Desgaste

Índice

Conceptos previos 1
Tribología 1
Fricción 1
Rugosidad 2
Parámetros de Caracterización de la Rugosidad: 2
1. Parámetros de Amplitud (Valles y Crestas) 2
2. Parámetros de Amplitud Promedio 5
3. Parámetros de Espaciamiento 6
4. Curvas de relación de material y parámetros relacionados: 7
5. Parámetro de Motivo (*Motif Parameters*) 9
Lubricantes 10
Desgaste 11
Desgaste leve y severo 11
Parámetros de Desgaste: 13
Mecanismos de desgaste 16
Desgaste adhesivo 16
Área real y aparente de contacto 16
Adhesión 17
Desgaste abrasivo 20
Otros mecanismos de desgaste 22
Desgaste por corrosión 22
Desgaste por erosión 23
Tasas de desgaste 25
Ecuación de Archard 25
Metodologías para la evaluación del desgaste. 26
Métodos de evaluación de desgaste estandarizados 26
Técnicas de prevención, medición y protección contra el desgaste. 35
Procesos de endurecimiento por deformación plástica 35
Procesos de recubrimiento 36
Procesos de proyección térmica 38
Tendencias futuras en recubrimientos para la resistencia al desgaste 39
Recubrimientos de nanocompuestos. 40
Referencias 41

Conceptos previos

Tribología

Es la ciencia que estudia la interacción entre superficies que se encuentran en movimiento relativo entre estas, incluyendo, pero no limitándose, a la fricción, desgaste y lubricación, por lo que tiene campos de estudio en cualquier pieza o ensamble en el cual se tenga dicho movimiento relativo, como la línea de contacto entre engranes, o el punto de contacto entre una esfera y el "carril" externo de un rodamiento de bolas. Como instrumento de medición para dicha resistencia al desgaste entre superficies en contacto se encuentra el tribómetro, el cual mide qué tanto resbala un material sobre otro (determina un coeficiente de fricción). [1][2]

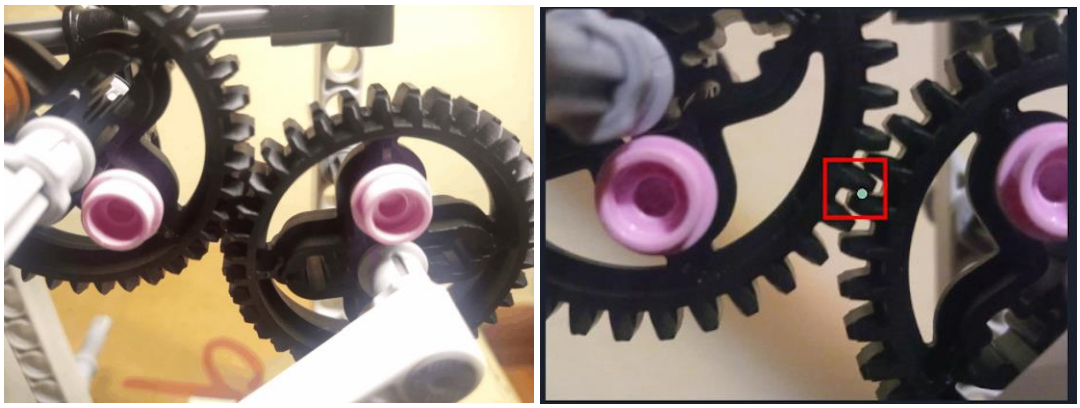

Figura 1 La figura de la izquierda muestra engranes en funcionamiento. Nótese que hay un movimiento relativo entre los engranes, por lo que son parte del estudio de la Tribología. Dicho punto de interés es, de hecho, una línea, la cual está encerrada en un rectángulo rojo en la figura de la derecha para un instante determinado.

Para dichos tribómetros, se hace uso de la norma F2508, la cual indica la "Práctica estándar para la validación, calibración y certificación de tribómetros de pasarela que utilizan superficies de referencia".[3, 4]

Fricción

La fricción es una Fuerza que surge como oposición al movimiento entre dos superficies en contacto. Se clasifica en Fricción Estática y Dinámica, siendo la diferencia, que en la Fricción Estática se le aplica una Fuerza a un objeto intentando moverlo, pero sin conseguirlo, mientras que la Fricción Dinámica "aparece" en el instante en el objeto se empieza a mover, buscando reducir la velocidad de las superficies en contacto. La Fricción Dinámica es menor a la Estática, razón por la cual empujar un objeto cuando está en movimiento es más fácil (requiere aplicar menos Fuerza) que empujar el mismo objeto cuando está estático. [5]

Figura 2 Fricción Estática y Dinámica. Nótese que, en un inicio, la Fuerza para empujar el camión debe superar el Coeficiente de Fricción para que empiece a moverse. Una vez que se empieza a mover, sigue habiendo fricción entre llantas y suelo, la cual busca reducir la velocidad a la que se está moviendo el camión.

Si bien la fricción puede considerarse "negativa" en diversas situaciones debido a que se opone a la Fuerza que aplicamos, también es necesaria para poder caminar y poder frenar un vehículo de manera segura (sin que este derrape).

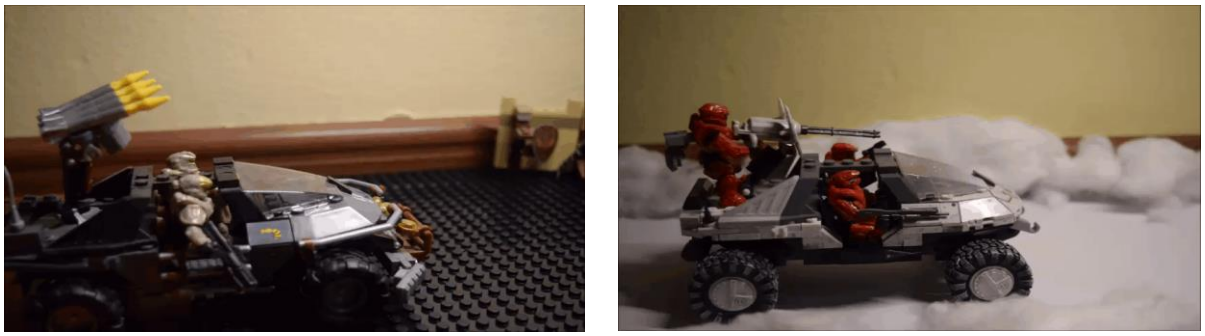

Figura 3 . (a la izquierda) Coche frenando sobre "pavimento". (a la derecha) Coche frenando sobre hielo. Nótese que, a la hora de frenar sobre pavimento, el agarre entre Neumático y piso es suficientemente alto para que el vehículo se detenga sin derrapar, mientras que el agarre entre Neumático y hielo no es suficiente. Esto es debido a los coeficientes de fricción en cada caso: (aproximadamente) 0.8 para Asfalto y 0.1 para hielo.

Rugosidad

La rugosidad se puede definir como qué tan irregular es la superficie, de tal manera que, entre más irregulares sean dos superficies, más se oponen al movimiento al estar en contacto, generando, por lo tanto, una mayor fricción entre dichas superficies. Para poder definir de manera correcta la Rugosidad de una superficie en particular, se deben conocer ciertos parámetros en específico como:

Parámetros de Caracterización de la Rugosidad:

Todos estos parámetros, se pueden encontrar en las Normas ISO 4287:1997 e ISO 12085:1996. [6]

1. Parámetros de Amplitud (Valles y Crestas)

   - **Altura máxima (*Maximum Height* Rz)**

Consiste en la distancia vertical entre el punto más bajo de los valles, y el punto más alto de las crestas en la Longitud de Muestreo (*Sampling Length*). Se calcula como.

$$Rz = Rp + Rv$$

- **Altura máxima del pico del perfil (*Maximum Profile Peak Height* Rp)**

Consiste en la distancia vertical entre la línea de Referencia y el punto más alto de las crestas.

- **Profundidad máxima del valle del perfil (*Maximum Profile Valley Depth* Rv)**

Consiste en la distancia vertical entre el punto más bajo de los valles y la línea de Referencia.

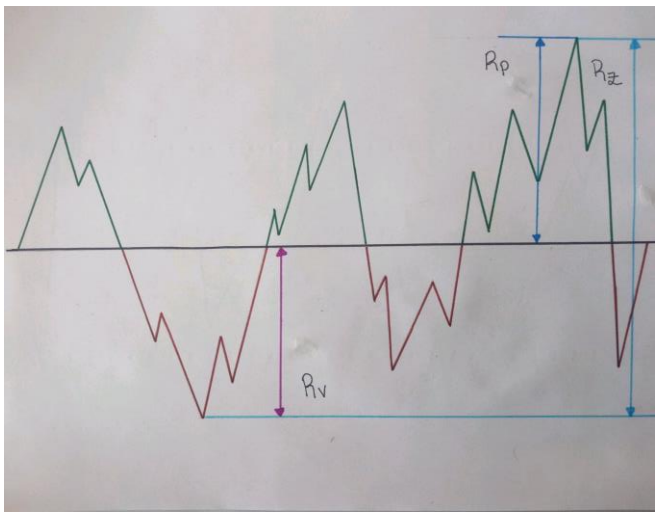

Figura 4 Rz, Rp y Rv

- **Altura Promedio (*Mean Height* Rc)**

Consiste en sacar el promedio de un ciclo (valle y cresta) dentro de la Longitud de Muestreo. Esta se calcula como:

$$Rc = \Sigma_{i=1}^{m} Zti$$

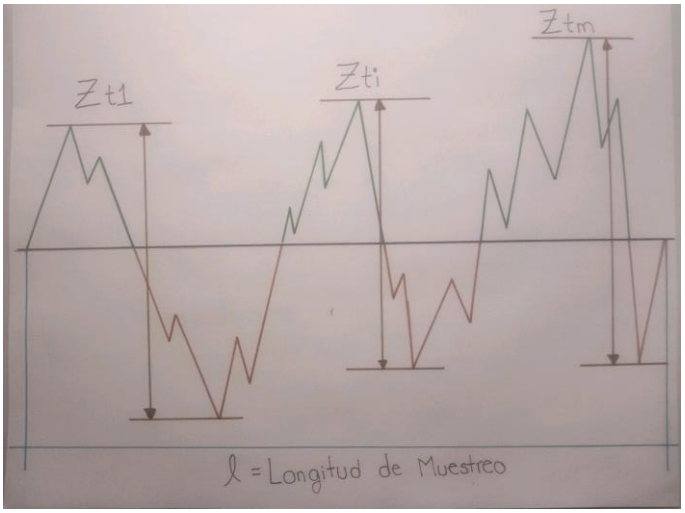

Figura 5 Altura Promedio Rc

- **Altura Total (*Total Height* Rt)**

Consiste en la distancia vertical entre el punto más bajo de los valles, y el punto más alto de las crestas en la Longitud de Evaluación (*Evaluation Length*). Se calcula como:

$$Rt = max(Zpi) + max(Zvi)$$

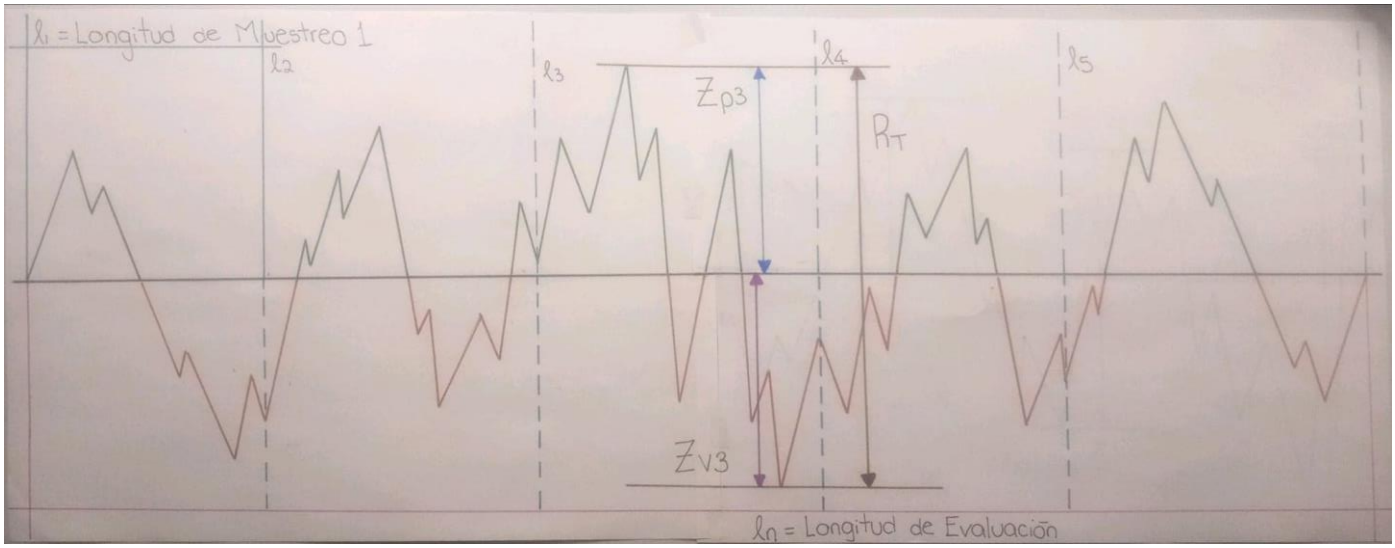

Figura 6 Se observa un Rt con Zp3 y Zv3. Nótese que el 3 representa que ambos picos se encuentran en la Longitud de Muestreo 3, sin embargo, no necesariamente deben estar ambos en la misma Longitud de Muestreo, pueden ser de diferentes.

Es importante recalcar que, la Longitud de Muestreo es una sección pequeña estudiada con sus propios valores de **Altura Promedio** y **Altura Máxima**, y la Longitud de Evaluación es el conjunto de Longitudes de Muestreo, por lo que debe contener por lo menos una Longitud de Muestreo.

- **Rugosidad Promedio de Diez Puntos (*Ten-Point Mean Roughness* Rzjis)**

Consiste en sumar el promedio de las 5 crestas más altas con los 5 valles más bajos en la Longitud de Muestreo. Se calcula como:

$$Rzijs = \frac{1}{5}\Sigma_{j=1}^{5}(Zpj + Zvj)$$

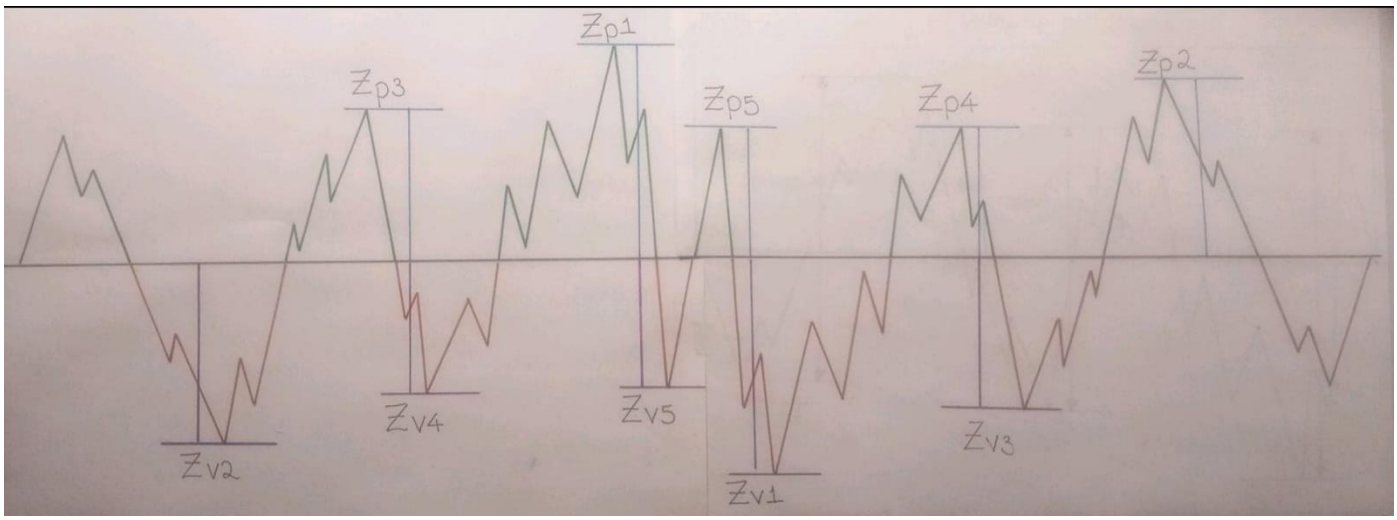

Figura 7 Ejemplo donde se remarcan las 5 crestas más altas y los 5 valles más bajos. Nótese que la cresta más alta tiene el número 1, al igual que el valle más bajo, a pesar de que no son continuos. Esta es la forma visual de la ecuación antes mencionada.

2. Parámetros de Amplitud Promedio

- **Desviación Aritmética Promedio (*Arithmetic Mean Deviation* Ra)**

Consiste en sacar un promedio del valor absoluto de los valles y crestas. Esto se calcula como:

$$Ra = \frac{1}{l}\int_0^l |Z(x)|dx$$

Donde:

$$l = Longitud\ de\ Muestreo$$

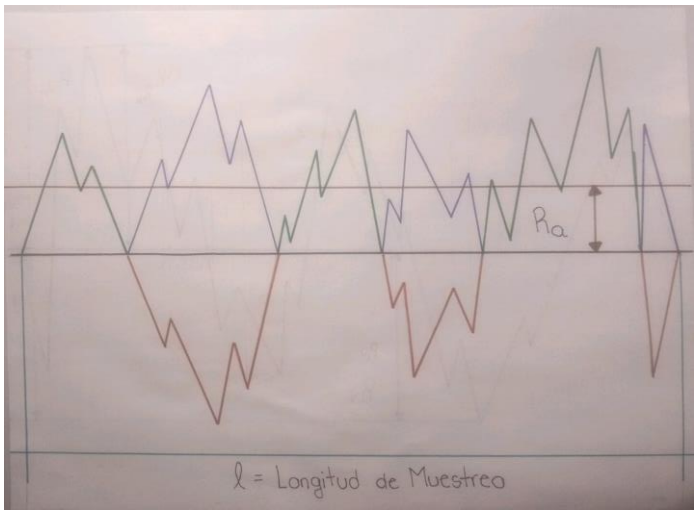

Figura 8 Desviación Aritmética Promedio Ra. Nótese que el valor absoluto de la ecuación antes mencionada, se representa de manera visual realizando "espejos" de los valles para que se vuelvan crestas.

- **Raíz Cuadrada de la Desviación Promedio (*Mean Deviation Square Root* Rq)**

Consiste en la raíz cuadrada de los valles y crestas a lo largo de la Longitud de Muestreo. Este valor es altamente usado, no sólo para determinar la Curtosis y la Oblicuidad de la superficie analizada, sino, además, porque no es afectada por los ruidos graficados. Se calcula como: [2]

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l}\int_0^l Z^2(x)dx}$$

- **Oblicuidad (*Skewness* Rsk)**

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3}\left[\frac{1}{l}\int_0^l Z^3(x)dx\right]$$

De tal modo que:

$$Rsk = 0 \Rightarrow Distribución\ Normal/Centrado\ con\ la\ línea\ promedio$$
$$Rsk > 0 \Rightarrow Desviación\ hacia\ abajo\ de\ la\ línea\ promedio$$
$$Rsk < 0 \Rightarrow Desviación\ hacia\ arriba\ de\ la\ línea\ promedio$$

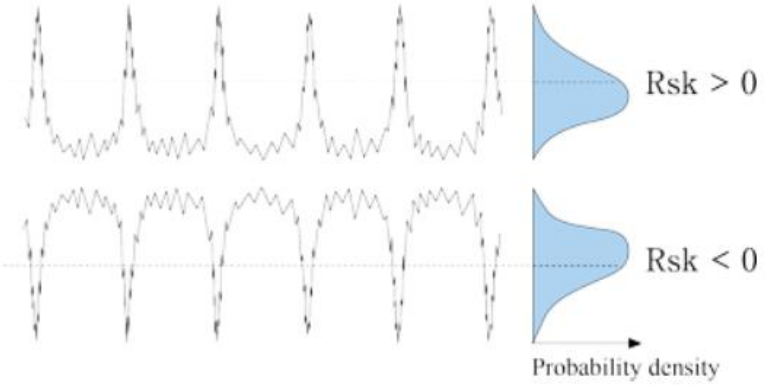

Figura 9 Oblicuidad Rsk. Nótese que al ser un valor mayor a 0, la cúspide de la gráfica se encuentra debajo de la línea central, mientras que, si es menor a 0, la cúspide se encuentra arriba de la línea central. Imagen extraída de [6]

Es importante recordar que en Estadística, la Densidad de Probabilidad se refiere a la probabilidad de que una variable pertenezca a una región específica de la gráfica (un valor aleatorio es más probable que sea parte de la sección intermedia donde se encuentra la cúspide debido a que esa parte de la gráfica tiene mayor área).

- **Curtosis (*Kurtosis* Rku)**

La Curtosis representa qué tan aplastada o alargada es una curva según un valor de referencia (en este caso es de 3), de tal modo que este valor se calcula como: [2][17]

$$Rku = \frac{1}{Rq^4}\left[\frac{1}{l}\int_0^l Z^4(x)dx\right]$$

De tal modo que:

$$Rku = 3 \Rightarrow Distribución\ Normal$$
$$Rku > 3 \Rightarrow Geometría\ "Aplastada"$$
$$Rku < 3 \Rightarrow Geometría\ "Alargada"$$

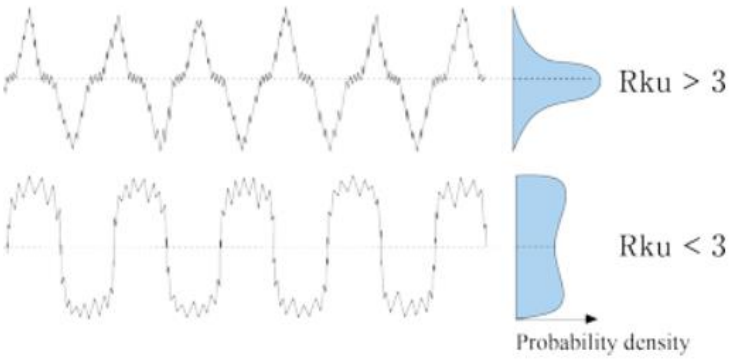

Figura 10 Curtosis Rku. Nótese que, al ser mayor a 3, la geometría es más alargada o puntiaguda, mientras que al ser menor a 3, la geometría es más aplastada o achatada. Imagen extraída de [6]

3. Parámetros de Espaciamiento

- **Ancho Promedio (*Mean Width* RSm)**

Consiste en el promedio de ancho de todos los ciclos (un valle y una cresta) que se encuentran dentro de la Longitud de Muestreo. Se calcula como: [2]

$$RSm = \frac{1}{m} \Sigma_{i=1}^{m} Xsi$$

- **Raíz Cuadrada de la Pendiente Media (*Mean Slope Square Root* Rdq*)***

Consiste en calcular la Raíz Cuadrada de la pendiente promedio para una zona determinada dentro de la Longitud de Muestreo. Se calcula como: [2]

$$Rdq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \left[\frac{d}{dx} Z(x)\right]^2 dx}$$

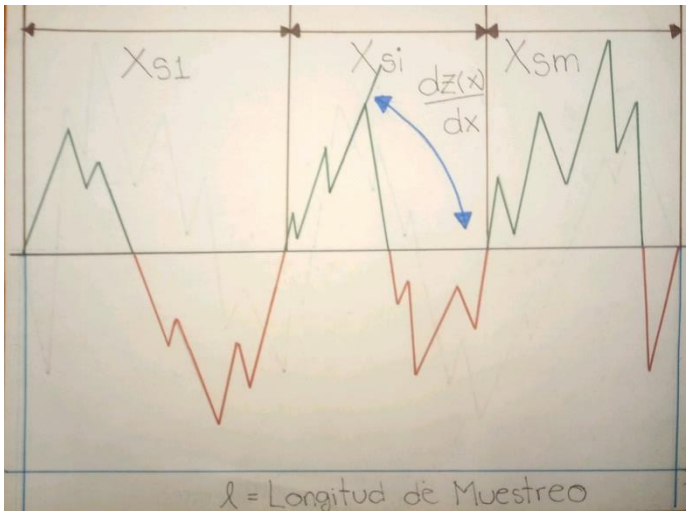

Figura 11 Raíz Cuadrada de la Pendiente Media Rdq. Nótese que se extiende la línea de la cresta Xsi como referencia de que hay una pendiente en esa cresta, la cual tiene un ángulo con respecto a la línea central.

4. Curvas de relación de material y parámetros relacionados:

- **Curva de Relación de Material y Curvas de Densidad de Probabilidad (*Material Ratio Curve and Probability Density Curves*)**

También conocida como Curva de Abbott, la cual describe la textura superficial de la pieza analizada:

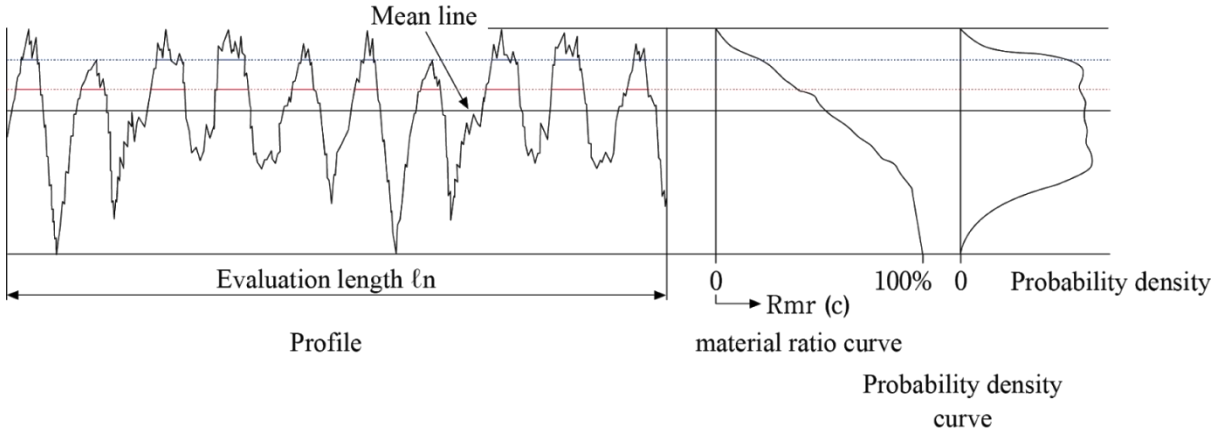

Figura 12 La Curva de Abbott se encuentra a la derecha del perfil de la superficie analizada. Figura obtenida de [6, 7]

- **Relación del Material (*Material Ratio* Rmr(c))**

  Consiste en determinar la longitud del material que se encuentra en la altura c. Se calcula como:

$$Rmr(c) = \frac{1}{ln} \Sigma_{i=1}^{m} Ml(c)i$$

  Donde:
  ln=Longitud de Evaluación
  Ml(c)=Longitud del Material (Material Length por sus siglas en inglés)

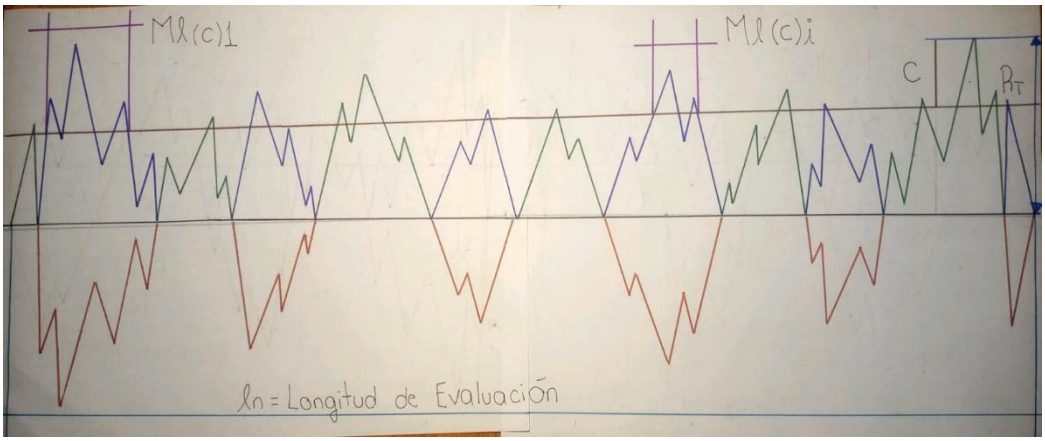

Figura 13 Relación del Material Rmr(c).

- **Diferencia de Altura de la Sección del Perfil (*Profile Section Height Difference* Rdc)**

  Consiste en la distancia vertical entre dos Relaciones de Material Rmr en la curva de Abbott. Se calcula como:

$$Rdc = c(Rmr1) - c(Rmr2)$$

Donde:

Rmr1<Rmr2

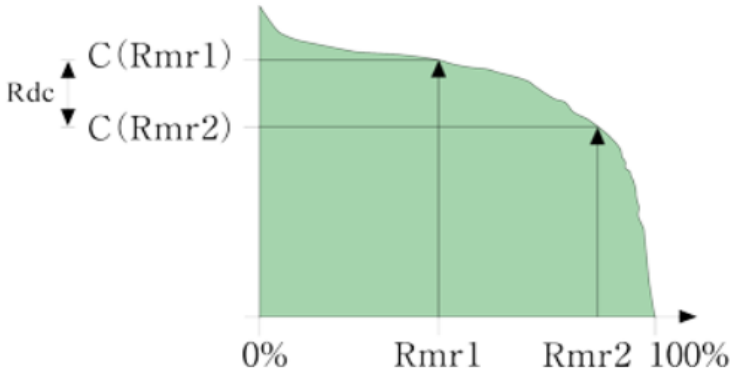

Figura 14 Diferencia de alturas Rdc. Imagen extraída de [6]

- **Relación Relativa del Material (*Relative Material Ratio* Rmr)**

  Consiste en la distancia horizontal entre las dos Relaciones de Material Rmr que indica la Diferencia de Altura de la Sección de Perfil Rdc. Se calcula como:

$$Rmr = Rmr(c_1)$$

Donde:

$$C_1 = C_0 - Rdc, C_0 = C(Rmr0)$$

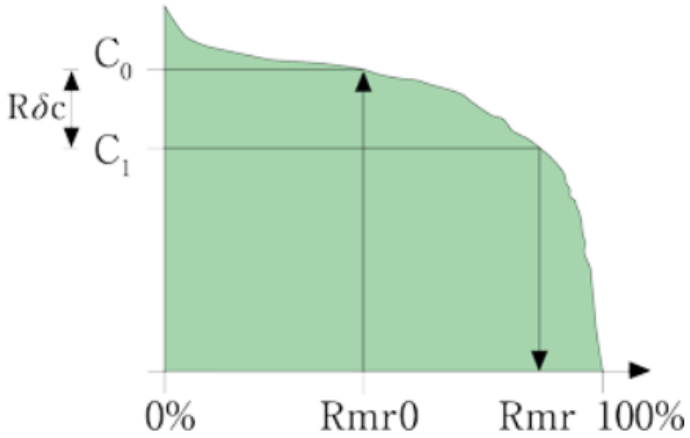

Figura 15 Relación relativa del material Rmr. Imagen extraída de [6]

5. Parámetro de Motivo (*Motif Parameters*)

AR: Representa el ancho promedio de diversas Longitudes de Muestreo dentro de una Longitud de Evaluación

R: Representa la profundidad promedio de diversas Longitudes de Muestreo dentro de una Longitud de Evaluación. A cada una de esas profundidades en las Longitudes de Muestreo se les conoce como Hj, como se observa en la Figura 20.

Rx: Representa la profundidad máxima Hj dentro de una Longitud de Evaluación

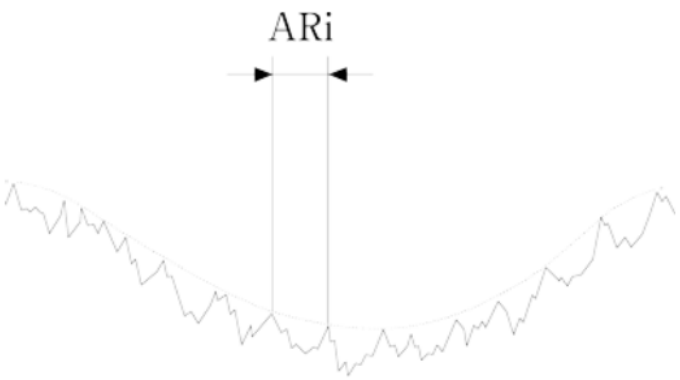

Figura 16 Visualización del ancho AR de la longitud de Muestreo i. Imagen extraída de [6]

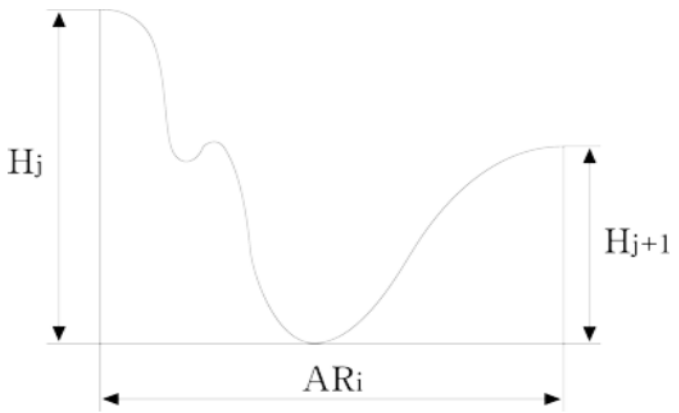

Figura 17 Visualización del ancho AR de una Longitud de Muestreo i con profundidad Hj. Imagen extraída de [6]

Lubricantes

Los lubricantes son una parte esencial de prácticamente cualquier mecanismo debido a su gran apoyo en términos de enfriamiento de sistemas y de reducción de pérdidas debidas a la Fricción. De manera general, son sustancias (generalmente líquidos o sólidos muy viscosos como cremas) las cuales se aplican entre dos superficies para que, a la hora de que estas entren en contacto, resbalen, de tal modo que se calienten lo menos posible y se tengan, por lo tanto, menos pérdidas energéticas en forma de calor.

Desgaste

Desgaste leve y severo

El desgaste se puede definir como la pérdida de material en una superficie sólida por la interacción mecánica con otro elemento o sustancia (llamados contracuerpo o contramaterial) ya sean sólidos, líquidos o gaseosos, sin embargo, el desgaste no es exclusivo por causas mecánicas, existen otros factores que lo pueden potenciar, como lo son: factores químicos y/o térmicos. Para que el proceso ocurra debe haber contacto el material base y el contracuerpo, y debe existir un movimiento relativo entre ellos debido a cargas. [8][9]

El desgaste se puede clasificar en dos tipos, el primero se considera como desgaste leve porque la remoción de material es mínima, esto se logra por la presencia de una capa (tribocapa) protectora que evita el contacto directo de los materiales [6], en el caso específico de desgaste por adhesión. El segundo es el desgaste severo donde existe una fuerte adhesión entre materiales provocando una alta tasa de remoción de material. La generación de la tribocapa (conocida en inglés como mechanically mixed layers por sus siglas en inglés MMLs) es más a fin a crearse en materiales con alta capacidad de deformación, es decir, con gran tenacidad, esta se forma por esfuerzos de compresión hidrostática a causa de las cargas normales por el contacto de los materiales produciendo una zona de mezcla en la zona más cercana a la superficie reduciendo la fricción entre materiales y el desgaste por adhesión. [10]

La formación de la capa está altamente controlada por la presión aplicada, mientras mayor sea, se logrará una capa más compacta y densa teniendo un menor desgaste, pero al mismo tiempo si no se controla adecuadamente una presión elevada puede aumentar la deformación y dañar la superficie del material provocando un mayor desgaste. [10]

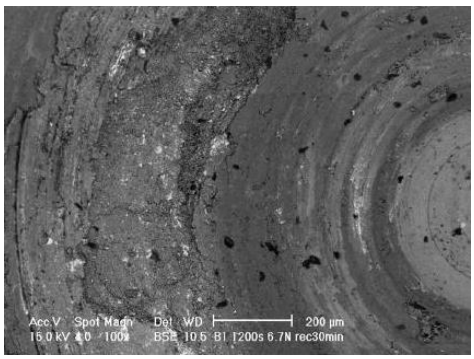

Figura 18 Microestructura superficial de una aleación SAE 783, se observan dos fases que implica que no se ha generado la tribocapa.[11]

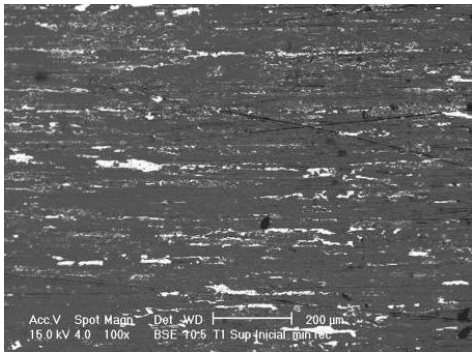

Figura 19 Microestructura superficial donde se observa la mezcla de fases debido a cargas aplicadas[11]

El desgaste severo se comienza a presentar cuando hay nucleación y propagación de grietas en dirección paralela al deslizamiento formando residuos (conocido en inglés como debris) donde su tamaño dependerá de la profundidad de la zona de deformación plástica (mezcla). Se ha observado que para un material dado existe una temperatura crítica para la transición de desgaste leve a severo y que a mayor velocidad de deslizamiento la carga de transición disminuye, de igual forma a bajas velocidades la respuesta del material es estable e isotérmica con pequeñas partículas fuertemente compactadas que comenzaran a desprenderse cuando se exceda el esfuerzo a la fractura, por el contrario, a altas velocidades hay inestabilidad en un ambiente adiabático y por esfuerzos cortantes se forman residuos con forma de lámina (granos alargados). [10]

Se puede concluir que los parámetros que marcan la diferencia entre desgaste leve y severo son la magnitud de la carga, la velocidad de deslizamiento y la temperatura, aunque dependiendo del material y otros factores como la lubricación pueden dar distintos comportamientos, sin embargo, una forma de general de representar su relación es como se muestra en la Figura 20.

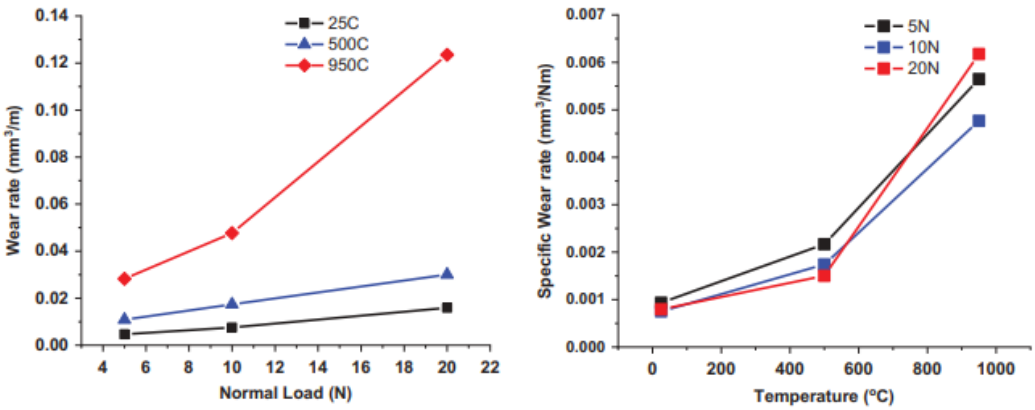

Figura 20 En la gráfica (a) se observa que las tasas de desgaste incrementan con magnitudes de cargas altas al igual que con mayores temperaturas, en la gráfica (b) la tasa de desgaste específica aumenta con elevadas temperaturas. Gráficas obtenidas de [12]

Parámetros de Desgaste:

El estudio del desgaste es uno de los retos más grandes para la ingeniería. Esto es porque aún no se ha encontrado cómo modelar el fenómeno de tal forma que sea posible predecir su comportamiento satisfactoriamente. Esto se debe a que el desgaste depende de diferentes factores mecánicos, químicos y térmicos. Es por lo que diferentes autores han propuesto diferentes formas de catalogar los métodos de desgaste. A continuación, pondremos algunos ejemplos.

Una pre-clasificación del desgaste es: desgaste mecánico, térmico y químico. El mecánico tiene que ver con procesos de deformación y fractura; el térmico se refiere a los procesos donde zonas localizadas se funden por las altas temperaturas que alcanzan; y el químico trata sobre desgaste generado por el crecimiento de una película de reacción química. Estas descripciones no sirven para generar los modelos físicos del desgaste debido a que no nos proporcionan información suficiente, sino que nos dan una idea rápida del método de desgaste que sufre el elemento. En la siguiente tabla se pueden ver los parámetros correspondientes a cada tipo de desgaste.

Tabla 1 Clasificación de métodos generales de desgaste

Tipo	Parámetros						
Tipo de fricción	Rodante	Rodante-deslizante		Deslizante	Fricción	Impacto	
Tipo de contacto	Esfera/esfera	Cilindro/cilindro	Plano/plano	Esfera/plano	Cilindro/plano		Golpe/plano
Nivel de presión por contacto	Elástico		Elasto-plástico		Plástico		
Velociad de deslizamiento	Bajo		Medio		Alto		
Temperatura	Bajo		Medio		Alto		
Material de contacto	Igual	Más duro		Más suave	Compatible	Incompatible	
Ambiente	Vacío	Gas		Líquido		Sólido	
Ciclo de contacto	Bajo (sólo uno)		Medio		Alto		
Distancia entre elementos	Corto		Medio		Alto		
Fase del desgaste	Sólido	Líquido		Gas	Átomo	Ion	
Estructura de las partículas de desgaste	Original		Solución sólida		Triboquímicamente formado		
Libertad de las partículas de desgaste	Libre	Encerrada		Incrustada		Conglomerada	
Magnitud de las partículas de desgaste	Milímetros		Micrómetros		Nanómetros		
Química y física de los elementos en el desgaste	Adsorción física, adsorción química, activación tribológica y formación de capa tribológica, oxidación y delaminación, oxidación y disolución, oxidación y formación de gas, cambio de fase, recristalización, formación de grietas y propagación, transferencia y retransferencia adhesiva						
Sistemas dinámicos de los elementos relacionados al desgaste	Vibración vertical	Vibración horizontal		Vibración auto-generada	Vibración armónica	Cambio entre deslizamiento y adhesión	
Proceso de desgaste dominante	Fractura (dúctil o frágil)	Flujo plástico	Flujo de fusión	Disolución	Oxidación		Evaporación
Mecanismo de desgaste	Abrasivo	Adhesivo	Flujo	Fatiga	Corrosivo	Fusión	Difusivo
Tipo de desgaste	Mecánico		Químico		Térmico		

La norma DIN 50320 clasifica al desgaste por los mecanismos que sufren los materiales y se puede ver en la Tabla 2. Sin embargo, no toma en cuenta la erosión o la corrosión por lo que no es tan completo.

Tabla 2 Clasificación de mecanismos de desgaste de la DIN.

Tipo de desgaste	Mecanismo de desgaste
Adhesivo	Formación de juntas interfaciales adhesivas ("soldadas") por acción de fuerzas moleculares
Abrasivo	Ranurado por rayaduras, procesos de cortes microscópicos
Fatiga de la superficie	Grietas en la superficie debido a esfuerzos que varían en magnitud o dirección
Reacción tribológica	Formación de productos de una reacción por el efecto combinado de acción tribológica entre los materiales en contacto y la reacción química con el ambiente

Otros autores como Burwell, uno de los primeros en catalogar los diferentes mecanismos de desgaste, clasificó al desgaste por el mecanismo y las características del daño generado. De su estudio propone 5 tipos de desgaste: adhesivo, abrasivo, corrosivo, por fatiga superficial y desgastes menores como el generado por fricción o por rayaduras. Pero en esta clasificación también hace falta la erosión.

Chattopadhyay propone que la forma de clasificar al desgaste sea mediante su interacción con el ambiente en el que se encuentra. La Tabla 3 muestra esta clasificación

Tabla 3 Clasificación de los mecanismos de desgaste de Chattopadhyay

Tipo/modo	Ambiente con el que interactúa	Control
Adhesivo	Material similar o no similar	Alterar propiedades de la superficie; lubricación
Abrasivo	Partículas sólidas	Alterar propiedades de la superficie
Erosión	Partículas suspendidas en un fluido	Cambiar el ángulo de impacto de las partículas mediante el uso de una placa amortiguadora o cambio de diseño; alterar las propiedades de la superficie
Corrosión	Fluidos reactivos	Alterar las propiedades de la superficie; métodos electroquímicos
Cavitación	Colapso de burbujas en el fluido contra la superficie	Alterar las propiedades de la superficie
Térmico	Transferencia de calor	Alterar las propiedades de la superficie; aislar la superficie (e.g., con un recubrimiento térmico)
Fatiga	Esfuerzos alternantes/cíclicos	Evitar esfuerzos concentrados; alterar las propiedades de la superficie incluyendo esfuerzos residuales en la superficie

Otro autor muy importante en el estudio del desgaste, Archard, estudió qué tan severo era el desgaste entre varias combinaciones de metales sin lubricación, y clasificó al desgaste en leve y severo.

Por último, Ko menciona que para clasificar al desgaste se debe tomar en cuenta el movimiento relativo de los elementos, el mecanismo de pérdida de material y qué tan severo es el desgaste; también menciona que otros parámetros importantes son la carga, la velocidad, la temperatura, el ambiente y los materiales, y hace una recopilación de las clasificaciones de diferentes autores usando solamente los parámetros de movimiento relativo y el tipo de desgaste para definir el mecanismo de desgaste. Esto se puede ver en la Figura 21 Clasificación de los mecanismos de desgaste de Ko.Figura 21

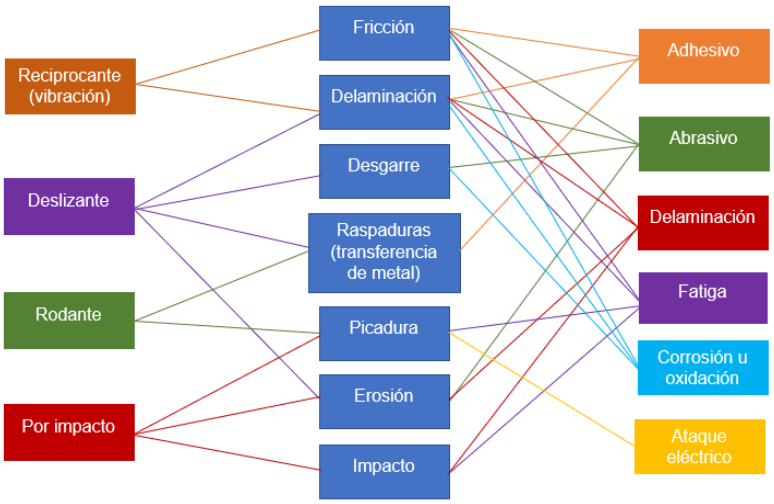

Figura 21 Clasificación de los mecanismos de desgaste de Ko.

Cómo podemos observar, diferentes autores estudian diferentes mecanismos o parámetros y todos tienen cierta validez. Esto ejemplifica lo complicado y lo diverso que es el tema de desgaste, y de igual forma muestra lo mucho que ha avanzado el estudio de este tema en los últimos 50 años. Sin embargo, varios autores coinciden en algunos mecanismos de desgaste, que son de los que hablaremos a continuación.

Mecanismos de desgaste

Existen 3 formas en las cuales puede ser clasificado el desgaste. La primera es por la forma de la marca de desgaste. La segunda, es por el mecanismo físico del desgaste y la tercera es meramente descriptiva.

Estas tres formas de clasificación son útiles para los ingenieros en distintos aspectos. Por ejemplo, la clasificación por apariencia ayuda a comparar el problema con otros problemas de desgaste y, gracias a esto, es posible extrapolar el problema que se está estudiando hacia uno nuevo. Por otra parte, la clasificación por mecanismo físico permite al ingeniero crear modelos de predicción de la evolución del desgaste en un material y, además, para identificar los parámetros que modifican los modelos y cuáles pueden ser controlados. Por último, el tercer tipo es más utilizado desde el punto de vista del diseño de elementos, debido a que este tipo de clasificación describe el desgaste en términos macroscópicos. [9]

En lo siguiente, se describirá la clasificación por mecanismo físico, el cual se divide por: adhesión, abrasión y otros métodos que se describirán a continuación.

Desgaste adhesivo

Área real y aparente de contacto

Para empezar a hablar del mecanismo de adhesión, es necesario discutir la naturaleza del contacto entre dos superficies. Para ello, el primer tema a tratar será el área de contacto real y área de contacto aparente.

Como ya se vio en el apartado Rugosidad, las superficies no son lisas, sino que presentan cierto grado de rugosidad. El contacto no se presenta en toda la superficie de los dos elementos, se presenta en pequeñas regiones dentro del área. En la Figura 22 se ilustra esta situación. Estos pequeños puntos en los cuales ocurre el contacto son llamados uniones. La suma de cada uno de los puntos en donde ocurre el contacto es llamada el área real de contacto. Por otro lado, el área aparente de contacto es la consideración macroscópica del área que se pone en contacto. Además, estas uniones pueden ser deformadas como resultado de un esfuerzo cortante. La deformación puede ser elástica o plástica. Sin embargo, se asume que, generalmente, las uniones presentarán deformación plástica [13], lo cual, hace crecer el área de contacto real.

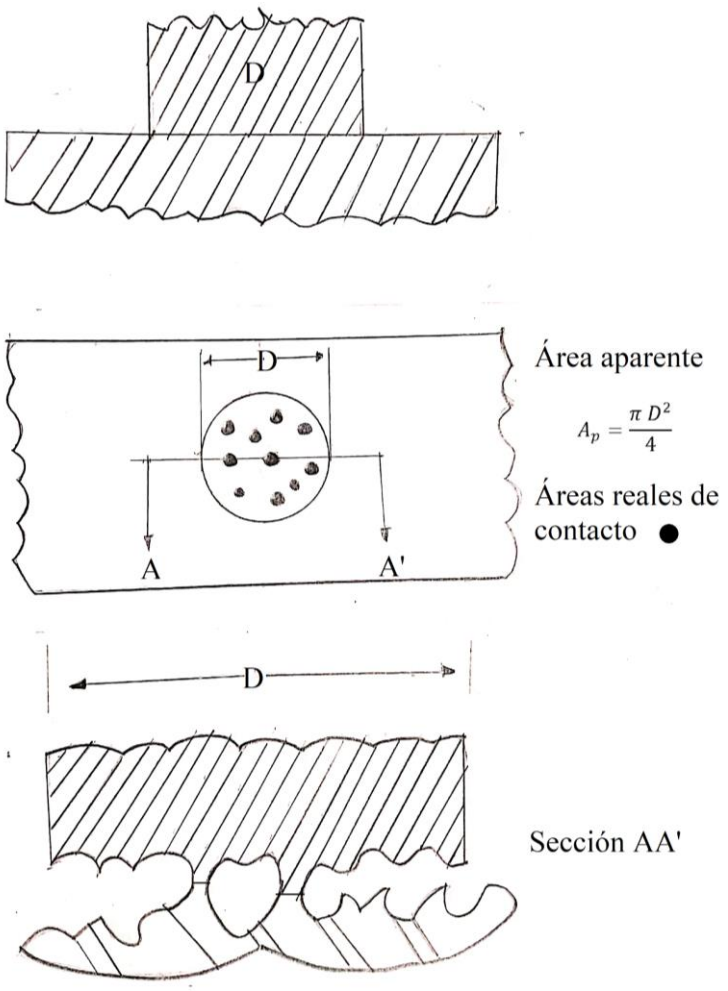

Figura 22 Área de contacto aparente y real. El contacto ocurre en localizaciones discretas llamadas uniones.

Adhesión

El fenómeno de adhesión se debe a la generación de enlaces físicos que se forman entre las uniones de las superficies [13]. Estos enlaces se forman debido a la naturaleza de la fuerza interatómica. El comportamiento de las fuerzas interatómicas entre dos átomos se ilustra en la Figura 23. Para grandes separaciones, existe una débil fuerza de atracción. A medida que los átomos se aproximan entre sí, la fuerza de atracción aumenta. Un potencial de energía negativo indica la formación de enlace.

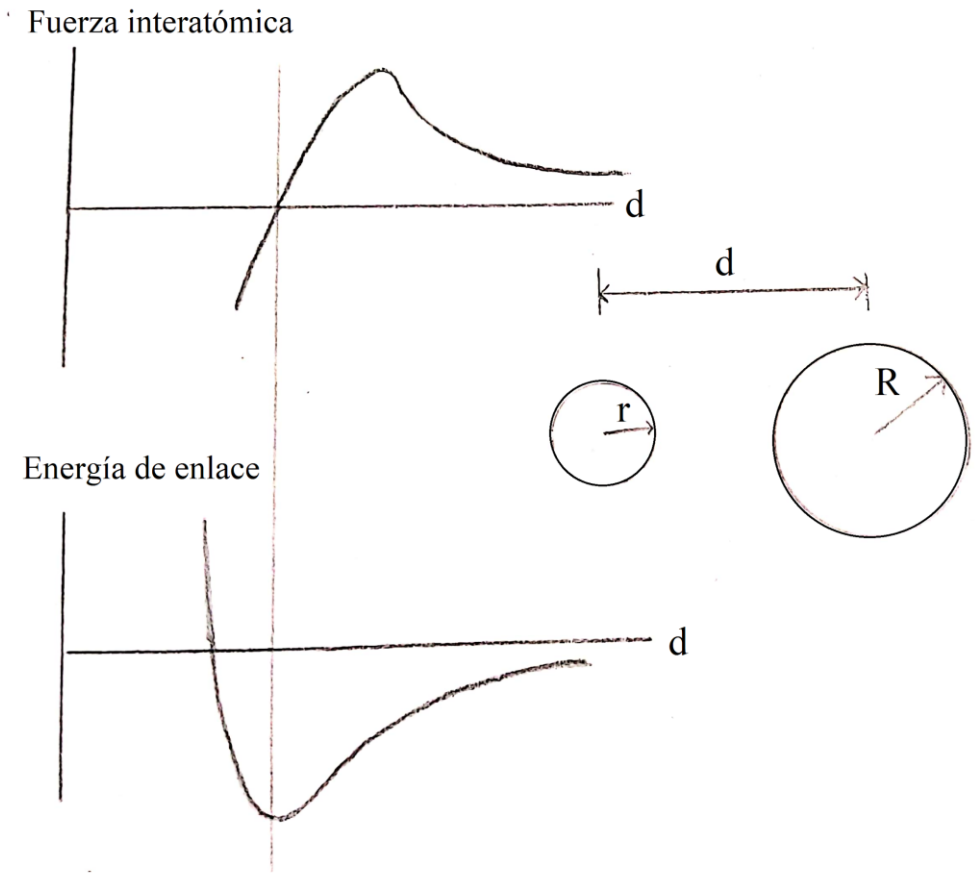

Figura 23 Naturaleza general de la fuerza entre átomos y la energía de enlace en función de su separación.

Dado que las uniones se forman como resultado de la presión de dos superficies, la naturaleza de las fuerzas interatómicas indica que el enlace se produce en estas uniones. Esto también implica que existen uniones en las cuales se pasa el punto de equilibrio de la formación de enlaces y existe fuerza de repulsión. Esta es la única forma en la que las fuerzas pueden estar balanceadas. La conclusión de lo anterior es que se deben superar estas fuerzas adhesivas para poder separar las dos superficies. Este punto de vista atómico del contacto entre las uniones es el que fundamenta el concepto de desgaste por adhesión.

Considerando el diagrama que se muestra en la Figura 24, en el cual se representa una situación en la cual el enlace ha ocurrido. A medida que las dos superficies se mueven entre sí, la ruptura del enlace se dará inevitablemente. Si la ruptura del enlace ocurre a lo largo de la trayectoria 1, qué es la superficie original, no se perderá material de ninguna superficie, puede existir algo de deformación plástica. Si, por el contrario, la ruptura se produce por alguna otra trayectoria, se ilustra por la trayectoria 2 en la Figura 24, la superficie superior habría perdido material. La pérdida de material por este mecanismo es llamado desgaste abrasivo.

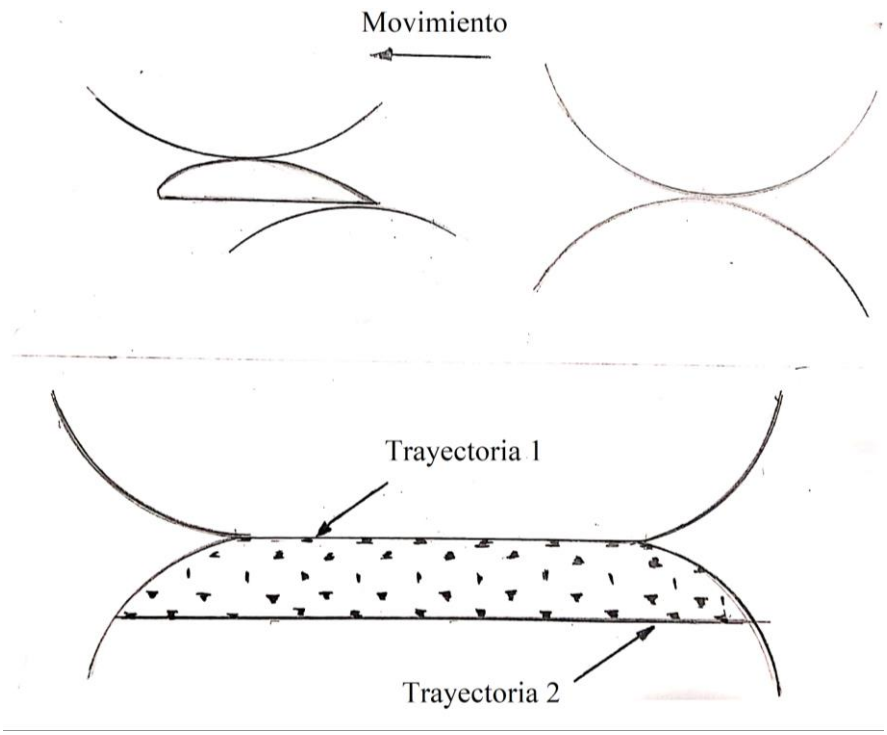

Figura 24 Diagrama que muestra las posibles trayectorias en las que se puede fracturar un enlace. La separación a lo largo de la trayectoria 1 no resulta en pérdida de material. La separación a lo largo de la trayectoria 2 implica una pérdida de material.

En la Figura 25 se muestra una micrografía obtenida de un microscopio electrónico de barrido (SEM), en la cual se ilustra el proceso de adhesión. En este caso, una pequeña aguja de hierro redondeada simula la aspereza. En la parte inferior derecha, los resultados de la formación de enlaces son evidentes. Inicialmente la unión formada por esta aspereza parece romperse en la superficie original, dejando sólo un surco deformado plásticamente como consecuencia de su movimiento. En algún momento, la falla ya no ocurre en la interfaz original, sino que, a cierta profundidad dentro de la aspereza, dejando una parte de la aspereza adhiriéndose a la superficie plana.

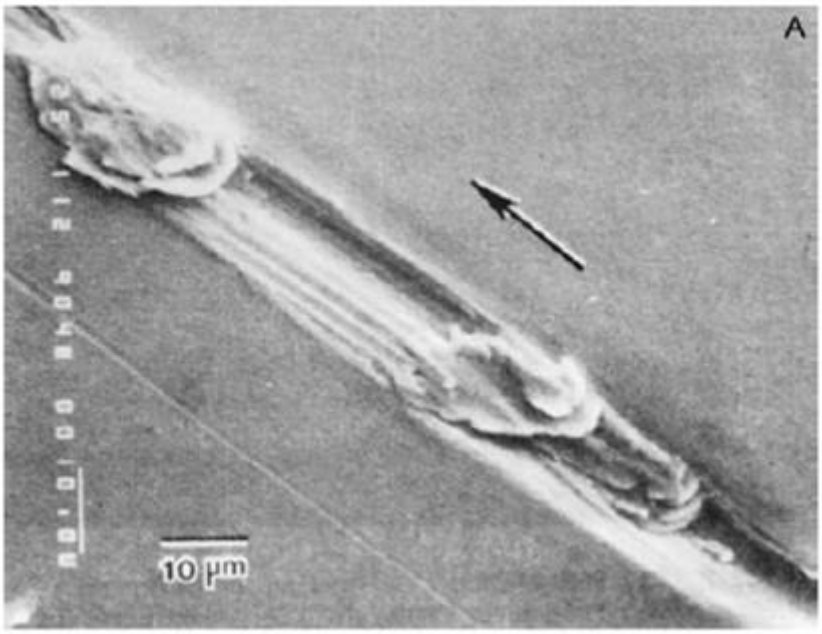

Figura 25 Ejemplo del proceso de desgaste adhesivo. Se muestra la marca producida por una aguja de hierro deslizándose sobre la superficie de un disco de níquel. La flecha indica la dirección del movimiento. Imagen obtenida de [13]

Desgaste abrasivo

El desgaste por abrasión es causado por partículas duras y protuberancias. Estas situaciones están ilustradas en la Figura 26. Cuando 2 superficies están involucradas, se refiere a abrasión. Generalmente se hace distinción entre dos tipos de abrasión, abrasión entre dos cuerpos y tres cuerpos. La abrasión entre dos cuerpos es causada por protuberancias o por partículas duras incrustadas en la superficie. La abrasión entre tres cuerpos es provocada por partículas suspendidas entre las dos superficies. Por otra parte, el término erosión es generalmente aplicado a situaciones donde el desgaste abrasivo solo involucra una superficie.

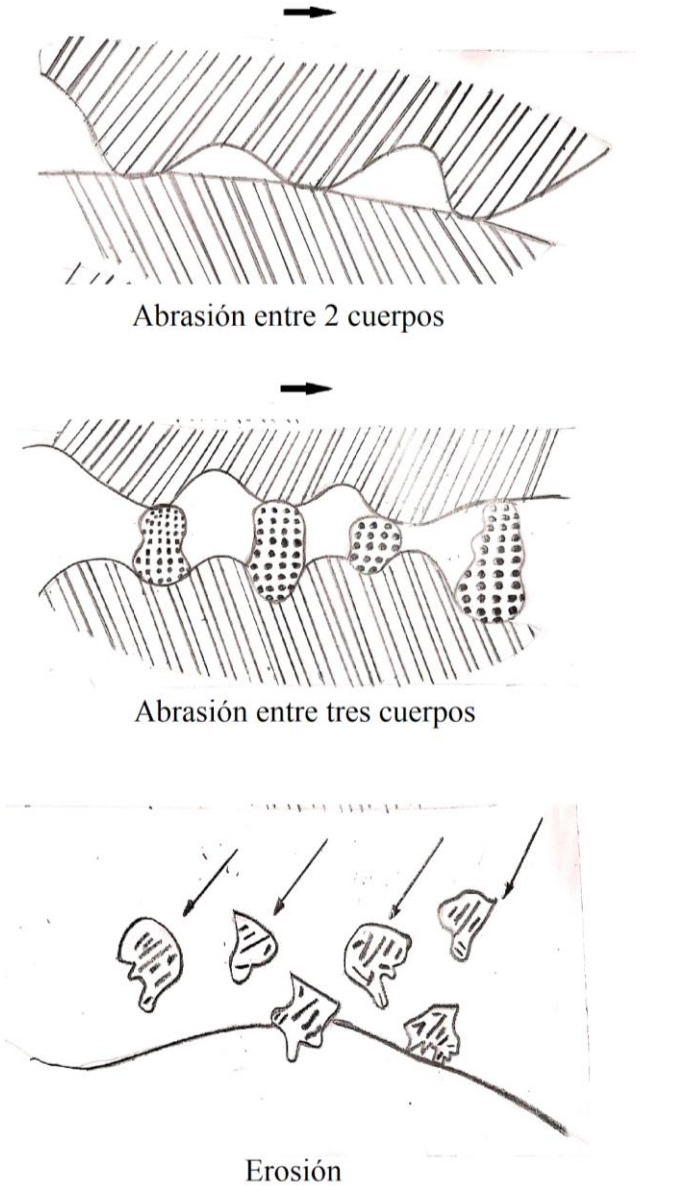

Figura 26 Formas de desgaste abrasivo. Podemos identificar dos formas de desgaste abrasivo, entre dos y tres cuerpos, y el desgaste abrasivo por erosión.

Cuando el abrasivo es más duro que la superficie, el tipo de mecanismo de desgaste dominante es la deformación de ciclo único. En este caso, el fenómeno no disminuye por la duración del deslizamiento. Cuando el abrasivo es más suave que la superficie, el tipo de mecanismo de desgaste dominante es la deformación de ciclo repetitivo. Las atmósferas y el medio fluido donde tiene lugar el desgaste abrasivo son factores para el desgaste. La corrosión en la superficie tiende a generar una alta tasa de desgaste, debido al desprendimiento de óxidos de la superficie, los cuales actúan como abrasivos. Ejemplos de las marcas de desgaste por abrasión se muestran en la Figura 27.

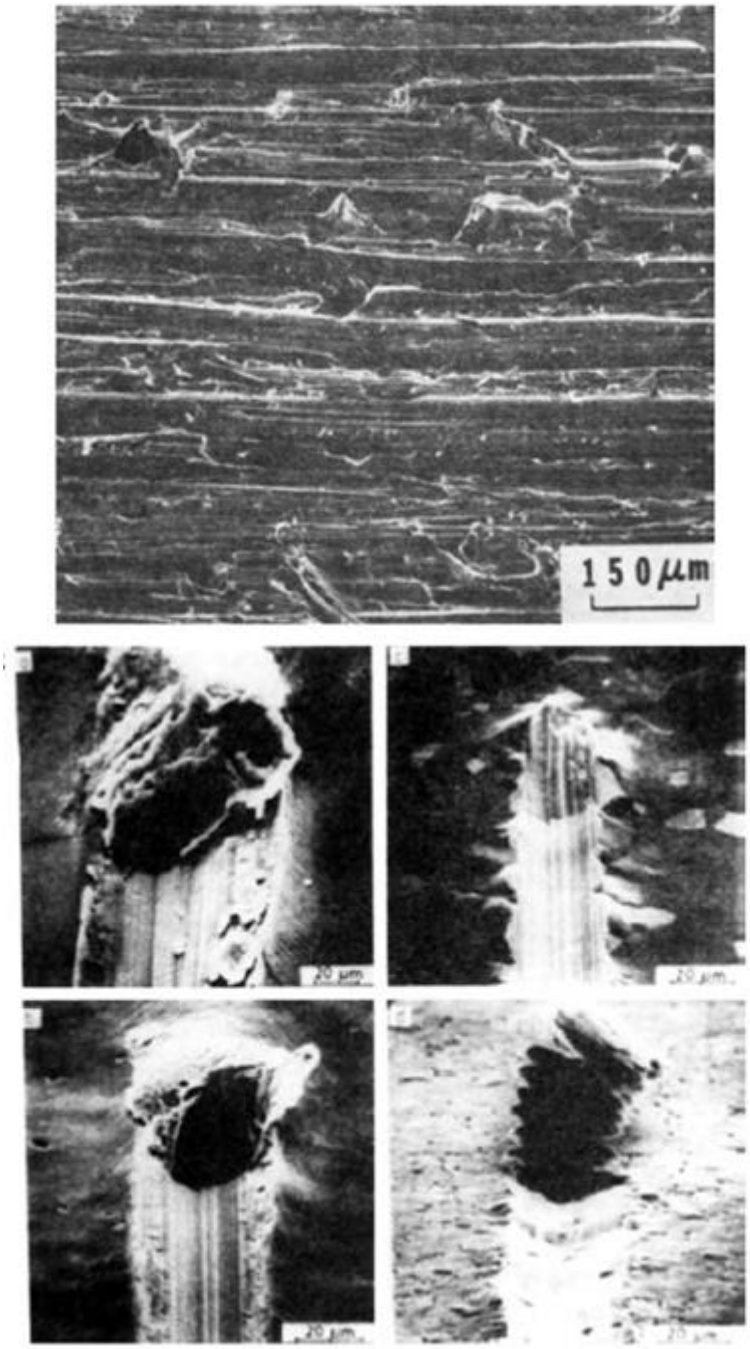

Figura 27 Ejemplos de desgaste por abrasión. En la figura superior se muestra abrasión entre dos cuerpos, mientras que en la inferior se muestra abrasión entre tres cuerpos. Figura obtenida de [14]

Otros mecanismos de desgaste

Desgaste por corrosión

También conocido como desgaste químico, es un mecanismo que se produce por un contacto deslizante en una atmósfera corrosiva, primero se debe aclarar que muchos materiales, en su mayoría metálicos, en contacto con un determinado ambiente generan una capa de óxido en su superficie (por acción triboquímica) que los protege de reacciones electroquímicas que provocan su deterioro, y si esta capa protectora se elimina continuamente por condiciones de deslizamiento existirá corrosión en el

material y esta se puede manifestar de las diferentes formas de corrosión (picadura, intergranular, intragranular). [10, 14, 15]

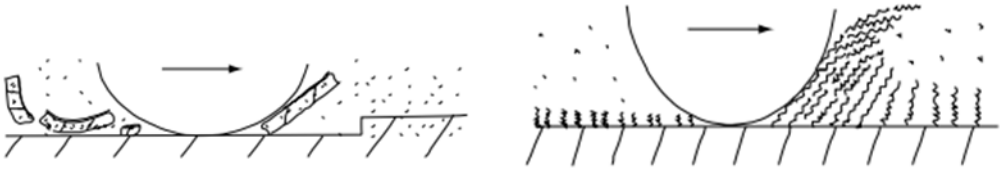

Figura 28 En la figura de la izquierda se muestra la remoción de tribocapas duras, y en la figura de la derecha se representa la remoción de tribocapas blandas [10]

El mecanismo es diferente a un proceso puro de corrosión donde la superficie del material reacciona directamente con el ambiente por acción electroquímica, por el contrario, para que la corrosión se active en desgaste es necesario que exista frotamiento entre las superficies, por lo que se puede decir que es una combinación con desgaste adhesivo o abrasivo, los cuales se explicaron anteriormente. En este mecanismo la tasa de desgaste puede obtenerse igualmente con la ecuación de Archard si se tiene tribocapas duras como óxido de hierro en superficies de acero, en este caso el coeficiente de desgaste se define por:

$$K = \frac{d * A * e^{\left(-\frac{Q}{R_g T}\right)}}{\xi^2 * \rho^2 * U}$$

Donde A es la constante de Archinius, d es la distancia que estuvieron en contacto los elementos, Q es la energía de activación, Rg es la constante del gas, T es la temperatura absoluta, ρ es la densidad de la capa de óxido y U es la velocidad de deslizamiento. [10]

Desgaste por erosión

El desgaste por erosión se puede clasificar en cuatro: erosión por partículas, erosión por líquidos, erosión por cavitación y slurry erosion en cada caso lo que impacta en la superficie del material es diferente. [10]

La erosión por partículas sólidas es la pérdida de material por repetidos impactos de partículas sólidas en la superficie de un material, estas partículas pueden presentarse en medios gaseosos o líquidos, en ambos casos las partículas se pueden acelerar o desacelerar y su dirección puede ser modificada por el fluido en las que estén suspendidas. El proceso se puede llevar a cabo en superficies dúctiles o frágiles, y es claro que el comportamiento será diferente para cada una, sin embargo, en ambos casos las variables más significativas son cuatro: [8, 14]

1. Ángulo de impacto: Dependiendo del ángulo de incidencia de las partículas sólidas el volumen de desgaste será mayor o menor, el máximo desgaste se encuentra a 18.5° y en ángulos cercanos a 0° y 90° el desgaste es mínimo.

2.Dureza del material y de las partículas: La dureza de las partículas sólidas generalmente será mayor a la del material y, por lo tanto, existirá el desgaste.

3. Velocidad de la partícula: El volumen de desgaste es directamente proporcional a la velocidad de la partícula.

4. Tamaño y forma de la partícula: Las partículas con formas que presentan ángulos son más abrasivas que las de forma redondeada.

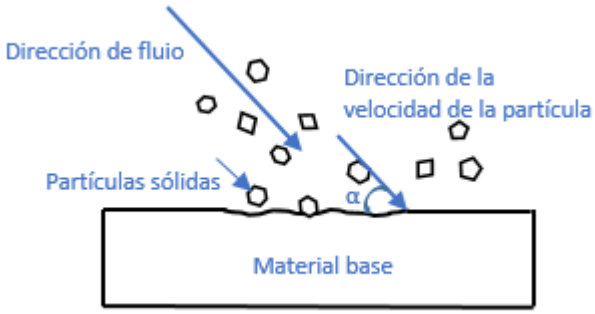

Figura 29 Mecanismo de desgaste por erosión de partículas sólidas, basado en [16]

Todas estas variables se observar en la ecuación desgaste, para el caso particular de superficies dúctiles se tiene que el volumen de desgaste es: [14]

$$V = \frac{mv^2}{P\rho K}\left[sin2\alpha - \frac{6sin^2\alpha}{K}\right]$$

Donde m es la masa de la partícula, v es la velocidad de la partícula, K es el coeficiente de desgaste, P es el límite elástico, ρ es el radio de la profundidad de contacto y α es el ángulo de inclinación.

La diferencia entre este mecanismo y abrasión es la aplicación de la carga, en erosión por partículas sólidas la carga es discontinua y se debe a la desaceleración de estas mientras que en abrasión la carga es constante. [8]

La erosión de una superficie sólida puede llevarse a cabo sin la presencia de partículas sólidas como es la erosión por líquidos que es sencillamente provocada por gotas de agua (provenientes de la lluvia) que impactan en la superficie de materiales por ejemplo en aviones. La velocidad de las gotas puede llegar a velocidades de 315 m/s, aunque es el tamaño de la gota lo realmente provoca la erosión, se ha observado que después de un tiempo se tiene una etapa de desgaste estacionario seguido de un decremento de la tasa de desgaste. En la primera etapa de desgaste se generan depresiones y en las etapas posteriores se comienzan a presentar grietas cuya propagación provoca el desprendimiento de fragmentos de material.

La erosión por cavitación es el proceso en el que la eliminación de material de debe a la formación y colapso burbujas dentro del líquido, este mecanismo está presente en hélices de barcos, bombas hidráulicas, turbinas, presas, compuertas y otras estructuras hidráulicas. La pérdida de material en este mecanismo se debe a las constantes cargas de las burbujas, sin embargo, la corrosión también es un factor importante y más en ciertas combinaciones de material-fluido.

Finalmente, el mecanismo slurry erosion es la pérdida progresiva de material por una mezcla (slurry) de líquido con un porcentaje del 10% aprox. de partículas sólidas que está en movimiento entre superficies sólidas, este método se puede combinar fácilmente con desgaste por cavitación. Consta de tres etapas, en la primera se generan depresiones en la superficie, en la segunda se presenta una alta tasa

de remoción y en la última etapa el desgaste se ralentiza, mientras mayor sea la cantidad de partículas sólidas mayor será el desgaste. [8, 14]

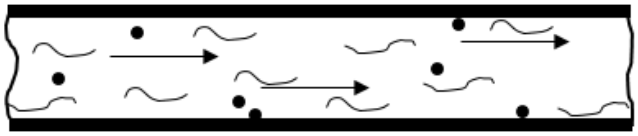

Figura 30 Mecanismo de desgaste por slurry erosion, basado en [8]

Tasas de desgaste

Ecuación de Archard

La tasa de desgaste en unidad de volumen anteriormente se basaba en la ecuación de Holm para contactos eléctricos y posteriormente se expresó por la ecuación de Archard, esta última define que el volumen de desgaste es directamente proporcional a la distancia de deslizamiento (d) y la fuerza normal aplicada (FN) e inversamente proporcional a la dureza en la superficie del material (H). [14]

$$V = K * \frac{F_N}{H} * d \quad [\mathrm{m}^3]$$

Si se representa el desgaste en profundidad de desgaste se expresa:

$$\delta = K * \frac{F_N}{H} * \frac{d}{A} \quad [\mathrm{m}]$$

Donde A es el área de contacto y K es el coeficiente de desgaste que se obtiene de forma experimental a partir de cantidad de volumen perdida, carga aplicada, distancia de deslizamiento, dureza en la superficie del material y dependerá del mecanismo de desgaste que esté presente y definirá si es por adhesión, abrasión, corrosión u otros, este valor también puede proporcionar el tipo de lubricación que dará una mayor esperanza de vida al material.[14]

La ecuación de Archand en desgaste por adhesión puede definirse en unidades de metros cuadrados y la expresión sería:

$$w = K * \frac{F_N}{H} \quad [\mathrm{m}^2]$$

Algunos valores del coeficiente de desgaste se muestran en la Tabla 4 para diferentes mecanismos de desgaste.

Tabla 4 Valores de coeficiente de desgaste dependiendo al mecanismo de desgaste [8]

Mecanismo de desgaste		Valor de K
Adhesión	Metales idénticos	de 0.01 a $1x10^{-7}$
	Metales compatibles	de 3.162 $x10^{-3}$ a $1x10^{-7}$
	Metales parcialmente compatibles	de $1x10^{-3}$ a $1x10^{-7}$

	No metales con metales o no metales	de $1x10^{-4}$ a $1x10^{-5}$
Abrasión	Entre dos cuerpos	de 0.316 a $3.162x10^{-3}$
	Entre tres cuerpos	de 3.162 $x10^{-3}$ a $1x10^{-5}$
	Por corrosión	de 0.01 a $3.162x10^{-6}$
	Adhesión (fretting)	de $1x10^{-4}$ a $1x10^{-7}$

Metodologías para la evaluación del desgaste.

Se han desarrollado varios métodos para evaluar el desgaste y los tratamientos superficiales. La selección correcta del método es esencial para poder obtener información certera de las pruebas. Para la selección adecuada es necesario evaluar el tipo de desgaste que se presenta.

Métodos de evaluación de desgaste estandarizados

La ASTM (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales) tiene un listado de las pruebas para la evaluación de desgaste, no siempre se utilizan estas ya que algunas compañías privadas ocupan sus propios métodos para la evaluación. A continuación, se mostrará una tabla con los métodos de evaluación de desgaste según la ASTM para desgaste abrasivo, erosivo, corrosivos, entre otros. Además, se mostraran los procesos de algunas pruebas más relevantes.

Tabla 5 Pruebas de desgaste por la ASTM [17]

Prueba	Significado y usos	Designación	Tipos de desgaste	Medición del desgaste
Método de evaluación para desgaste abrasivo de la cinta de impresión de la tela impregnada de tinta.	Esta prueba diferencia entre materiales de banda en función de su capacidad para causar desgaste superficial con los materiales que están en contacto. También se utiliza en la evaluación a la resistencia al desgaste en materiales de banda. [18]	G56	Desgaste abrasivo de 2 cuerpos.	Perfilado de superficie u otro método.
Método de evaluación para pruebas de abrasión de pasadores, el proceso se ilustra en la Figura 34	El objetivo de esta prueba es clasificar materiales para diferentes aplicaciones donde ocurre abrasión moderada y severa. [19]	G132	Desgaste abrasivo de 2 cuerpos.	Pérdida de masa.
Guía para determinar el sinergismo entre desgaste y corrosión	Esta es una guía que proporciona un apoyo para calcular la tasa de pérdida por desgaste atribuida al sinergismo o interacción que ocurre en un sistema afectado por desgaste y corrosión. [20]	G119	Desgaste abrasivo de 2 cuerpos.	Pérdida de masa y medidas de corrosión

Método de evaluación para medir abrasión utilizando el aparato *Dry Sand/Ruber Wheel*, el proceso se ilustra en la Figura 31	Esta prueba se utiliza para determinar la resistencia de materiales metálicos a la abrasión por un rayado mediante la prueba de una rueda de arena o caucho seca. Los resultados de esta prueba se reportan como pérdida de volumen por milímetros cúbicos. [21]	G65	Desgaste abrasivo, multicuerpo.	Pérdida de masa
Método de evaluación para abrasión por desgarre con mordazas	Esta prueba determina la resistencia al desgarre por abrasión. [22]	G81	Desgaste abrasivo, multicuerpo.	Índice de pérdida de masa
Método de evaluación de abrasión con una rueda de caucho y arena húmeda, como se muestra en la Figura 36.	En esta prueba se estandarizan condiciones como tamaño, forma y dureza de la partícula abrasiva, así como la magnitud del esfuerzo ocasionado por la partícula y su frecuencia de contacto. Los resultados no sirven para predecir exactamente el comportamiento del desgaste, pero ayuda a clasificar los materiales. [23]	G105	Desgaste abrasivo, multicuerpo.	Pérdida de masa normalizada por dimensiones de ruedas
Metodología para la evaluación de erosión por cavitación utilizando aparatos vibratorios como se muestra en la Figura 37.	Esta prueba se utiliza para estimar la resistencia a la erosión por cavitación de los materiales. En esta prueba se evalúa el daño por erosión en la cara de un material de prueba que es sometió a vibraciones de alta frecuencia cuando está inmerso en un líquido. [24]	G32	Desgaste erosivo por fluido por cavitación	Pérdida de masa
Práctica para pruebas de erosión por impacto de líquidos	Estas pruebas también se utilizan para evaluar la resistencia a la erosión de los materiales para evaluar ambientes donde las superficies de los sólidos son expuestas a impactos por gotas o chorros de líquidos. Este método es aplicable cuando las velocidades de impacto están alrededor de 60 m/s a 600 m/s. [25]	G73	Desgaste erosivo por gotas.	Pérdida de masa
Metodología para la evaluación de desgaste abrasivo por compuestos acuosos (número de Miller) y la respuesta a la resistencia del desgaste abrasivo por compuestos acuosos (número de SAR)	En esta prueba el número de Miller es un índice del desgaste abrasivo por compuestos acuosos, el propósito es clasificar el desgaste abrasivo en términos del desgaste con una referencia estándar del material. El daño es mayor mientras el número de Miller incrementa. Y el número de SAR es un índice de la respuesta a la abrasión relativa. El objetivo principal es clasificar los materiales de construcción para sistemas de bombeo y fluidos. [26]	G75	Desgaste erosivo por un compuesto acuoso.	Pérdida de masa
Metodología para la evaluación de desgaste por erosión por impacto de partículas sólidas con chorros de gas	Esta prueba ayuda a evaluar el comportamiento ante la erosión de los materiales y su dependencia a otros factores. Actualmente involucra tamaño de partícula, velocidades, ángulos de ataque, ambientes, etc. [27]	G76	Desgaste erosivo por partículas sólidas	Pérdida de masa
Metodología para la protección contra el desgaste de grasas lubricantes	Esta prueba se usa para evaluar las propiedades de los lubricantes grasosos para proteger los rodamientos al desgaste. [28]	D4170	Desgaste por adhesión (*fretting)*	Índice de pérdida de masa

Metodología de evaluación para las características preventivas del desgaste con grasas lubricantes (método de cuatro bolas, ilustrado en la Figura 32)	Esta prueba se utiliza para determinar las propiedades de las grasas para prevenir el desgaste en aplicaciones de acero deslizante con acero. [29]	D2266	Desgaste deslizante	Diámetro de la marca de desgaste
Metodología para la medición de propiedades de desgaste de fluidos lubricantes (método Falex Pin y Vee Block, método ilustrado en Figura 33)	Esta prueba determina el desgaste obtenido con fluidos lubricantes bajo condiciones predeterminadas. [30]	D2670	Desgaste deslizante	Desgaste de los dientes, aparato especifico en la medición
Metodología para la evaluación de características de desgaste de fluidos hidráulicos de petróleo y no petróleo en una bomba de paletas de volumen constante	Esta prueba está enfocada a bombas de paletas de volumen constante que operan a 1200r/min y 13.8MPa. Esta prueba es importante ya que un exceso de desgaste en las bombas puede llevar a un mal funcionamiento del sistema hidráulico en aplicaciones críticas.	D2882	Desgaste deslizante	Pérdida de masa
Metodología para la evaluación de la vida útil de los lubricantes sólidos en movimientos oscilantes	Esta prueba evalúa la vida de desgaste de un lubricante sólido que se encuentra en condiciones de movimiento oscilatorio. [31]	D2981	Desgaste deslizante	Número de revoluciones hasta la falla, como se indica por fricción
Metodología de evaluación para la tasa de desgaste en materiales en contacto de fricción autolubricante utilizando una máquina de prueba de arandela de empuje como la que se muestra en la Figura 35	Esta prueba se usa para determinar el equilibrio entre el desgate y el coeficiente de fricción, se combina presión y velocidades por debajo del límite PV (presión * velocidad) de los materiales. [32]	D3702	Desgaste deslizante	Cambio de grosor
Metodología para la evaluación de propiedades preventivas del desgaste de las grasas lubricantes usando el bloque (Falex) en la máquina de prueba de anillo en movimiento oscilante	Este método se usa para diferenciar las grasas lubricantes de acuerdo con sus propiedades de prevención de desgaste, alto, medio o bajo. [33]	D3704	Desgaste deslizante	Ancho de la marca de desgaste
Metodología de evaluación para las características preventivas del desgaste con grasas lubricantes (método de cuatro bolas como se muestra en la Figura 32)	Para esta prueba se utiliza la misma máquina que en la prueba D2266.	D4172	Desgaste deslizante	Diámetro de la marca de desgaste

Metodología para la medición de la lubricidad de los combustibles de turbinas de aviación mediante la evaluación de lubricidad de bola sobre cilindro (BOCLE)	El desgaste ocasionado por un exceso de fricción da como resultado una vida más corta en los componentes del motor. Con los resultados de esta prueba se ha demostrado que la lubricación límite es un factor en el funcionamiento del componente.[34]	D5001	Desgaste deslizante	Diámetro de la marca de desgaste
Metodología de evaluación para clasificar la resistencia a desgaste por deslizamiento usando la prueba de desgaste de bloque sobre anillo como se muestra en la Figura 38.	Esta prueba es muy versátil ya que cualquier material que pueda ser fabricado o aplicado a bloques y anillos puede ser probado, por lo que la combinación de materiales es muy grande. También se pueden utilizar distintos tipos de lubricantes y se pueden aplicar diferentes cargas y velocidades de acuerdo con los requerimientos. [35]	G77	Desgaste deslizante	Ancho de la marca de desgaste
Metodología de evaluación de desgaste con un aparato de un perno sobre disco (Pin-on-Disk) como se muestra en la Figura 34.	En esta prueba no se duplican condiciones como lubricación, cargas, presiones, geometrías de contacto, ambientes corrosivos, etc., por lo que no se asegura que se prediga con certeza el comportamiento del desgaste. [36]	G99	Desgaste deslizante	Para esferas: el diámetro de la marca de desgaste, Para discos: el perfil de desgaste
Guía para determinar el sinergismo entre desgaste y corrosión	Esta guía proporciona un medio para calcular el aumento de la tasa de pérdida por desgaste atribuida al sinergismo que ocurre en un sistema cuando coexisten procesos de desgaste y corrosión. [37]	G119	Desgaste deslizante	Pérdida de masa y medidas de corrosión
Metodología de evaluación para el desgaste por el deslizamiento de bola sobre un plano con movimiento alternativo lineal, su configuración es similar al mostrado en la Figura 34, pero hay un cambio en el movimiento.	Esta prueba está diseñada para simular la geometría y los movimientos que se experimentan en componentes sometidos a fricción cuyo funcionamiento da como resultado inversiones periódicas en la dirección del deslizamiento relativo. Los parámetros en esta prueba se determinan por la severidad de la aplicación. [38]	G133	Desgaste deslizante	Para esferas: el diámetro de la marca de desgaste, Para planos: el perfil de desgaste
Metodología para la clasificación de la resistencia de materiales plásticos al desgaste por deslizamiento usando una configuración de bloque sobre anillo, como se muestra en Figura 38	La tasa de desgaste obtenida mediante esta prueba se utiliza para clasificar materiales plásticos, pero no es una propiedad de los materiales, la importancia de esta prueba depende de que se utilicen los parámetros adecuados que sean similares a las condiciones reales de uso. Esta prueba utiliza geometrías de bloque en anillo para clasificar materiales de acuerdo con su desgaste deslizante. [39]	G137	Desgaste deslizante	Pérdida de masa

Metodología para la evaluación de la resistencia a la abrasión de los materiales	Esta prueba está diseñada para clasificar pares de materiales de acuerdo con su resistencia a la falla causada por desgaste abrasivo. Se debe aplicar esta prueba cuando las superficies dañadas ocasionan que los componentes no puedan repararse. Se ha observado que el desgaste abrasivo se presenta más en sistemas deslizantes que se mueven lenta e intermitentemente. Un ejemplo común es la abrasión de componentes roscados. [40]	G98	Daño superficial por abrasión	Inspección visual
Metodología para la evaluación de las propiedades de presión extrema de fluidos lubricantes	Esta prueba se usa para determinar las propiedades de presión extrema para la especificación. Determina la capacidad de carga de los fluidos lubricantes mediante la prueba de presión extrema de Timken (Timken Extrem Pressure Tester). [41]	D2782	Daño superficial	"OK" valor para cargas justo debajo del valor de condición crítica

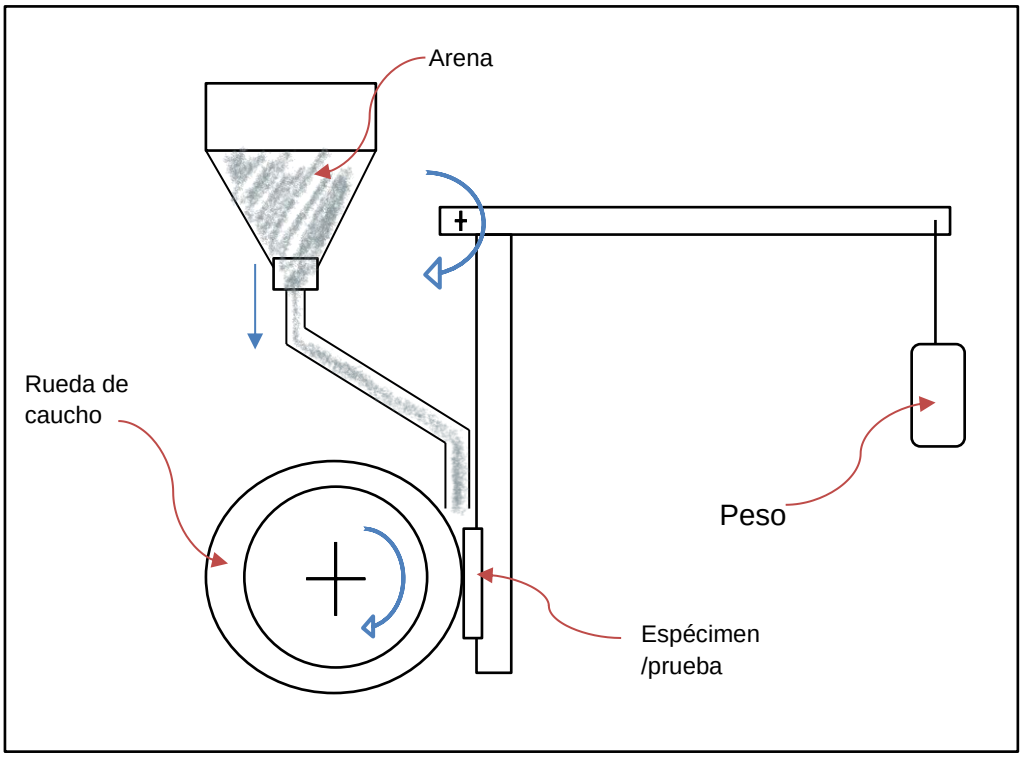

Figura 31 Prueba "Dry sand/rubber Wheel" Rueda de caucho con arena seca.[42, 43]

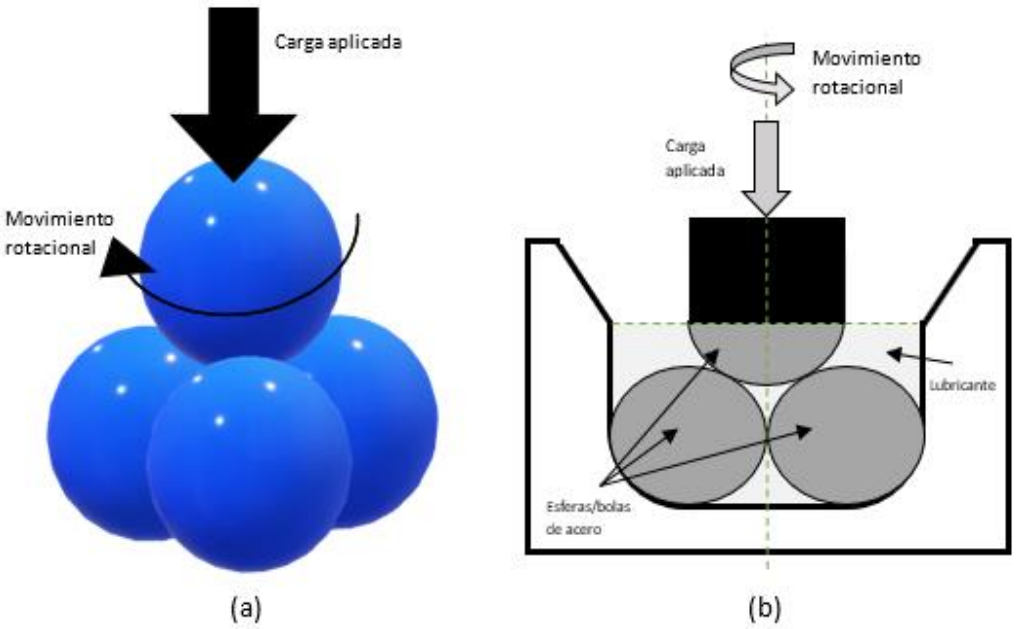

Figura 32 Método de las cuatro bolas (a) esquema general en 3D de la prueba, (b) ejemplo en 2D de la prueba con lubricación [44]

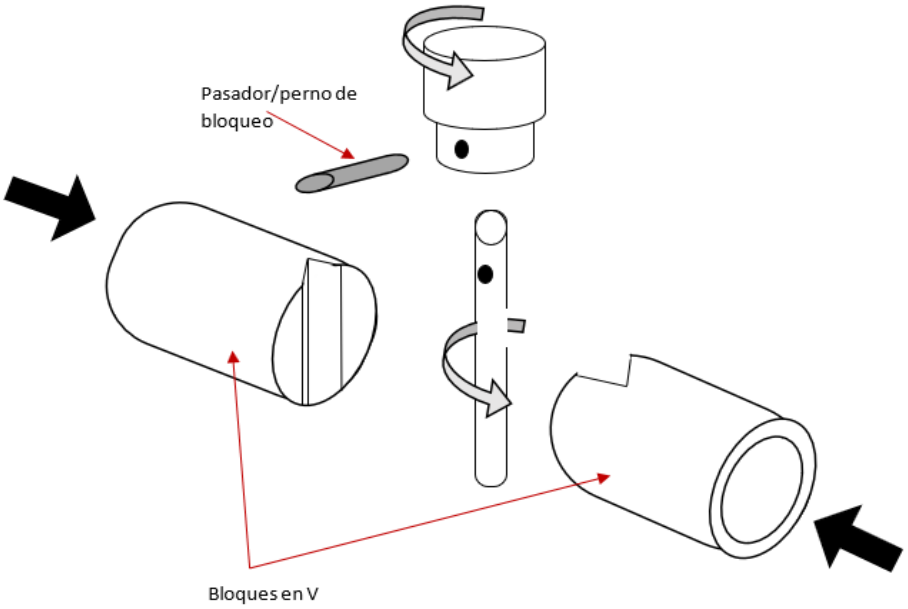

Figura 33 Prueba "Falex Pin and Vee Block" [45]

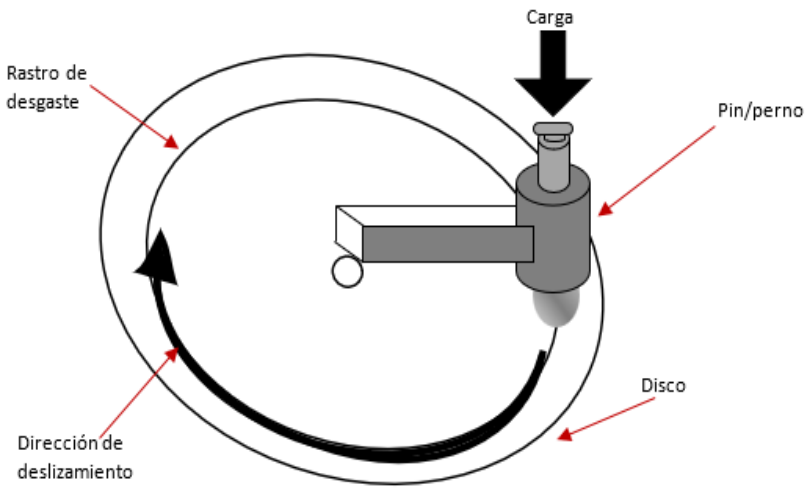

Figura 34 Prueba de pasador sobre disco "Pin on disk"[46]

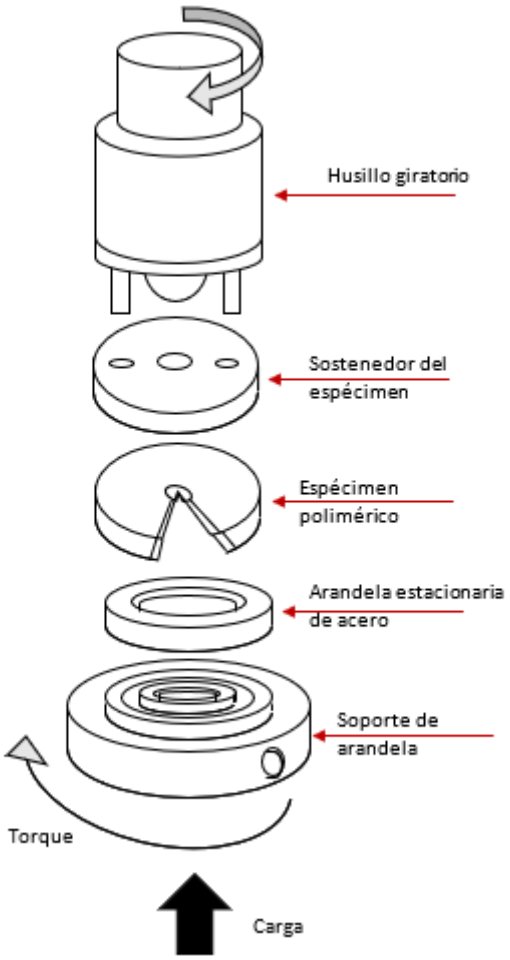

Figura 35 Maquina de prueba de arandela de empuje[47]

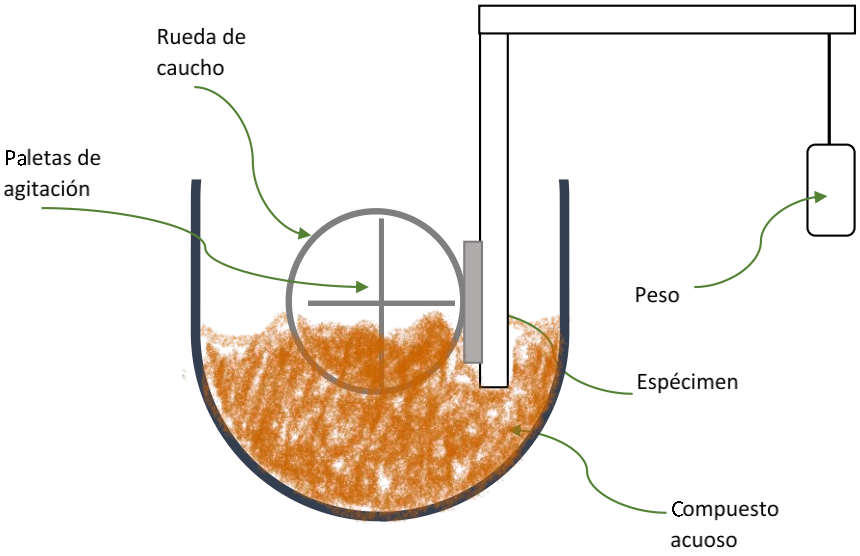

Figura 36 Prueba de abrasión multicuerpo con arena húmeda "wet sand/three body abrasion test"[48]

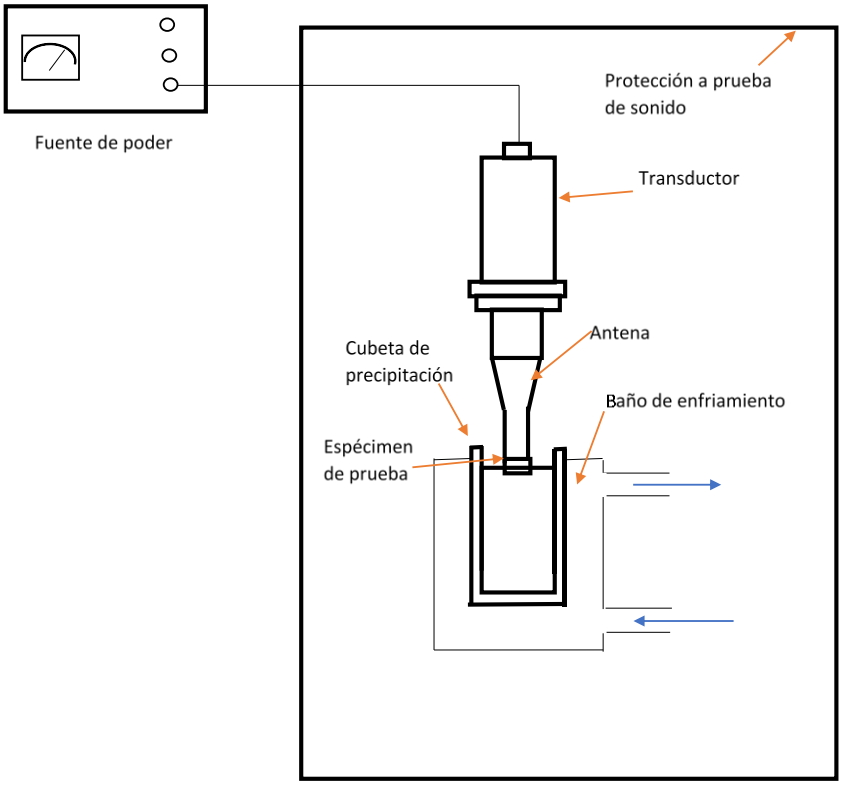

Figura 37 Prueba de desgaste por erosión por cavitación con vibración [49]

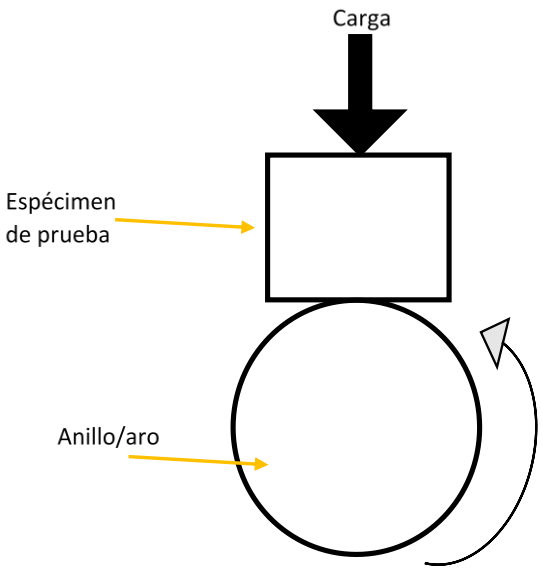

Figura 38 Prueba de bloque sobre anillo "Block-on-Ring wear test"[8].

Para cada prueba de acuerdo con el desgaste a evaluar los resultados son determinados por diferentes variables físicas. También se deben tener en cuenta otros factores como los ambientales, de preparación, entre otros para poder simular correctamente las pruebas. Por último, otro factor fundamental en las pruebas es la geometría de los dispositivos de prueba. En la siguiente tabla se ordenan los parámetros de acuerdo con diferentes categorías de pruebas.

Tabla 6 Parámetros presentes en las pruebas de desgaste[14]

Categoría	Subcategoría	Variables típicas	Características o variables suplementarias	Geometría de prueba
Deslizante	Desgaste abrasivo de 2 cuerpos	Cargas (presión), tipo de abrasivo, tipo de aglutinante, cuerpo de respaldo (contacto repetido o deslizamiento contra lubricante o refrigerante), velocidad de superficie, duración de contacto y temperatura.	Método de preparación de la superficie y caracterización del material.	Tambor abrasivo giratorio con pasador/perno plano con trayectoria en espiral, correa abrasiva con pasador plano sobre movimiento alternativo plano abrasivo, disco abrasivo transversal con pasador en trayectoria espiral, ruedas gemelas abrasivas giratorias.
	Desgaste abrasivo de multicuerpos	Cargas (presión), tipo de abrasivo, concentraciones, dureza del contra cuerpo, refrigerante o lubricante, contacto repetido o movimiento continuo contra una superficie abrasiva, velocidad de superficie, temperatura y duración de contacto.	Método de preparación de la superficie y caracterización del material	Arena seca alimentada entre una rueda de caucho y un plano, un plano reciprocante con un compuesto acuoso, bloque sobre anillo en rotación en un compuesto acuoso, molino de bolas.
	Desgaste adhesivo	Cargas (presión o tensión), velocidad relativa, geometría de contacto, tipo de movimiento (unidireccional u oscilatorio), duración, distancia o tiempo de deslizamiento y temperatura.	Método de preparación de la superficie, limpieza, acabado superficial, tipo de material o lubricante, método de aplicación del lubricante, humedad relativa	Bloque sobre anillo, perno sobre disco, zapata de doble fricción en disco giratorio, perno alternativo sobre plano, plano sobre plano, perno sujeto entre bloques en V, bola giratoria en res caras con 120° de separación.
	Desgaste *fretting*	Carga (tensión), geometría de contacto, amplitud y frecuencia de	Acabado superficial, humedad relativa	Perno sobre plano oscilante, esfera giratoria en un receptáculo,

		oscilación, numero de ciclos o tiempo y lubricante.		espécimen sujeto a los lados a tensión.
	Desgaste de pulido	Tamaño medio de pulido, líquido utilizado para suspensión, presión normal, tipo de cuerpos en movimiento, tiempo de exposición, temperatura, substrato.	Composición y descripción de la partícula. Método de introducción media, acabado superficial inicial de la muestra	Espécimen plano en vibración, espécimen plano en un orbital de pulido.
Impacto	De 2 cuerpos	Fuerza, velocidad, ángulo y duración o número de impactos, geometría de contacto, temperatura.	Caracterización del material, ambiente y humedad relativa, acabado superficial de los cuerpos	Martillo repetitivo en un plano.
	Vulneración, líquido y sólido	Velocidad promedio de impacto, forma de la partícula, ángulo de impacto, duración de exposición, temperatura de la prueba o del chorro.	Velocidad de partícula o distribución del flujo, densidad de partícula, forma, tamaño y composición de la partícula	Chorro de líquido disparado a un espécimen, chorro de gas con partículas, especímenes giratorios con partículas suspendidas, aparatos de partículas centrífugas.
	Erosión por cavitación	Geometría de la prueba, frecuencia del movimiento oscilatorio, temperatura del fluido, tipo de fluido y duración de exposición.	Caracterización del material	Un tipo de cuerno oscilante suspendido sobre la muestra en un fluido, fluido fluyendo a través de una boquilla sumergida dirigida a la muestra.
Rodante	Fatiga por contacto rodante	Carga (tensión de contacto elástica) rpm de los rodillos, duración de la prueba, temperatura.	Caracterización del lubricante o material, acabado superficial de los rodillos.	Disco sobre disco con contacto rodante con misma velocidad periférica, rodillos giratorios entre tres bolas.
	Deslizante rodante	Carga (tensión de contacto elástica) rpm de los rodillos, duración de la prueba, temperatura, porcentaje de deslizamiento.	Tipo de material o lubricante y acabado superficial de los rodillos.	Disco sobre disco con contacto rodante con diferente velocidad periférica

Técnicas de prevención, medición y protección contra el desgaste.

Como se ha visto, el desgaste es un problema que se tiene en cualquier sistema mecánico, por lo que las técnicas de prevención y protección son fundamentales para el buen funcionamiento del sistema. Para reducir el desgaste, lo más común es alterar las propiedades de la superficie de manera que esta sea inmune, hasta cierto grado, a los mecanismos de desgaste presentes. A continuación, se estudian las técnicas más utilizadas.

Procesos de endurecimiento por deformación plástica

Estos procesos consisten en aumentar la densidad de dislocaciones en el material volviendo más difícil el movimiento de ellas, provocando un aumento en la dureza y, como un efecto adicional, se aumenta la resistencia al desgaste. El endurecimiento por deformación se lleva a cabo mediante procesos como granallado, laminado o carga por impacto. Sin embargo, en aplicaciones de fuerte impacto, como un manto triturador, la superficie se endurece por deformación durante el uso. [50]

- Granallado

El granallado es el bombardeo de partículas abrasivas a alta velocidad (entre 65 y 110 *m/s*) que al impactar con la pieza tratada produce la remoción de los contaminantes de la superficie [14]. Además, esta técnica puede endurecer la superficie hasta a una profundidad de 0.5 *mm* [51]. Un efecto importante

del granallado es el aumento de rugosidad de la superficie, por lo que se necesita de un pulido para eliminar las asperezas, esto provoca una resistencia mejorada al desgaste de la superficie.

- Laminado y carga por impacto

Estos procesos de deformación plástica se utilizan ampliamente para el endurecimiento de la superficie. La profundidad de endurecimiento está limitada a 1 *mm* para el laminado, mientras que para la carga de impacto la profundidad puede ser de hasta 20 *mm*. En materiales como el hierro dúctil austemperizado ADI (Iron ductile austemperized por sus siglas en inglés) o acero austenítico de alto contenido de manganeso donde se tiene una transformación de austenita retenida a martensita, se obtiene un aumento en la resistencia al desgaste.

Procesos de recubrimiento

Estos procesos consisten en aplicar un nuevo material en la superficie para mejorar su dureza, resistencia a la corrosión y al desgaste. Los métodos más usados son los siguientes:

- Deposición química de vapor CVD (Chemical vapor deposition por sus siglas en inglés)

La deposición química de vapor es un proceso químico donde se transportan moléculas volátiles que se encuentran en la fase de vapor a un sustrato previamente calentado de manera que se provoque una adsorción y/o una reacción para que se forme una película sólida. El diagrama del proceso se muestra en la Figura 39. La deposición tiene lugar en el reactor que se encuentra a presión atmosférica, donde el sustrato se calienta a la temperatura requerida. El reactor puede tener un diseño de pared caliente o de pared fría. Durante la deposición, los gases precursores se suministran al reactor, a veces junto con un gas portador como hidrógeno o argón, donde se transportan al sustrato y posteriormente se descomponen y/o reaccionan para formar un recubrimiento sobre la superficie del sustrato. La descomposición suele ser inducida térmicamente [52]. Los gases pasan por una trampa fría y un depurador, para finalmente ser expulsados hacia la atmósfera.

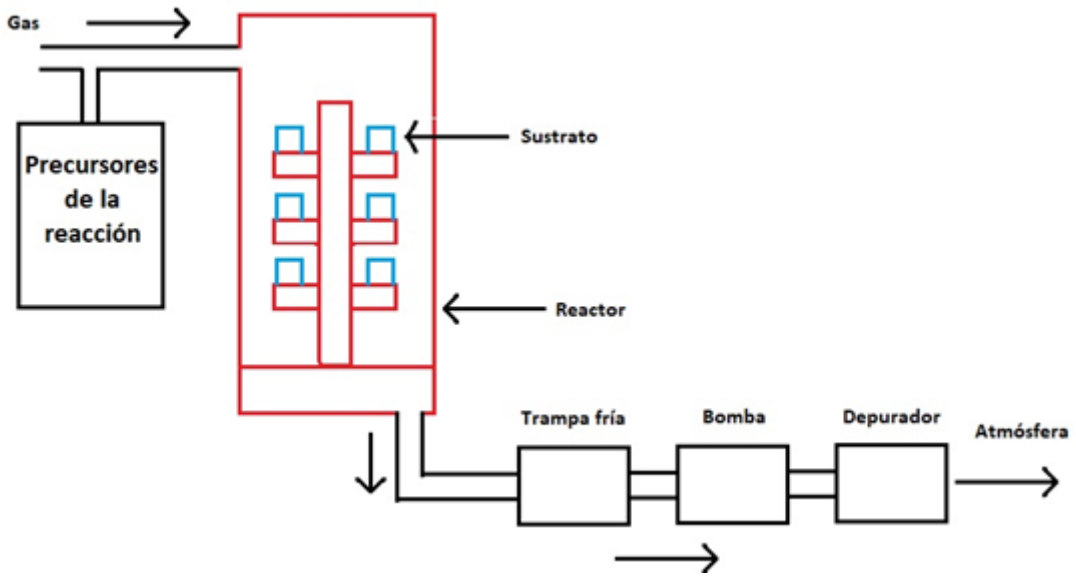

Figura 39 Diagrama esquemático del proceso de CVD.

Algunos de los recubrimientos que se pueden añadir mediante este método son los siguientes: Carburo de titanio (*TiC*), carburo de silicio (*SiC*), alúmina (Al_2O_3), carburo de tungsteno (*WC*), carburo de vanadio (*VC*), carburo de zircionio (*ZrC*), etc. Todos estos materiales destacan por su gran dureza y sus usos más comunes son como recubrimientos para materiales refractarios y herramientas de corte. Es importante recordar que la adhesión entre el sustrato y el recubrimiento debe de ser óptima. Si se tiene una pobre adhesión, se tendrá un material frágil que fallará muy rápido, igualmente, si se tiene una adhesión muy fuerte, se puede tener un rendimiento igualmente pobre si se depositan sobre sustratos inadecuados, por lo que se debe de considerar el componente en su totalidad, no sólo enfocarse en el recubrimiento.

- Deposición física de vapor PVD (Physical vapor deposition por sus siglas en inglés)

Para la deposición física de vapor, los materiales a depositar se vaporizan en una cámara a un vacío de 1,33 Pa a 0,013 mPa, se dejan condensar y se depositan sobre la superficie limpia del sustrato. La vaporización de la fuente de recubrimiento se puede realizar mediante uno de los siguientes procesos: (a) evaporación térmica, (b) pulverización catódica o (c) recubrimiento iónico. No es necesario calentar el material base en un proceso PVD [53].

Se han desarrollado muchos procesos PVD diferentes para aplicaciones que incluyen microelectrónica y óptica, pero los principales desarrollos en recubrimientos tribológicos se han producido desde la década de 1970, cuando la empresa Balzers presentó el primer servicio de recubrimiento de nitruro de titanio (*TiN*) comercial por PVD. En la Figura 40 se muestra un esquema del proceso. El sistema utiliza una fuente de electrones que opera casi en modo de arco eléctrico para crear un haz de electrones que pasa a través de la cámara de recubrimiento e inciden en el crisol. El efecto que se genera es aumentar la ionización en la cámara de recubrimiento. Las muestras se calientan mediante bombardeo de electrones antes del recubrimiento, una característica única del proceso Balzers. Los componentes se montan alrededor del perímetro de la cámara y se rotan durante el recubrimiento [53].

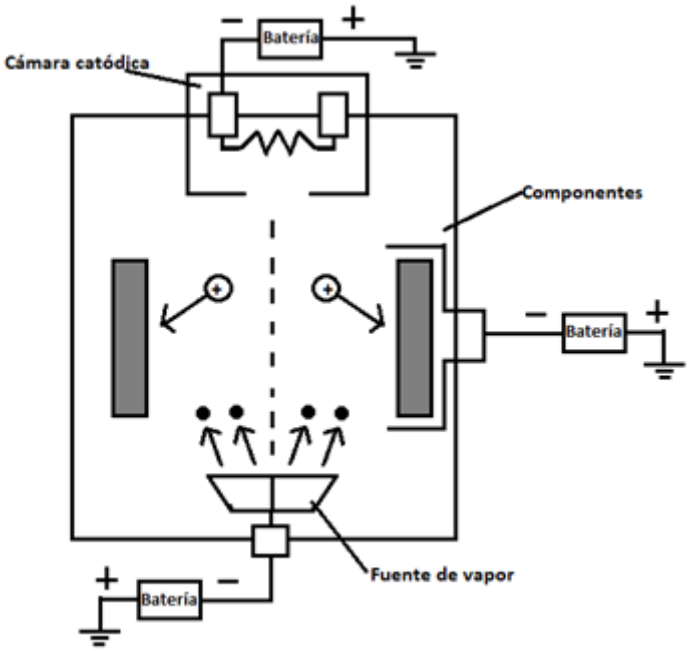

Figura 40 Diagrama esquemático del proceso de PVD de la empresa Balzers.

Algunos recubrimientos y sus propiedades que se pueden generar con este método se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7 Propiedades de algunos recubrimientos PVD comerciales.

Propiedades	TiN	TiAlN	TiCN	CrN
Temperatura de deposición [°C]	150-450	150-450	150-450	150-300
Espesor típico [μm]	1-10	1-10	1-10	1-50
Dureza de nanoidentación [GPa] (carga de 5mN; 2 μm de espesor)	22-30	24-32	28-35	12-22
Resistencia al desgaste abrasivo	Aceptable	Bueno	Bueno	Pobre
Resistencia al desgaste adhesivo	Aceptable	Bueno	Excelente	Pobre
Resistencia a la corrosión	Bueno	Excelente	Aceptable	Excelente

Procesos de proyección térmica

La proyección térmica es un grupo de procesos donde se proyectan partículas fundidas o semi-fundidas sobre un sustrato donde solidifican y se adhieren formando un recubrimiento protector. Los materiales son calentados mediante combustión o arco eléctrico y son acelerados por un gas comprimido. Estas partículas chocan en el sustrato y se enfrían generando una estructura lamelar, logrando que se forme un recubrimiento [51]. La clasificación de los procesos se puede ver en la Figura 41.

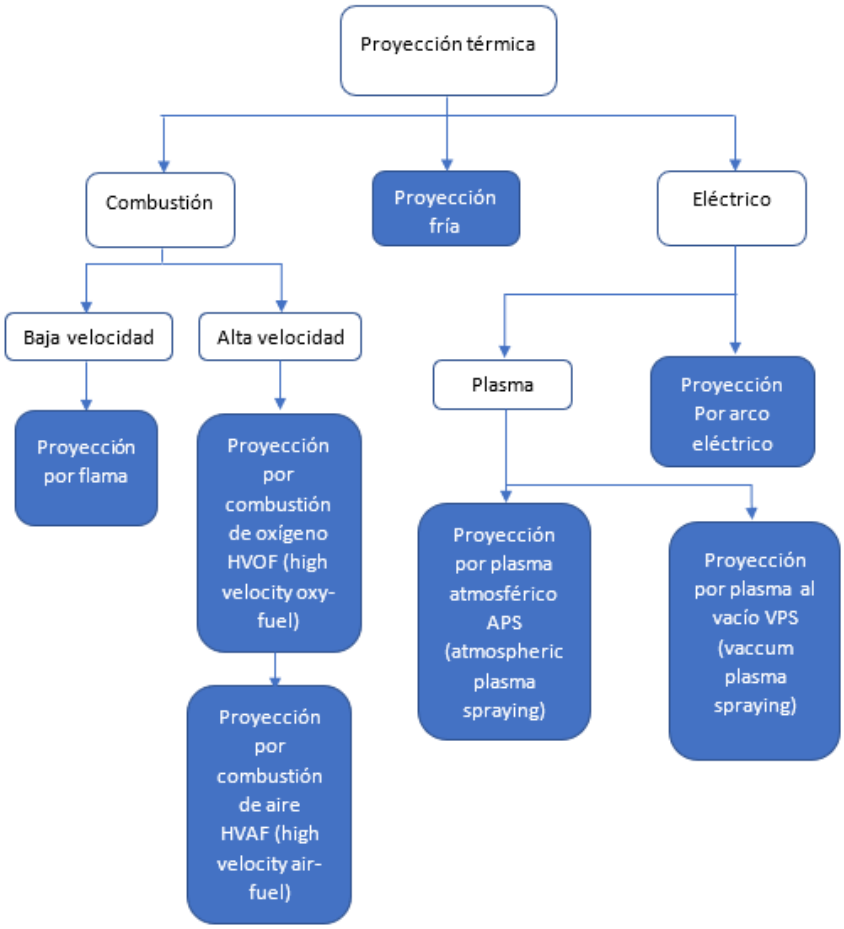

Figura 41 Tipos de procesos de proyección térmica. Los nombres de las técnicas más utilizadas se encuentran en las figuras azules.

Algunos materiales que comercialmente son proyectados térmicamente para aumentar su resistencia al desgaste son:

- Metales: Aceros, aceros inoxidables y aleaciones a base de níquel, cobre, cobalto y aluminio.
- Cerámicas: Alúmina (Al_2O_3), zirconia parcialmente estabilizada (ZrO_2), hidroxiapatita.
- Carburos: Carburo cementado (WC-Co), carburo de titanio (TiC).
- Polímeros: Polietileno, poliamida, polieteretercetona (PEEK).

Tendencias futuras en recubrimientos para la resistencia al desgaste

Las demandas cada vez mayores de componentes y herramientas resistentes al desgaste han llevado a un desarrollo constante de nuevos materiales de recubrimientos. Constantemente se prueban nuevos sistemas con mayor dureza, estabilidad química y menor coeficiente de fricción y los modelos teóricos predicen nuevas posibilidades de recubrimientos resistentes al desgaste que pueden superar en gran medida a los que se utilizan actualmente. Sin embargo, también se necesita una investigación para materiales que pueden mejorar la capacidad para depositar películas libres de defectos como macropartículas, porosidad, mala adherencia y/o agrietamiento debido a esfuerzos residuales excesivos [10].

Un ejemplo son los recubrimientos de carburos, nitruros y boruros. Normalmente muestran una dureza elevada y coeficientes de fricción relativamente bajos, sin embargo, no suelen ser adecuados

para operar donde las condiciones ambientales pueden inducir oxidación o corrosión. Una alternativa es agregar un tercer compuesto que ayude a la resistencia a la corrosión. El nitruro de titanio (TiN), por ejemplo, es un material muy conocido con una dureza de aproximadamente 23 GPa que se ha utilizado ampliamente para aplicaciones tribológicas [54]. Su dureza, y en algunos casos la resistencia a la corrosión puede mejorarse mediante la adición de un tercer elemento, como aluminio (TiAlN), carbono (TiCN) o zirconio ((TiZr)N). En el caso de la adición de aluminio al TiN, el aluminio sustituye al titanio en la red cristalina y a altas temperaturas en contacto con el oxígeno reacciona formando una capa pasiva de alúmina (Al_2O_3) que mejora la resistencia a la corrosión del recubrimiento.

Recubrimientos de nanocompuestos.

Las películas delgadas de nanocompuestos aumentan la dureza, la resistencia a la oxidación, el comportamiento de desgaste mejorado y otras propiedades relevantes para los recubrimientos que reducen el desgaste. Estos recubrimientos están compuestos de granos nanocristalinos de metales de transición de nitruros o carburos rodeados por una matriz dura amorfa. Estos materiales se deforman ante una carga mediante el deslizamiento de límites de grano, un proceso con el que se obtiene una mayor resistencia que en la deformación plástica. Para que ocurra este efecto los cristales microscópicos (cristalitos) deben de medir menos de 10 nm, la separación media de granos por la segunda fase debe permanecer por debajo de 0,5 nm, y las fases deben tener una miscibilidad mutua despreciable. Los recubrimientos que cumplen estos requisitos, por ejemplo, nc-TiN/α-Si_3N_4, presentan una alta dureza y excelentes propiedades de resistencia a la oxidación. Estos recubrimientos pueden usarse para aplicaciones que requieren alta presión de contacto y baja fricción. Todos los recubrimientos duros de nanocompuestos se depositan mediante técnicas asistidas por iones, la más importante es la PVD [54].

Referencias

1. GGB (2021) Tribología, El estudio de la interacción entre superficies en movimiento. https://www.ggbearings.com/es/tribou/tribologia. Accessed 29 Jan 2021
2. Barral Becerra RS, Cruz López P (2014) Prototipo de Tribómetro Anillo Sobre Bloque para Obtención de Curvas de Fricción
3. ASTM F2508 Standard Practice for Validation, Calibration, and Certification of Walkway Tribometers Using Reference Surfaces, ASTM International. https://www.astm.org/Standards/F2508.htm. Accessed 2 Feb 2021
4. ASTM International (2011) Las propiedades de resbalamiento. https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPMJ11/f1310_spmj11.html. Accessed 31 Jan 2021
5. Khan Academy La fricción y los planos inclinados
6. OLYMPUS SI Surface Roughness Measurement—Parameters. https://www.olympus-ims.com/es/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/. Accessed 31 Jan 2021
7. Vera Pérez F (2018) Desarrollo de un software para el cálculo y el análisis de parámetros de rugosidad
8. Davis JR (2001) Surface engineering for corrosion and wear resistance. ASM International
9. Bayer RJ (2004) Mechanical Wear Fundamentals and Testing, Revised and Expanded. CRC Press
10. Stachowiak GW (2005) Wear-Materials, Mechanisms and Practice. John Wiley & Sons
11. Andresen Eguiluz R, Bravo Bénard A, Ramírez Toledo MA, et al (2009) Formación de una capa tribológica en la aleación SAE-783. Ingenier mecáni tecnolog desarroll 3:
12. Rahman MS, Ding J, Beheshti A, et al (2019) Helium Tribology of Inconel 617 at Elevated Temperatures up to 950°C: Parametric Study. Nuclear Science and Engineering 193:. https://doi.org/10.1080/00295639.2019.1582315
13. Schouwenaars R (2004) Análisis de la deformación plástica durante el desgaste de cojinetes de deslizamiento
14. Chattopadhyay R (2001) Surface Wear. Analysis, Treatment, and Prevention. ASTM International
15. Alojali HM, Benyounis KY (2016) Advances in Tool wear in Turning Process. In: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Elsevier
16. Shitole PP, Gawande SH, Desale GR, Nandre BD (2015) Effect of Impacting Particle Kinetic Energy on Slurry Erosion Wear. Journal of Bio- and Tribo-Corrosion 1:. https://doi.org/10.1007/s40735-015-0028-6
17. ASTM International (2018) ASTM G56-18. Standard Test Method for Abrasiveness of Ink-Impregnated Fabric Printer Ribbons and Other Web Materials. https://www.astm.org/Standards/G56.htm. Accessed 6 Feb 2021
18. ASTM International (2018) ASTM G132-96. Standard Test Method for Pin Abrasion Testing. http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?G132-96(2018). Accessed 6 Feb 2021
19. ASTM International (2016) ASTM G119-09. Standard Guide for Determining Synergism Between Wear and Corrosion. . http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?G119. Accessed 6 Feb 2021
20. ASTM International (2016) ASTM G65-16e1. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?G65-16e1. Accessed 6 Feb 2021
21. ASTM International (1997) ASTM G81-97a. Standard Test Method for Jaw Crusher Gouging Abrasion Test. http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?G81. Accessed 6 Feb 2021
22. ASTM International (2020) ASTM G105-20. Standard Test Method for Conducting Wet Sand/Rubber Wheel Abrasion Tests. http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?G105-20. Accessed 6 Feb 2021
23. ASTM International (2016) ASTM G32. Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus. http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?G32-16. Accessed 6 Feb 2021
24. ASTM International (2017) ASTM G73. Standard Test Method for Liquid Impingement Erosion Using Rotating Apparatus. http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?G73. Accessed 6 Feb 2021
25. ASTM International (2015) ASTM G75. Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number). http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?G75-15. Accessed 6 Feb 2021

26. ASTM International (2018) ASTM G76-18. Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets. http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?G76-18. Accessed 6 Feb 2021
27. ASTM International (2016) ASTM D4170-16. Standard Test Method for Fretting Wear Protection by Lubricating Greases. http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D4170-16. Accessed 6 Feb 2021
28. ASTM International (2015) ASTM D2266-01(2015). Standard Test Method for Wear Preventive Characteristics of Lubricating Grease (Four-Ball Method). http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D2266-01(2015). Accessed 6 Feb 2021
29. ASTM International (2020) ASTM D2670-20. Standard Test Method for Measuring Wear Properties of Fluid Lubricants (Falex Pin and Vee Block Method). http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D2670-20. Accessed 6 Feb 2021
30. ASTM International (2019) ASTM D2981-94(2019). Standard Test Method for Wear Life of Solid Film Lubricants in Oscillating Motion. http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D2981-94(2019). Accessed 6 Feb 2021
31. ASTM International (2019) ASTM D3702-94(2019). Standard Test Method for Wear Rate and Coefficient of Friction of Materials in Self-Lubricated Rubbing Contact Using a Thrust Washer Testing Machine. ASTM D3702-94(2019). Standard Test Method for Wear Rate and Coefficient of Friction of Materials in Self-Lubricated Rubbing Contact Using a Thrust Washer Testing Machine. Accessed 6 Feb 2021
32. ASTM International (2017) ASTM D3704-96(2017). Standard Test Method for Wear Preventive Properties of Lubricating Greases Using the (Falex) Block on Ring Test Machine in Oscillating Motion. http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D3704-96(2017). Accessed 6 Feb 2021
33. ASTM International (2019) ASTM D5001-19e1,. Standard Test Method for Measurement of Lubricity of Aviation Turbine Fuels by the Ball-on-Cylinder Lubricity Evaluator (BOCLE). http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D5001-19e1. Accessed 6 Feb 2021
34. ASTM International (2017) ASTM G77-17. Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test. http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?G77-17. Accessed 6 Feb 2021
35. ASTM International (2017) ASTM G99-17. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?G99-17. Accessed 6 Feb 2021
36. ASTM International (2016) ASTM G119-09(2016). Standard Guide for Determining Synergism Between Wear and Corrosion. http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?G119-09(2016). Accessed 6 Feb 2021
37. ASTM International (2016) ASTM G133-05(2016). Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear. http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?G133-05(2016). Accessed 6 Feb 2021
38. ASTM International (2017) ASTM G137-97(2017). Standard Test Method for Ranking Resistance of Plastic Materials to Sliding Wear Using a Block-On-Ring Configuration. http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?G137-97(2017). Accessed 6 Feb 2021
39. ASTM International (2017) ASTM G98-17. Standard Test Method for Galling Resistance of Materials. http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?G98-17. Accessed 6 Feb 2021
40. ASTM International (2020) ASTM D2782-20. Standard Test Method for Measurement of Extreme-Pressure Properties of Lubricating Fluids (Timken Method). http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D2782-20. Accessed 6 Feb 2021
41. Institute pf Welding and Machining Friction wheel test ASTM G65-16 (dry sand/rubber wheel test)
42. Chua Abdullah MIH, Abdollah MF, Amiruddin H, et al (2014) Effect of hBN/Al2O3 Nanoparticle Additives on the Tribological Performance of Engine Oil. Jurnal Teknologi 66:. https://doi.org/10.11113/jt.v66.2685
43. (2019) Four Ball Tester. https://www.tribonet.org/wiki/four-ball-tester/. Accessed 6 Feb 2021
44. Falex Falex Pin & Vee Block. https://www.falex.com/product/falex-pin-vee-block/. Accessed 6 Feb 2021

45. Wood RJK, Ramkumar P, Wang L, et al (2005) Electrostatic monitoring of the effects of carbon black on lubricated steel/steel sliding contacts
46. MatWeb Coefficient of Friction Testing of Plastic. http://www.matweb.com/reference/coefficient-of-friction.aspx. Accessed 6 Feb 2021
47. Devarajaiah RM, Suresha B (2013) Role of organo-modified montmorillonite nanoparticles on wet sand abrasion of carbon fabric reinforced epoxy composites. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences 23:
48. Samir Chandra Roy (2015) Modeling and analysis of material behavior during cavitation erosion
49. Gertsberg G, Aghion E, Kaya AA, Eliezer D (2009) Advanced Production Process and Properties of Die Cast Magnesium Composites Based on AZ91D and SiC. Journal of Materials Engineering and Performance 18:. https://doi.org/10.1007/s11665-008-9306-5
50. CYM Materiales S. A. (2010) Introducción General al Granallado. https://cym.com.ar/intranet/Introduccion-general-proceso-granallado-cym-shot-blasting.pdf. Accessed 3 Feb 2021
51. Mellor BG (2006) Surface coatings for protection against wear. Woodhead Publishing, Inglaterra
52. Holleck H, Schier V (1995) Multilayer PVD coatings for wear protection. Surface and Coatings Technology 76–77:. https://doi.org/10.1016/0257-8972(95)02555-3
53. Bull SJ, Bhat DG, Staia MH (2003) Properties and performance of commercial TiCN coatings. In: Part I: Coating architecture and hardness modelling. Surf. Coat. Technol. pp 163–506
54. Patscheider J (2003) Nanocomposite Hard Coatings for Wear Protection. MRS Bulletin 28:. https://doi.org/10.1557/mrs2003.59