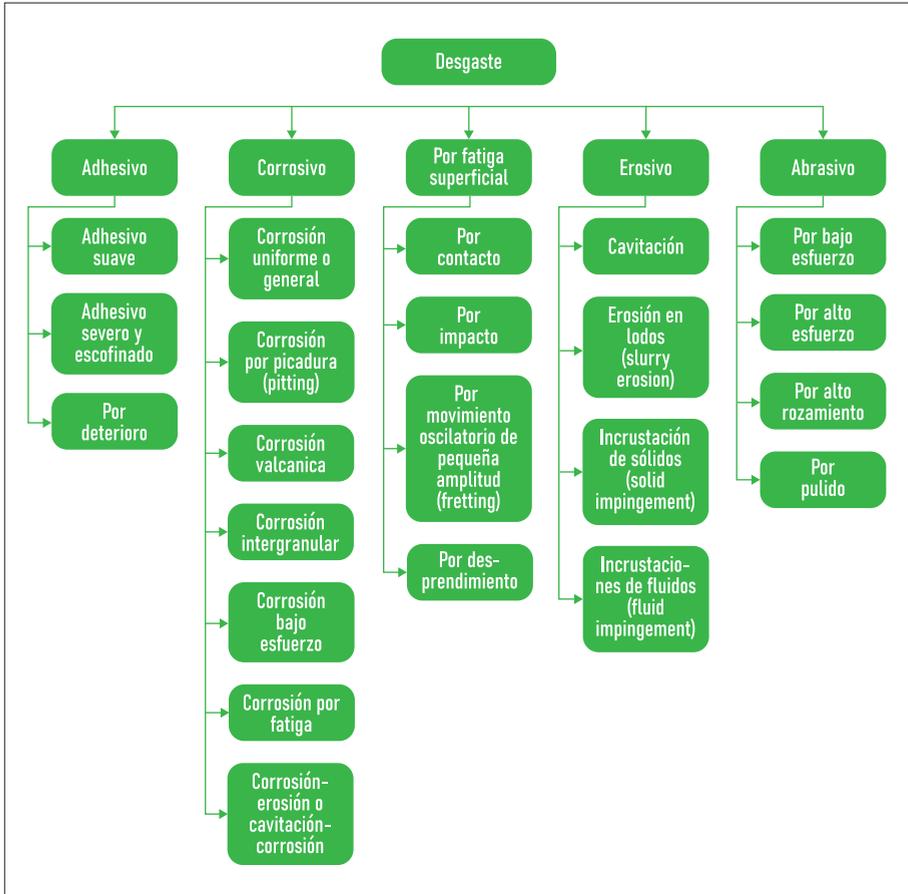
## **1.2.4. Desgaste**

Es el daño superficial que presenta un material en determinadas condiciones de funcionamiento, suele manifestarse en la superficie del material, afectando en ocasiones la subsuperficie [16]. En el ámbito industrial, el desgaste es un aspecto importante, porque puede tener consecuencias irreversibles para el material expuesto a este fenómeno; ya que, reduce de manera considerable la vida útil de los mecanismos o máquinas. Esto puede conducir a tener cambios prematuros en sus componentes o reemplazo de todo el mecanismo. La remoción de material en la superficie se puede presentar de tres formas: por fusión, por disolución química o por separación física de átomos de la superficie. Esto último, se puede lograr aplicando una fuerza que causa una alta deformación en el material [17].

Existen diferentes técnicas para disminuir el desgaste, las cuales pueden ser: Mejores prácticas de lubricación, mantenimiento regular a los componentes expuestos al desgaste, aplicación de recubrimientos e incluso, tratamientos térmicos a los materiales expuestos; pero, lo realmente importante antes de tener un gasto significativo en el momento de prevenir el desgaste, es conocer todas las variables que lo afectan, tratar de eliminarlas o reducir las, y cuando sea infructuosa esta actividad, se recomienda llevarlo al laboratorio para evaluar cuál puede ser la mejor solución.

### **1.2.4.1. Clasificación del desgaste**

En esta clasificación (Figura 5), se consideran dos aspectos principales: el primero se basa en el desgaste de la pieza o el conjunto de elementos; por ejemplo, picaduras, degradación, estrías, etc. El segundo aspecto, utiliza y considera principalmente la base del mecanismo o acción tribológica [11].

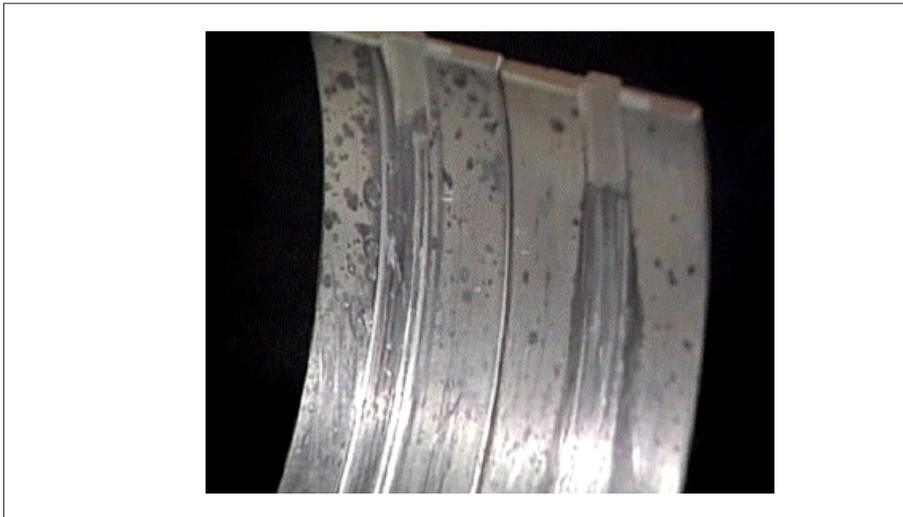


**Figura 5.** Clasificación del desgaste [7].

#### 1.2.4.1.1. Desgaste abrasivo

Es el producto de la remoción de material de una superficie que está en contacto con partículas sólidas coincidentes entre superficies, o con superficies duras que presentan fricción; este proceso se presenta en caso de corte, rayado, astillado o agrietamiento por fatiga; las tasas de desgaste pueden verse afectadas abruptamente por la presencia de partículas abrasivas entre las superficies, la velocidad de contacto en movimiento relativo y las condiciones ambientales [17, 18]. Este desgaste se produce en presencia de lubricación, ya que su contaminación puede provocarlo.

Cuando dos superficies están en contacto, ambas están sujetas a desgaste, una de ellas produce mayor daño y la que tiene menos daño, se denomina superficie abrasiva. La cantidad de daño producido, depende del tamaño de la arena o de las partículas residuales del maquinado que crean rayones y rayones profundos (Figura 6).



**Figura 6.** Ejemplo del desgaste abrasivo [28].

La forma más fácil de detectar el desgaste abrasivo es mediante sus consecuencias, las cuales son [2]:

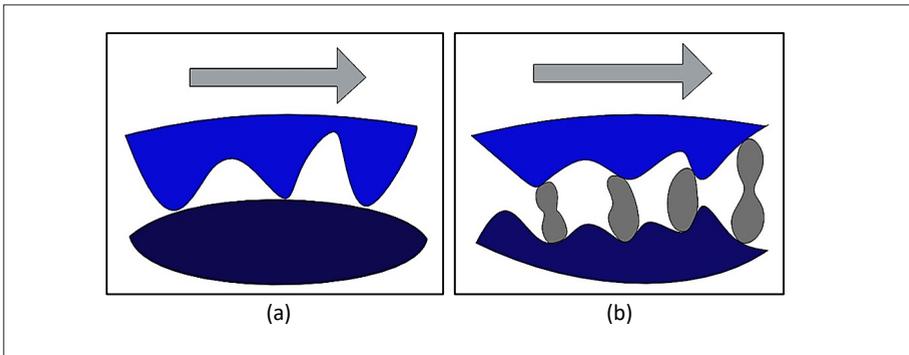
- Penetración de partículas con alta dureza de una superficie en la otra.
- Remoción de partículas superficiales.
- Fractura de los materiales afectados.
- Disminución de tamaño de los materiales afectados.
- Remoción de recubrimientos protectores.

El desgaste por abrasión, se divide en dos categorías: según el tipo de contacto y al nivel de daño generado.

- Abrasión por tipo de contacto. Puede manifestarse como desgaste entre dos o tres objetos, como se muestra a continuación:
- Abrasión de dos cuerpos: Se produce cuando la superficie irregular de un material se presiona contra otro material de menor dureza (Figura 7(a)).



- Abrasión de tres cuerpos: Esto sucede cuando hay partículas más duras intercaladas entre dos superficies. La fuerza aplicada se transmite a través de los granos abrasivos (Figura 7(b)).

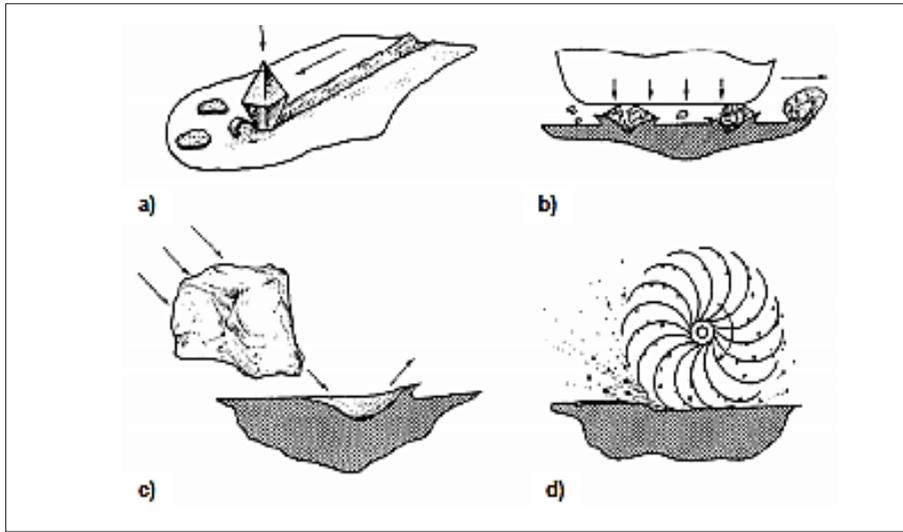


**Figura 7.** (a) Representación de abrasión en dos cuerpos [14]; (b) Representación de abrasión en tres cuerpos [15].

El desgaste abrasivo de tres cuerpos es de 2 a 10 veces menos intenso que el desgaste de dos cuerpos, ya que solo una pequeña cantidad de abrasivo es la fuente del desgaste [15].

- Abrasión por nivel de daño generado
- Abrasión de bajo esfuerzo o rayado: Ocurre debido a la fricción relativamente ligera de partículas abrasivas contra una superficie o elemento metálico. La carga es lo suficientemente baja, como para que las partículas no se desintegren ni se dividan. Por lo general, el daño se presenta en forma de rasguños con poca deformación superficial (Figura 8(a)).
- Abrasión de alto esfuerzo o desbaste: Es una situación en la que la fuerza aplicada entre las dos superficies es lo suficientemente alta como para aplastar las partículas, se produce una deformación plástica en este desgaste y el material se raya y astilla debido a la presión de las partículas contra el cuerpo (Figura 8(b)).
- Abrasión por surcos o ranuración (Gouging): Se refiere a la remoción de material debido a la acción repetida de altas cargas de compresión creadas por partículas grandes como la roca, dejando grandes surcos en la superficie de desgaste (Figura 8(c)).

- Abrasión por pulido: Este es un desgaste muy suave y fino, el material se elimina frotando contra otras superficies, los rayones no se notan mucho, no hay fractura ni deformación plástica (Figura 8(d)).



**Figura 8.** (a) Esquema de desgaste de bajo esfuerzo; (b) Esquema de abrasión de alto esfuerzo; (c) Esquema del desgaste por surcos; (d) Esquema de un pulido de un metal con una rueda de pulido [7].

#### 1.2.4.1.2. Desgaste corrosivo

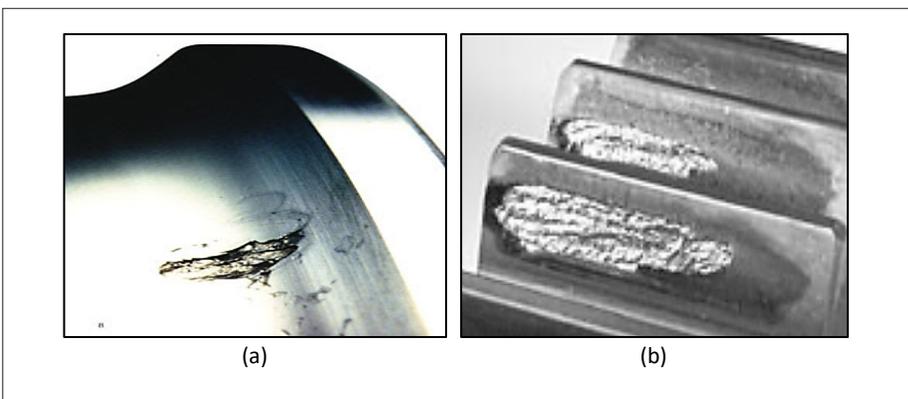
Se desgasta debido a las influencias ambientales, generalmente, por la humedad o la incompatibilidad química (Figura 9). Se puede decir, que, es la primera etapa que de manera común, resulta del desgaste, fatiga o erosión de la capa de corrosión. Este grupo también incluye el desgaste oxidativo, como efecto de la acción del oxígeno atmosférico disuelto en el lubricante, creando daños en la superficie [15].



**Figura 9.** Ejemplo de desgaste corrosivo [17].

#### 1.2.4.1.3. Desgaste por fatiga superficial

Resultado de la tensión cíclica entre las asperezas de las dos superficies de contacto (Figura 10). El coeficiente de fricción es el factor decisivo porque cuando la superficie está lubricada, el desgaste por adherencia es mínimo; sin embargo, en sistemas con coeficientes de fricción muy altos, pueden ocurrir áreas de deformación severa muy cerca de la superficie, creando grietas ligeras [15].



**Figura 10.** (a) Desgaste por fatiga superficial en rodamiento; (b) Ejemplo de desgaste por fatiga en engranaje [28].

#### 1.2.4.1.4. Desgaste por erosión

Esto ocurre cuando los impactos repetidos de partículas sólidas o líquidas (o ambas), ejercidas sobre una superficie, provocan la separación del material (Figura 11). El desgaste por erosión, comúnmente prospera en elementos expuestos a flujos de alta velocidad, como turbinas o escapes de motores. Puede explicarse como un efecto de choque, ya que, las partículas son arrastradas por el fluido y son más pesadas que el fluido. Cuando cambia la dirección en la que se mueve el fluido, el impulso empuja las partículas más pesadas hacia adelante y golpea las esquinas y las restricciones, causando daños a la superficie. Se caracterizan por abolladuras y pequeñas marcas en la superficie [15].

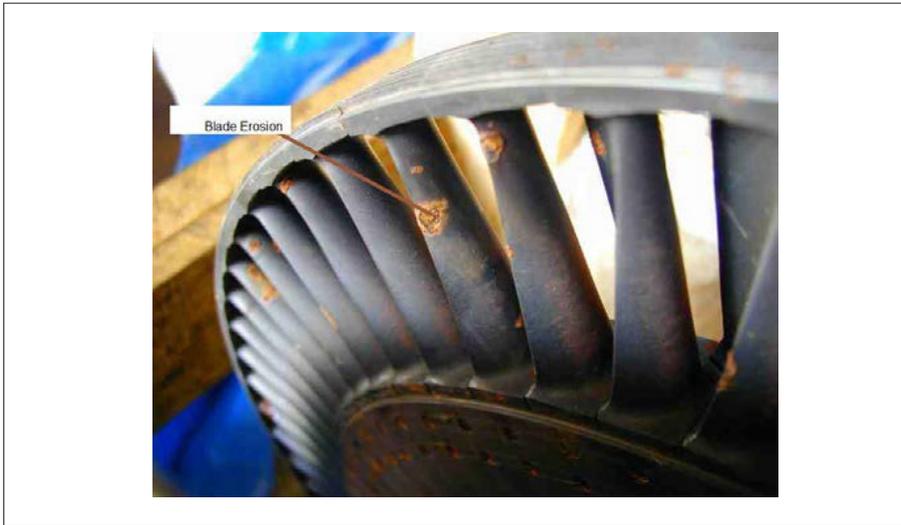
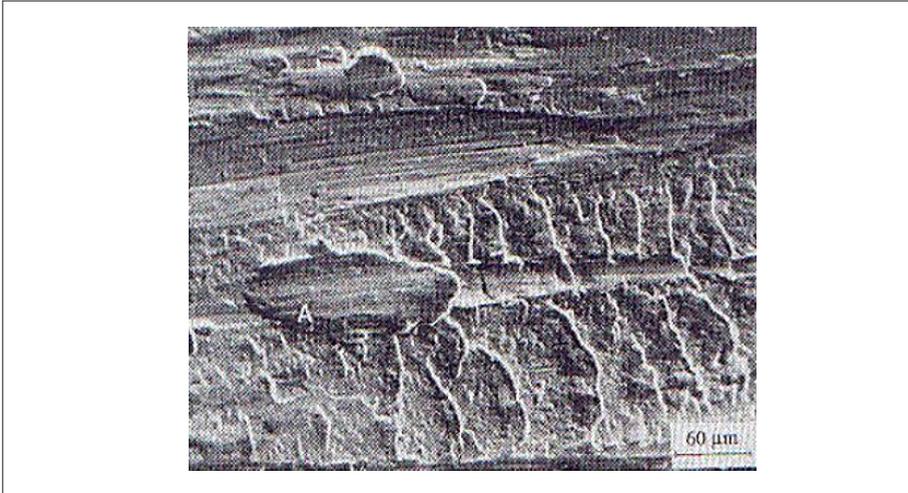


Figura 11. Ejemplo de desgaste por erosión [20].

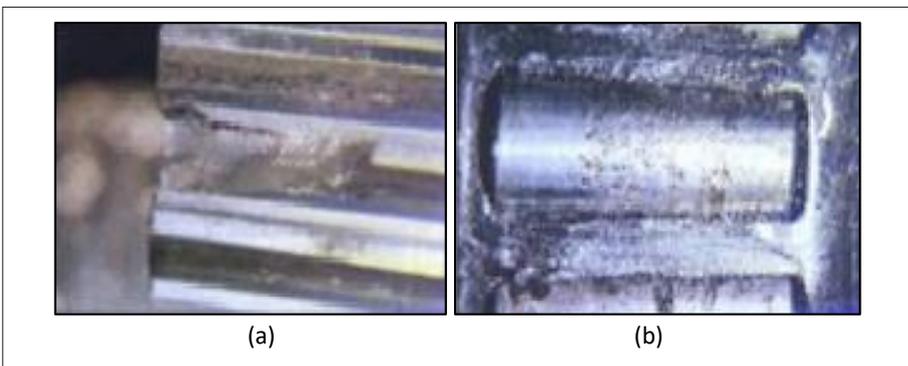
#### 1.2.4.1.5. Desgaste adhesivo

Ocurre cuando dos superficies de contacto se deslizan una contra la otra bajo presión. Si se observa a nivel microscópico, la rugosidad que existe entre los elementos de contacto que se deslizan debido a la alta tensión en la parte superior, hace que la fuerza de deslizamiento rompa la junta, arrancando el material de una superficie y transfiriéndolo a la otra. Se causará daño más adelante [15]. La Figura 12., muestra una micrografía de los daños causados por el desgaste adhesivo sobre el acero AISI D1.



**Figura 12.** Daño causado por desgaste adhesivo al Acero AISI D1 [19].

Como se muestra en la Figura 13., el desgaste adhesivo se presenta como resultado de la adhesión entre puntos de contacto desiguales presentes en la interfaz [24].



**Figura 13.** (a) Ejemplo de desgaste por adhesión en engranaje; (b) Ejemplo de desgaste por adhesión en rodamiento de rodillo cónico [19].

#### 1.2.4.2. Variables que afectan el proceso de desgaste

El estudio del desgaste se enriquece considerando la cantidad de factores necesarios para describirlo. Los principales factores que interfieren con el desgaste pueden ser los siguientes:

- Variables relacionadas con las propiedades de los materiales en contacto. Estructura, tenacidad dureza y composición química.
- Variables relacionadas con el servicio. Acabado de la superficie, temperatura, materiales en contacto, presión, velocidad, lubricación y corrosión. El desgaste que realmente ocurre es en la mayoría de los casos, una combinación de diferentes tipos de desgaste. Las partículas pequeñas entre dos superficies de contacto o los productos del proceso de corrosión pueden causar desgaste y daños posteriores.

#### **1.2.4.2.1. Efecto de la temperatura y la velocidad sobre el desgaste**

Con el tiempo, ha quedado demostrado, que, el desgaste en metales, depende principalmente de la interacción de la rugosidad entre dos superficies deslizantes. La energía disipada por el trabajo mecánico, conduce inevitablemente a un aumento de la temperatura, aunque esto sucede de manera intermitente, en lo que se refiere a los puntos de contacto real por la adherencia y posterior deslizamiento de las uniones. Estos incrementos momentáneos de temperatura, tienen una duración del orden de  $10^{-4}$  segundos [11]. El calor de la fricción se disipa hacia el área circundante, lo que hace que la punta áspera alcance altas temperaturas, aunque el cuerpo de la pieza permanezca relativamente frío. Un aumento de la carga o de la velocidad de deslizamiento acrecienta la temperatura articular y, en casos extremos, puede conducir a una fusión incipiente [8]. No existe una manera fácil de medir la temperatura del área de contacto real, pero, se puede obtener la temperatura general de un par de metales que interactúan. Dado que, tanto el desgaste adhesivo como el desgaste abrasivo consideran las propiedades mecánicas, como el límite elástico y la dureza del metal, se ven afectadas por el entorno térmico, se pueden realizar fácilmente estudios tribológicos y de desgaste a altas temperaturas, condición importante, porque las piezas giratorias deben funcionar a estas temperaturas [11].

#### **1.2.4.2.2. Solubilidad**

La influencia del desgaste sobre el crecimiento de las uniones a nivel atómico del material afectado, se puede correlacionar de forma cualitativa con parámetros como la solubilidad sólida de las combinaciones metálicas. La magnitud del desgaste aumenta a medida que el material se desliza



en el vacío por la soldadura de asperezas sólidas que forman uniones fuertes que crecen y se unen. Dada la naturaleza efímera de la vida útil de los enlaces químicos, es difícil imaginar cómo se forman y desarrollan nuevos enlaces, ya que el crecimiento debe ocurrir a través de la difusión a escala atómica y el proceso depende del tiempo. El aumento brusco y transitorio de la temperatura, puede contribuir al desarrollo de la unión porque la velocidad de difusión aumenta con el incremento de la temperatura [11].

#### **1.2.4.2.3. Estructura cristalina**

La interacción plástica de las partículas superficiales de los metales al contacto con otro material genera desgaste, al presentarse deformación plástica en los metales, ocurre un deslizamiento, lo que produce un corte de los planos de los átomos y genera una falla por apilamiento, lo que conlleva a que se produzca un deslizamiento anisotrópico, y la dirección es casi siempre, en la que los átomos están más juntos. El plano de deslizamiento es también, el plano que tiene mayor número de átomos; por lo tanto, para metales cúbicos con caras centradas, la dirección de deslizamiento varía según la estructura cristalina.

#### **1.2.5. Métodos para realizar ensayos de desgaste**

Un análisis de desgaste es importante porque junto con la fatiga y la corrosión, es la causa más común de falla de las máquinas. De los tres fenómenos, el desgaste es el menos estudiado porque su predicción es difícil, ya que no es una propiedad inherente del material, sino que depende de todo el sistema, que interactúa con el cuerpo desgastado [30]. Existen diferentes asociaciones, organizaciones, grupos de investigación, universidades, entre otros, que están muy interesados en caracterizar el fenómeno del desgaste y todas las variables inherentes a este, una de dichas organizaciones es la “ASTM”, la cual busca mediante normas, brindar parámetros para la construcción de equipos y medir el desgaste en condiciones puntuales; de allí, nace la guía estándar para la elaboración y selección de ensayos de desgaste abrasivo, bajo el nombre ASTM G190; incluye información general para el desarrollo y la selección de un ensayo de desgaste para una aplicación deseada [19] (Tabla 1).

### 1.2.5.1. NORMA ASTM G65

Es un método estándar para medir la abrasión en la interfaz arena seca/rueda de caucho, aplicada sobre la probeta. Esta norma define las operaciones estandarizados para la determinación de la resistencia al desgaste de los materiales, su clasificación viene explícita básicamente por un procedimiento para la determinación de la resistencia al desgaste que puede tener un material. El ensayo se lleva a cabo con arena estándar y un tamaño de partícula específico.

**Tabla 1.** Lista de pruebas para el estudio del desgaste [19].

NORMA	DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO
ASTM B-611	Método de prueba estándar para determinar la carga, alta resistencia a la abrasión de materiales duros
ASTM G-56	Método de prueba estándar para abrasión de cintas de tela impregnada de tinta de la impresora y otros materiales de la Web
ASTM G-75	Método de prueba estándar para la determinación de la abrasividad de la lechada (número de Miller), y la respuesta a la abrasión de los materiales de la lechada (número de SAR)
ASTM G-77	Método de prueba estándar para clasificar la resistencia de los materiales al deslizamiento usando una prueba de desgaste de bloque sobre anillo
ASTM G-81	Método de prueba estándar para el ensayo a la abrasión por pulido de las trituradoras de mandíbula
ASTM G-98	Método de prueba estándar para la resistencia al desgaste cuando se presenta muy alta fricción de los materiales
ASTM G-99	Método de prueba estándar para pruebas de desgaste con un aparato Pin-On-Disk
ASTM G-119	Guía estándar para determinar la sinergia entre el desgaste y la corrosión
ASTM G-132	Método de prueba estándar para el ensayo de abrasión tipo Pin
ASTM G-137	Método de prueba estándar para clasificar la resistencia de los materiales plásticos al deslizamiento usando una configuración de bloqueo en anillo
ASTM G-171	Método de prueba estándar para dureza al rayado de los materiales usando una aguja de diamante
ASTM G-174	Método de prueba estándar para medir la resistencia a la abrasión de los materiales mediante contacto con lazos abrasivos
ASTM G-176	Método de prueba estándar para clasificar la resistencia al deslizamiento de los plásticos usando una prueba de desgaste de bloque sobre anillo: método de desgaste acumulado



ASTM G-195	Método de prueba estándar, hace pruebas de desgaste utilizando una máquina de plataforma rotativa para medir la resistencia a la abrasión
ASTM G-204	Método de prueba estándar para el daño de superficies sólidas que se encuentran en contacto bajo condiciones de fricción
ASTM G-206	Guía estándar para medir los volúmenes de desgaste de los segmentos de anillos de pistón, utilizado contra caras planas en pruebas de desgaste recíproco o de vaivén

De acuerdo con el procedimiento utilizado en el ensayo, se debe aplicar una carga específica a la pieza, para que la muestra entre en contacto con la rueda de goma.

La Tabla 2., enumera los cinco procedimientos estandarizados utilizados en la norma ASTM G-65 para pruebas de desgaste abrasivo, clasificados según el grado de resistencia al desgaste del material o el espesor del recubrimiento sobre el material [1]. Además, se enumeran los parámetros básicos necesarios para realizar el ensayo, a saber: fuerza aplicada a la muestra, número de revoluciones de la rueda y desgaste lineal (distancia de desgaste).

**Tabla 2.** Lista de procedimiento de la norma ASTM G65 [21].

PROCEDIMIENTO ASTM	FUERZA EJERCIDA / PROBETA		REVOLUCIONES DE LA RUEDAS	DISTANCIA DE DESGASTE	USO
	N	lb		m	
A	130	30	6000	4309	Materiales con media a extrema resistencia a la abrasión.
B	130	30	2000	1436	Materiales con alta resistencia a la abrasión, pero es usado en materiales de media a baja resistencia a la abrasión. Se aplica cuando la pérdida de volumen desarrollado por el procedimiento A excede los 100 mm <sup>3</sup> .
C	130	30	100	71.8	Para uso en capas delgadas.
D	45	10.1	6000	4309	Se utiliza en materiales con baja resistencia a la abrasión.
E	130	30	1000	718	Materiales con media a baja resistencia a la abrasión.

### 1.2.5.2 NORMA ASTM G105

En este método, el abrasivo se introduce entre la muestra de prueba y la rueda giratoria recubierta con neopreno de una dureza determinada. La muestra de prueba, se presiona contra la rotación de la rueda con una fuerza específica mediante un brazo de palanca mientras se raspa la superficie de prueba. Las marcas de desgaste que producen las probetas son provocadas por la abrasión de la arena disuelta en agua [22]. Las indicaciones que estipula la norma son las siguientes:

- Motor de 0,75 KW o 1 HP.
- Para la prueba se requieren tres discos, cada uno con durezas nominales diferentes, estos valores son de 50, 60 y 70 Shore A con una tolerancia de +/- (2); cada disco debe tener un diámetro de 7 pulgadas (177,8mm) con un espesor de 0.5 pulgadas (12,7mm) con un cuerpo macizo en acero 1020 de diámetro 6 pulgadas (152,4mm), y una vulcanización en el extremo con neopreno que debe alcanzar tres valores de dureza.
- El peso por colocar en el extremo del brazo debe ser de 222,4 +/- 3,6 (N), este peso es el que hace que la probeta se ubique sobre la superficie de contacto con el neopreno y así obtener al rotar el disco el desgaste.
- Uno de los factores más importantes a los que se debe prestar atención para la realización de la prueba, es la mezcla de agua con la arena, para obtener la mezcla, se toman los siguientes componentes: 0,940 kg de agua y 1,500 kg de arena de sílice, esta mezcla se puede utilizar tan solo en el transcurso del ensayo, después de ese tiempo, la mezcla perderá su mayor potencial abrasivo, por lo cual, se debe desechar posterior a la prueba [22].