

# Capítulo I

## Introducción

### 1. Tribología.

#### 1.1 Introducción.

La palabra tribología deriva del griego “τριβος” (tribos) que significa “frotamiento”. La tribología es la ciencia y tecnología de los fenómenos que tienen lugar en la interfase de contacto entre dos sólidos, teniendo por objeto el estudio de las materias tales como la lubricación, fricción y desgaste de materiales.

Para tener una idea de la importancia de esta nueva ciencia baste decir que algunos expertos estiman que un tercio de nuestro consumo total de energía se pierde en el rozamiento (Williams 1994). En la mayoría de los casos el rozamiento es un problema para el ingeniero que diseña una máquina ya que su objetivo primordial es transmitir potencia con las menores pérdidas. Sin embargo, la existencia del rozamiento no debe considerarse algo exclusivamente negativo. Además de ejemplos tan obvios como la necesidad del mismo para caminar cómodamente y poder cambiar de dirección o detenernos, también los ingenieros hacen uso de él en ciertos dispositivos como pueden ser los embragues, los frenos, las correas, poleas y cintas transportadoras.

La tribología es una ciencia de carácter multidisciplinar, ya que abarca desde la ingeniería mecánica hasta la química, pasando por la ciencia de los materiales, la mecánica de fluidos, la transmisión del calor, etc... Por esta razón suele ser difícil encontrar tribólogos que posean una preparación adecuada en todos los campos que abarca esta nueva materia y la mayoría proceden de alguno de ellos habiéndose orientado posteriormente hacia la tribología.

## 1.2 Distintas disciplinas en el campo de la tribología.

Las disciplinas<sup>[1]</sup> objeto de estudio que podemos diferenciar dentro de la tribología son las siguientes:

– Mecánica de sólidos:

La mecánica de sólidos está centrada en las matemáticas, física del contacto (presiones, cargas) y las temperaturas de las superficies debidas al deslizamiento. Los investigadores presentan modelos para la fricción y el desgaste de sistemas mecánicos que están basados en mecanismos tribológicos muy simples.

– Mecánica de fluidos:

La mecánica de fluidos estudia el comportamiento de los lubricantes líquidos para distintas morfologías de superficies deslizantes. Este tipo de disciplina es la que más se esfuerza en modelizar lo que ocurre en la interfase que se desliza para los casos de películas finas relacionadas con la rugosidad de las superficies. También se ha estudiado la influencia de la temperatura, rugosidad y reología de la película fina.

– Ciencia de los materiales:

En ciencia de los materiales se estudian los mecanismos a nivel atómico y microescala de la degradación de la superficie o alteración durante el deslizamiento. En este campo los resultados de los estudios se muestran con microfotografías, espectros de energía eléctrica y de rayos X.

– Química:

En química se estudia la reactividad entre lubricantes y superficies. El mayor desconocimiento se centra en la química del contacto en la región del deslizamiento.

### 1.3 Desarrollo histórico<sup>[2]</sup>.

En la Antigua Mesopotamia y en Egipto ya se usaban dispositivos tribológicos, los egipcios utilizaban algún tipo de lubricante para transportar grandes piedras sobre rodillos.

Los antiguos chinos también desarrollaron carros de guerra cuyas ruedas disponían de cojinetes de bronce lubricados.

En la Grecia clásica se desarrollaron numerosos dispositivos mecánicos, algunos de los cuales disponían de potencia hidráulica. También usaban palancas, engranajes, poleas y lubricantes para transportar grandes piedras sobre rodillos. Es conocido que el torno procede de esta época.

En la Edad Media uno de los avances más interesantes fue el desarrollo del reloj mecánico, también se utilizaban ruedas hidráulicas y ejes de madera apoyados sobre cojinetes de piedra engrasados con sebo o manteca, aunque ya se conocían algunos cojinetes metálicos.

En el Renacimiento, Leonardo Da Vinci realizó escritos con estudios referentes a problemas de rozamiento, lubricación y desgaste. Estableció la proporcionalidad entre la fuerza de rozamiento y la carga normal, sin existir ninguna dependencia entre los tamaños de las superficies que están en contacto. Observó que los cuerpos se mueven con diferente dificultad y dedujo que se debía a que su rozamiento era diferente. Mediante experimentos dedujo que para superficies pulidas deslizándose una sobre otra, cada cuerpo tiene una resistencia de rozamiento igual a un cuarto de su peso. Leonardo diseñó diversos tipos de rodamientos de bolas, rodamientos cónicos, etc. En la *Figura 1.1* observamos los dibujos de rodamientos recogidos en el Códice de Madrid.

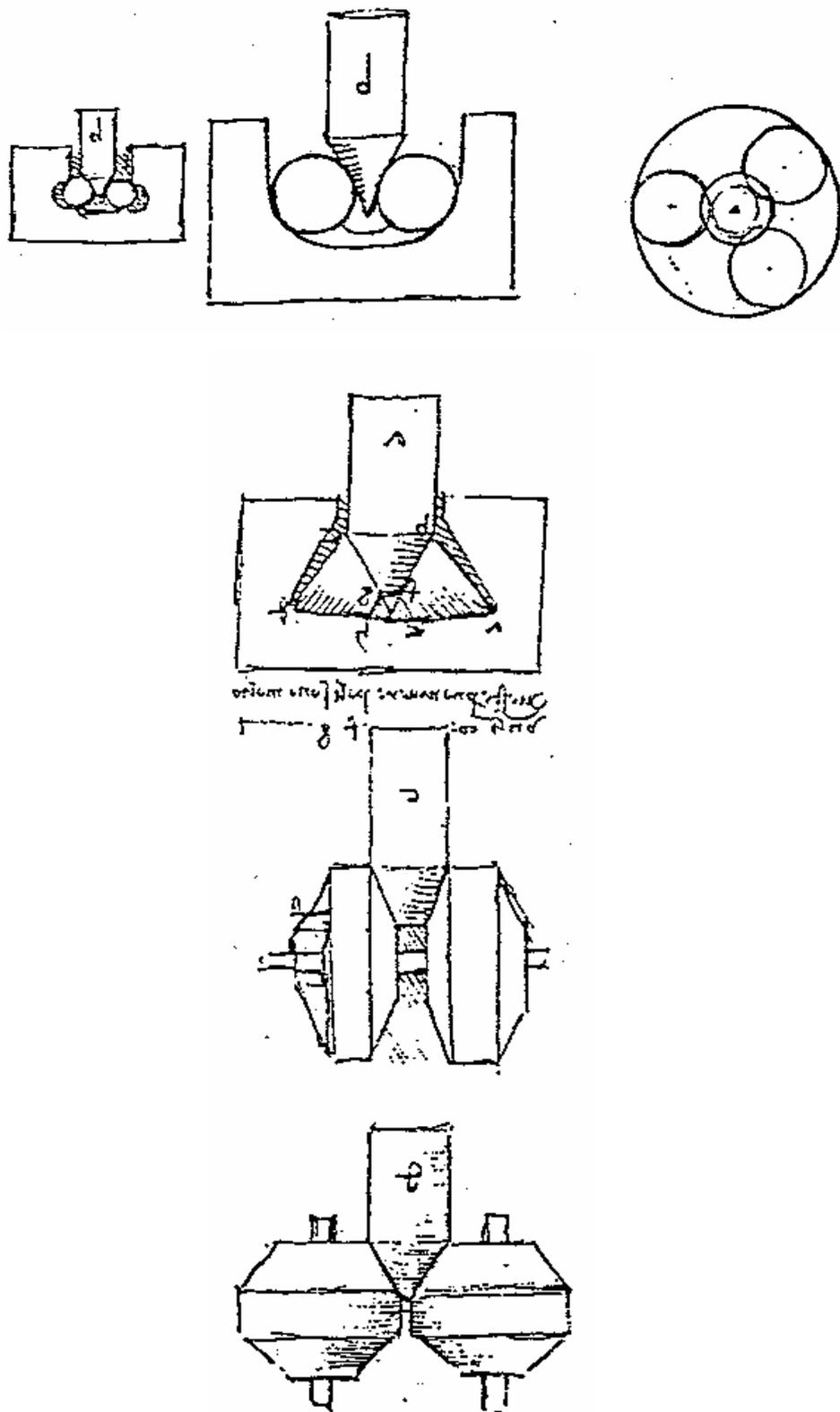


Figura 1.1. Dibujos Leonardo del Códice de Madrid. Rodamientos de bolas y rodamientos cónicos.



Casi dos siglos después Amontons, estableció que el rozamiento era proporcional a la presión mutua de las superficies de los cuerpos que están en contacto. Las leyes de fricción establecidas por Amontons son las siguientes:

- 1.- La fuerza de fricción es proporcional a la carga normal.
- 2.- La fuerza de fricción es independiente del área de contacto.
- 3.- La fuerza de fricción es independiente de la velocidad de deslizamiento.

En esa misma época, Newton estableció la hipótesis de que la resistencia de los fluidos dependía del gradiente de la velocidad, sentando las bases de la lubricación.

Coulomb realizó diversos trabajos experimentales que publicó en el año 1781, donde consideraba que el rozamiento se debía a las asperezas existentes entre las superficies en contacto. En este mismo siglo, Tabor junto a otros autores demostraron la teoría de la adhesión en el rozamiento.

La lubricación adquirió gran importancia a finales del siglo XIX puesto que reducía las pérdidas de rozamiento en máquinas, introduciéndose un nuevo concepto en tribología, “la lubricación hidrodinámica”.

Los estudios realizados por Hertz en 1882 sobre el contacto entre los cristales de dos lentes, analizó las tensiones existentes entre dos sólidos elásticos en contacto y obtuvo sus conocidas ecuaciones, válidas para el contacto de una esfera con una placa plana.

En los últimos años del pasado siglo aparecieron los primeros cojinetes de bolas o rodillos, usualmente denominados rodamientos, y el desarrollo de los transportes y la maquinaria en este siglo ha obligado a los fabricantes a mejorar constantemente su calidad permitiendo cada vez mayores cargas. A pesar de ello, la mayor parte de los motores utilizan todavía cojinetes de fricción lubricados hidrodinámicamente. En los primeros años del siglo apareció también la aleación conocida con el nombre de metal antifricción o metal blanco, compuesta de estaño, cobre, plomo y cinc, que mejoró notablemente el comportamiento de

este tipo de cojinetes de deslizamiento al recubrir los extremos de los ejes con una delgada capa de este material.

Sobre el año 1922 se comprobó que pequeñas cantidades de aceite entre dos superficies en contacto, donde intervienen capas muy delgadas de unas pocas moléculas de fluido, disminuían considerablemente el rozamiento entre ellas, este fenómeno Hardy lo denominó “lubricación límite”.

Ya en 1949, Ertel y Grubin estudiaron el efecto de la deformación elástica de los sólidos en contacto en condiciones de trabajo a altas presiones, explicando la delgadez de las capas moleculares de menor magnitud que con la teoría clásica, fenómeno denominado “lubricación elastohidrodinámica”.

Actualmente, en el campo de la tribología no cesan los trabajos sobre los estudios de los fenómenos que ocurren entre las superficies en contacto de materiales, puesto que se pueden conocer mejor gracias a los nuevos aparatos de medida como la microscopía electrónica.

#### **1.4 Nuevas tendencias en tribología<sup>[3]</sup>.**

Cuando se introducen nuevas aplicaciones, nuevos requerimientos para las máquinas ya existentes o nuevos materiales, las limitaciones de la experiencia pasada y los trabajos basados en suposiciones, influyen sobre el diseño más a menudo de lo que las empresas suelen admitir. La actual competitividad entre empresas a nivel internacional hace que se demanden procesos de fabricación optimizados y que se contengan los costes. Para ser líderes en su sector, las empresas deben conocer todos los detalles tanto de sus productos como de sus procesos de fabricación de forma más intensa que en el pasado. Los aspectos tribológicos se encuentran en lo más alto de la lista de huecos en la capacidad de conocimiento de las empresas. Es en este contexto donde se conoce a la tribología como la “Última frontera” en el diseño mecánico.

#### **1.4.1 Tendencias científicas.**

Los principales esfuerzos científicos de la tribología en la década pasada han ido enfocados a entender el flujo y los procesos de contacto en las escalas atómica, molecular y nanométrica. Además, nuevos instrumentos analíticos como el Microscopio de Fuerza Atómica (AFM) han sido aplicados en tribología. Estos métodos ofrecen además la posibilidad de clarificar los mecanismos de disipación de energía durante el deslizamiento, algo que en estos días aún no ha sido bien comprendido.

Una segunda tendencia es el creciente interés en la triboquímica, ya que el comportamiento de los aditivos en las capas fluidas es inadecuadamente comprendido por aquellos cuyo propósito es el desarrollo de nuevos aditivos. Las simulaciones moleculares dinámicas y los nuevos instrumentos analíticos para medidas químicas y físicas *in-situ* nos dan una llave para la moderna triboquímica.

#### **1.4.2 Tendencias en materiales.**

Continuamente se están desarrollando nuevos materiales (MMC, superaleaciones, compuestos de fibras, etc.), capas (capas de diamante, óxidos, etc.) y sus procesos de fabricación asociados. Estudiar las características tribológicas de los nuevos materiales, identificar las aplicaciones potenciales y desarrollar métodos de diseño han sido siempre actividades importantes para los tribólogos. En este contexto, el desarrollo de varios tipos de mapas de fricción, desgaste y deformación ha sido durante los últimos veinte años materia de interés.

#### **1.4.3 Tendencias en ingeniería.**

En las áreas de ingeniería, tecnología y diseño se pueden identificar tendencias conectadas con la tribología en ingeniería computacional, topografía superficial, propiedades superficiales, lubricación límite y análisis dinámicos.

#### **1.4.4 Otras tendencias.**

Otros aspectos que no son puramente técnicos tales como requerimientos medio ambientales, reducción de los tiempos de diseño, calidad y otros aspectos competitivos están

teniendo importantes implicaciones. De todos estos, el factor más importante en fabricación es el coste. La selección de ciertos materiales, métodos de fabricación y acabados superficiales puede ser demasiado costosa a efectos competitivos.

Como resumen de todos los apartados anteriores podríamos destacar que queda mucho trabajo por realizar para conseguir el correcto entendimiento de la tribología y su aplicación al diseño. Los tribólogos deberán trabajar en esta dirección y hacia otras tendencias, en lo que se conoce como la “última frontera en el campo del diseño mecánico”.

## 2. Fricción.

### 2.1 Introducción.

La fricción puede definirse como la resistencia al movimiento relativo entre dos cuerpos que están en contacto.

Normalmente, la fricción se representa mediante el denominado coeficiente de rozamiento  $\mu$  y expresa la pérdida gradual de energía cinética, donde parte de esta energía se disipa en forma de calor y otra parte interviene en los procesos de deformación, dando lugar al desgaste de las superficies que están en contacto.

Varios mecanismos actúan conjuntamente en la fricción predominando unos sobre otros dependiendo de las condiciones de deslizamiento.

### 2.2 Mecanismos de fricción.

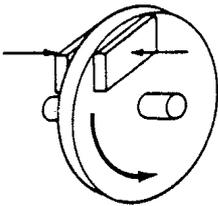
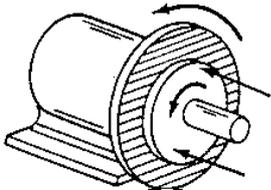
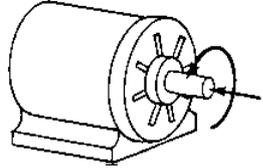
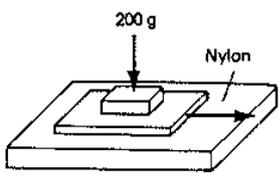
Si se observa la superficie de un sólido en el microscopio, se puede comprobar que no es completamente lisa, sino que presenta una superficie rugosa, donde se observan crestas y valles.

Cuando dos superficies se unen, el contacto entre ellas se da en varios puntos aislados y debido al esfuerzo normal, la presión de contacto es muy alta en esos puntos, en los cuales se producirán deformaciones plásticas en el material más blando, formándose soldaduras y quedando ambas superficies unidas por fuertes uniones. Para romper estas uniones y mantener el movimiento relativo entre los dos sólidos, es necesaria una fuerza cuya medida es la fricción.

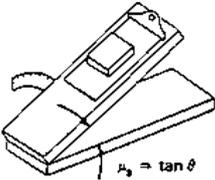
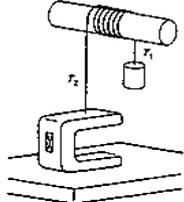
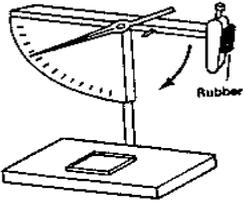
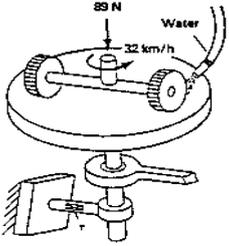
Al poner en contacto dos sólidos, para que deslice uno sobre el otro, hay que aplicar una fuerza horizontal para iniciar el deslizamiento, dicha fuerza se denomina “fricción estática”, sin embargo, para mantener el movimiento entre ellos, la fuerza necesaria es menor. Por tanto, el coeficiente de rozamiento estático es mayor que el coeficiente de rozamiento dinámico o cinético,  $\mu_e > \mu_d$ .

### 2.3 Ensayos de fricción normalizados en sólidos<sup>[4]</sup>.

A continuación se exponen los ensayos de fricción normalizados que se suelen realizar sobre sólidos.

Norma	Denominación	Par Tribológico (Parámetros medidos)	Configuración
B 460 (B-9 sobre metal en polvo).	Coefficiente de fricción y desgaste de materiales metálicos sinterizados sin lubricación.	Fricción de materiales contra metales. - ( $\mu$ -temperatura).	
B 461 (B-9 sobre metal en polvo).	Comportamiento frente a la fricción de materiales metálicos sinterizados con lubricación.	Fricción de materiales contra metales. - ( $\mu$ -ciclos). - ( $\mu$ -velocidad).	
B 526 (B-9 metal en polvo).	Coefficiente de fricción y desgaste de mateles sinterizados.	Fricción de materiales contra fundición gris. - ( $\mu$ y $\mu_e$ ).	
C 808 (C-5 sobre carbono y grafito).	Ensayos de fricción y de desgaste en cojinetes y juntas manufacturados con carbono y grafito.	Carbono frente a otros materiales. - ( $\mu$ y $\mu_e$ ).	Cualquier aparato.
D1894 (D-20 sobre plástico).	Coefficientes de fricción estático y dinámico de películas y hojas plásticas	Películas plásticas contra otros sólidos tenaces. - ( $\mu$ y $\mu_e$ ).	

Norma	Denominación	Par Tribológico (Parámetros medidos)	Configuración
D 2047 (D-21 sobre suelos pulidos).	Coefficiente de fricción de suelos con superficies pulidas medido con la máquina "James".	Materiales para suelos contra suela y tacones de zapatos. - ( $\mu$ y $\mu_e$ ).	
D 2394 (D-7 sobre madera).	Ensayos de madera en servicio y suelos de base de madera.	Madera contra suela de acero. - ( $\mu$ y $\mu_e$ ).	
D 2714 (D-2 con lubricantes).	Calibración y operacional con la máquina de fricción y desgaste Alpha modelo LFW-1.	Películas o sólidos de plástico contra otros sólidos. - ( $\mu$ y $\mu_e$ ).	
D 3028 (D-20 sobre plásticos).	Coefficiente de fricción de plásticos y de películas.	Películas o sólidos de plástico contra otros sólidos. - ( $\mu$ y $\mu_e$ ).	
D 3108 (D-13 sobre tejidos).	Coefficiente de fricción de plásticos y películas.	Hilos textiles contra sólidos. - ( $\mu$ ).	

Norma	Denominación	Par Tribológico (Parámetros medidos)	Configuración
D 3248 (D-20 sobre plásticos).	Coefficiente de fricción estático de sólidos corrugados y fibrosos (metodos del plano inclinado).	Contra él mismo. - ( $\mu_e$ ).	
D 3334 (D-13 sobre tejidos).	Ensayos de lanas de poliolefinas.	Contra él mismo. - ( $\mu_e$ ).	
D 3412 (D-13 sobre tejidos).	Coefficiente de fricción hilo contra hilo.	Filamentos e hilados contra ellos mismos. - ( $\mu$ y $\mu_e$ ).	
D 4103 (D-21 sobre pulidos).	Preparación de superficies para el coeficiente de fricción.	Vinilos y maderas.	Cualquier aparato
E 303 (E-17 sobre superficies que friccionan).	Medidas de las propiedades de fricción de las superficies usando el Péndulo Británico.	Gomas contra pavimentos.	
E 510 (E-17 sobre superficies que friccionan).	Medida de las propiedades friccionales de pavimentos y pavimentos pulidos utilizando un par de torsión.	Gomas contra pavimentos.	

Norma	Denominación	Par Tribológico (Parámetros medidos)	Configuración
F 489 (F-13 sobre calzado).	Coefficiente de fricción estático de suelas y tacones medido mediante la máquina de " James "	Cuero y gomas conte distintos tipos de suelo y superficies. - ( $\mu_e$ ).	
F 609.	Ensayo para obtener la resistencia estática de deslizamiento.	Materiales utilizados en calzados contra distintas superficies.	
F 732 (F-4 material médico o quirúrgico).	Ensayo de fricción y desgaste de materiales poliméricos.	Materiales para juntas humanas. - ( $\mu$ ).	

## 2.4 Fricción en metales<sup>[5]</sup>.

### 2.4.1 Limpieza de materiales en alto vacío.

Si las superficies de los metales se limpian en alto vacío y se ponen en contacto, se observa normalmente una fuerte adhesión. No es necesario que las superficies estén totalmente limpias para que se produzca adhesión, simplemente calentándolas en vacío es a menudo suficiente. El coeficiente de fricción en estas condiciones tiene un alto valor, generalmente de dos a diez o incluso más, y se produce un fuerte ataque cuando se intenta el deslizamiento. Los fuertes enlaces metálicos de la interfase, cuando se separan los materiales, hacen que los metales se transfieran de un cuerpo a otro. Cuando tenemos presente contaminación en la interfase, el crecimiento de la unión está limitado sólo por la ductilidad de las asperezas de la unión. El coeficiente de la unión es entonces muy alto. La fricción de deslizamiento bajo condiciones de vacío ultra-altas se da en algunos campos de la ingeniería, y se deben tener en cuenta en el diseño de los componentes estas medidas especiales. Los lubricantes sólidos y las finas y suaves capas metálicas pueden proporcionar una protección adecuada para estos casos.

### 2.4.2 Metales iguales en el aire.

En la mayoría de las aplicaciones prácticas, los metales se deslizan unos contra otros en el aire. El coeficiente de fricción es mucho más bajo que en vacío, y varía en un rango de 0,5 a 1,5 para deslizamientos no lubricados. Se debe recordar, que el coeficiente de fricción depende, algunas veces fuertemente, de la composición y microestructura de materiales y de las condiciones de medida.

El oro presenta, particularmente, un alto valor del coeficiente de fricción. Forma una capa no oxidada aunque los gases absorbidos estarán presentes en el aire y las uniones entre asperezas tienden a ser entonces fuertes. El oro es además dúctil, por lo que la unión puede crecer considerablemente. Ambos factores contribuyen a que se produzca una elevada fuerza de fricción, aunque no tan alta como en vacío.

El resto de los metales se oxidan en el aire, formando capas de óxido que tienen un espesor entre 1 y 10 nm. con unos pocos minutos de exposición de la superficie limpia. Estas capas de óxido desempeñan un papel crítico en determinados comportamientos de deslizamiento, desde la fricción entre superficies oxidadas o entre óxidos y metales desnudos, que en la mayoría de las veces es mayor que en superficies de metales sin óxido.

En la *Figura 2.1* se ilustra el efecto del oxígeno en la fricción por deslizamiento del hierro. En vacío, aparece una fuerte adhesión y ataque. La admisión de sólo una pequeña presión de oxígeno, permite el deslizamiento aunque con un valor elevado del coeficiente de fricción. Cuanto más oxígeno admita el sistema, el valor del coeficiente de fricción baja hasta que se alcance una medida normal de aire a presión ambiente.

El efecto de la capa de óxido en la disminución de la fricción puede ser negativo en cierto grado, si la capa se penetra durante el deslizamiento. La *figura 2.2* muestra un comportamiento común, en este caso para Cu.

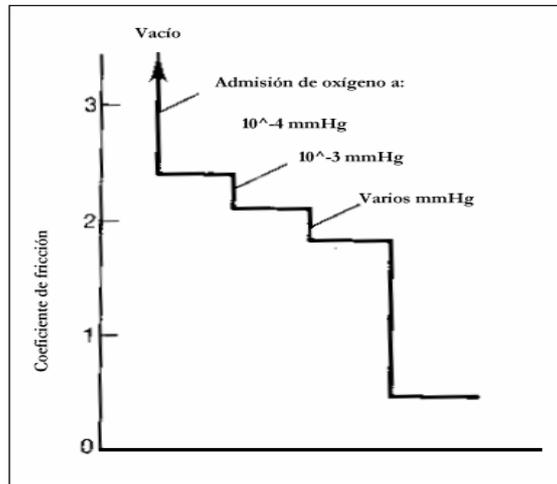


Figura 1.2. Efecto del oxígeno en la fricción para el hierro puro.

A bajas cargas, la capa de óxido separa adecuadamente las dos superficies metálicas y hay un pequeño y no verdadero contacto metálico. La resistencia eléctrica de la interfase es alta, y la huella formada durante el deslizamiento tiene un aspecto liso y pulimentado. El coeficiente de fricción es bajo, quizá porque el óxido actúa como una capa de baja resistencia cortadura, pero más probablemente porque su baja ductilidad limita el crecimiento de la unión.

Al aumentar la carga normal, se produce una transición a un valor muy elevado del coeficiente de fricción, en el caso del cobre se puede observar que pasa de 0,5 a un valor mayor de 1,5. La huella de deslizamiento es ahora considerable, la resistencia eléctrica de contacto cae a un bajo valor, y se deduce que el contacto metálico está ocurriendo entre las asperezas del cobre.

Esta forma de transición es común en otros metales también, aunque el cambio del coeficiente de fricción no es tan fuerte como en el cobre. En el aluminio, por ejemplo el coeficiente de fricción aumenta desde 0,8 a 1,2 cuando la capa de óxido se rompe. El cadmio no muestra mucho cambio en  $\mu$ , mientras que las medidas de resistencia eléctrica confirman que la capa de protección está presente para bajas cargas y se rompe para cargas elevadas. En todos estos casos, cuando las superficies se separan por una capa de óxido protectora, la fricción se mide entre las superficies oxidadas. A altas cargas, las películas superficiales pueden

deformarse y fracturarse permitiendo que aparezca un verdadero contacto entre los metales, la fricción a menudo (aunque no siempre) aumenta.

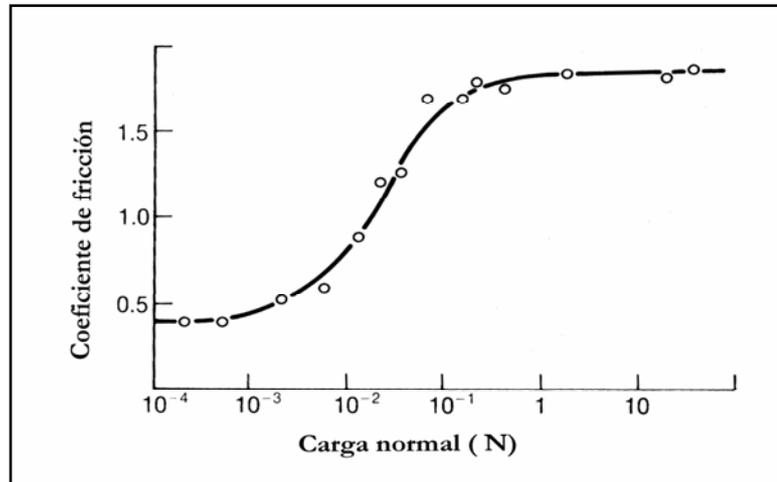


Figura 1.3. Variación del coeficiente de fricción con la carga normal aplicada, para el deslizamiento del cobre sobre cobre, al aire y sin lubricación.

Para algunos metales débiles y dúctiles, principalmente el estaño y el indio, hay contacto entre las superficies metálicas, incluso a bajas cargas y el coeficiente de fricción es alto y por lo tanto no cambia notablemente con la carga. Aquí la capa de óxido, aunque formada, es penetrada fácilmente hasta el material blando ofreciendo un pequeño soporte mecánico. En el otro extremo encontramos el cromo, que forma una delgada pero muy fuerte capa de óxido y manifiesta por encima de un amplio rango de carga un contacto no metálico (se determina por medidas de resistencia eléctrica) y un bajo y constante coeficiente de rozamiento.

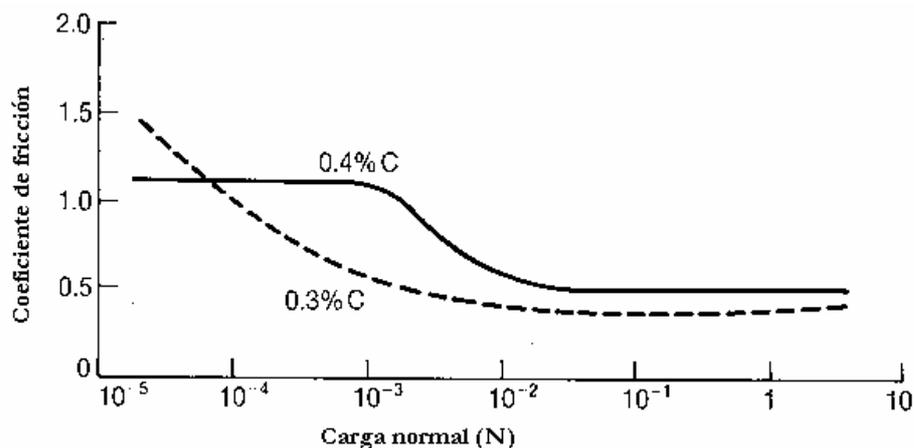
En resumen, la fricción de los metales puros en deslizamiento contra sí mismos en el aire, para contactos no lubricados, está la mayoría de las veces determinado por la presencia de óxidos superficiales. Si la capa de óxido no se rompe durante el deslizamiento, el óxido en sí mismo es el que determina el valor de  $\mu$ . Este valor es a menudo (pero no siempre) más bajo que a altas cargas, donde la capa de óxido es penetrada y aparece el contacto metálico entre asperezas. Bajo estas condiciones aparece una considerable superficie dañada y un rápido desgaste. En otros metales no aparece la transición, porque la capa de óxido protector aparece

durante un amplio rango de carga; mientras que en otros, el óxido es penetrado incluso a bajas presiones, con lo que el contacto es siempre metálico.

### 2.4.3 Metales disimilares y aleaciones

Las capas de óxidos son también muy importantes en la fricción de materiales disimilares y aleaciones en el aire. En general, el coeficiente de fricción para aleaciones, tiende a ser un poco más bajo que para sus componentes puros.

La fricción de deslizamiento de los aceros ha sido ampliamente estudiada, el valor del coeficiente de fricción varía con la composición y la estructura e incluso, a menudo depende de la carga. La *Figura 1.4* muestra un comportamiento típico.



*Figura 1.4. Variación del coeficiente de fricción con la carga normal, para el deslizamiento con aceros sin lubricación.*

La curva para un acero que contiene un 0,4 % de carbono, muestra una transición desde un valor de  $\mu$  relativamente bajo, a pequeñas cargas; hasta un valor aún más bajo a media que aumenta la carga. Esto sugiere que la transición resulta desde la estructura estratificada del óxido presente en el acero. La capa más externa es  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , mientras que debajo está una capa de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  y finalmente  $\text{FeO}$ , próximo al metal. De acuerdo a este modelo, la transición resulta por la penetración en la capa de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a altas cargas. Algunos aceros no muestran una transición tan pronunciada. En la *Figura 1.4* se muestra el comportamiento para un acero con bajo contenido en carbono.

Los efectos de pequeñas cantidades de otros componentes, pueden ser importantes en el comportamiento para la fricción, como resultado de la segregación de la superficie. El aluminio en aceros, por ejemplo, produce una segregación en la superficie y en vacío tiende a aumentar el coeficiente de fricción. La oxidación de las superficies, sin embargo, produce una capa de óxido de aluminio que provoca una reducción en la fricción. Los efectos de la segregación superficial son complejos, pero pueden proporcionar una serie de cambios en las propiedades de fricción de las aleaciones, a través de relativamente pequeñas modificaciones en su composición.

#### 2.4.4 Efecto de la temperatura.

Cuando la temperatura de un metal en deslizamiento se incrementa, aparecen distintos efectos: sus propiedades mecánicas cambian, su ratio de oxidación incrementa y tienen lugar transformaciones de fase. Todo esto influirá en el comportamiento a la fricción.

La *Figura 1.5* muestra las medidas de  $\mu$  en vacío para metales de tres estructuras comunes contra ellos mismos, e ilustra la influencia de la temperatura en la medida del coeficiente de fricción. Para los metales con estructura centrada en el cuerpo y cúbica centrada en las caras, se puede apreciar el fenómeno de transición en la fricción. En los metales con estructura cúbica centrada en las caras se les asocia un ratio de trabajo duro (el cual es alto a bajas temperaturas), mientras que los cúbicos centrado en el cuerpo la transición coinciden con la transición dúctil frágil.

Los metales de estructura hexagonal, no muestran un cambio en la fricción con la temperatura por encima de este rango, incluso sus propiedades mecánicas no se alteran significativamente, pero hay una clara correlación entre los metales puros dúctiles y sus valores del coeficiente de fricción. El titanio y el circonio son bastante dúctiles, parecidos a los metales con estructura cúbica centrada en el cuerpo en su comportamiento a fricción, mientras que el berilio y el cobalto, con su limitada ductilidad operando a bajas temperaturas muestran más bajos valores del coeficiente de fricción.

Cuando los metales son calentados al aire, su coeficiente de oxidación aumentará, así como su espesor, y posiblemente la naturaleza de las capas de óxido irán cambiando. Esto proporciona un segundo mecanismo a través del cual la fricción puede variar con la temperatura.

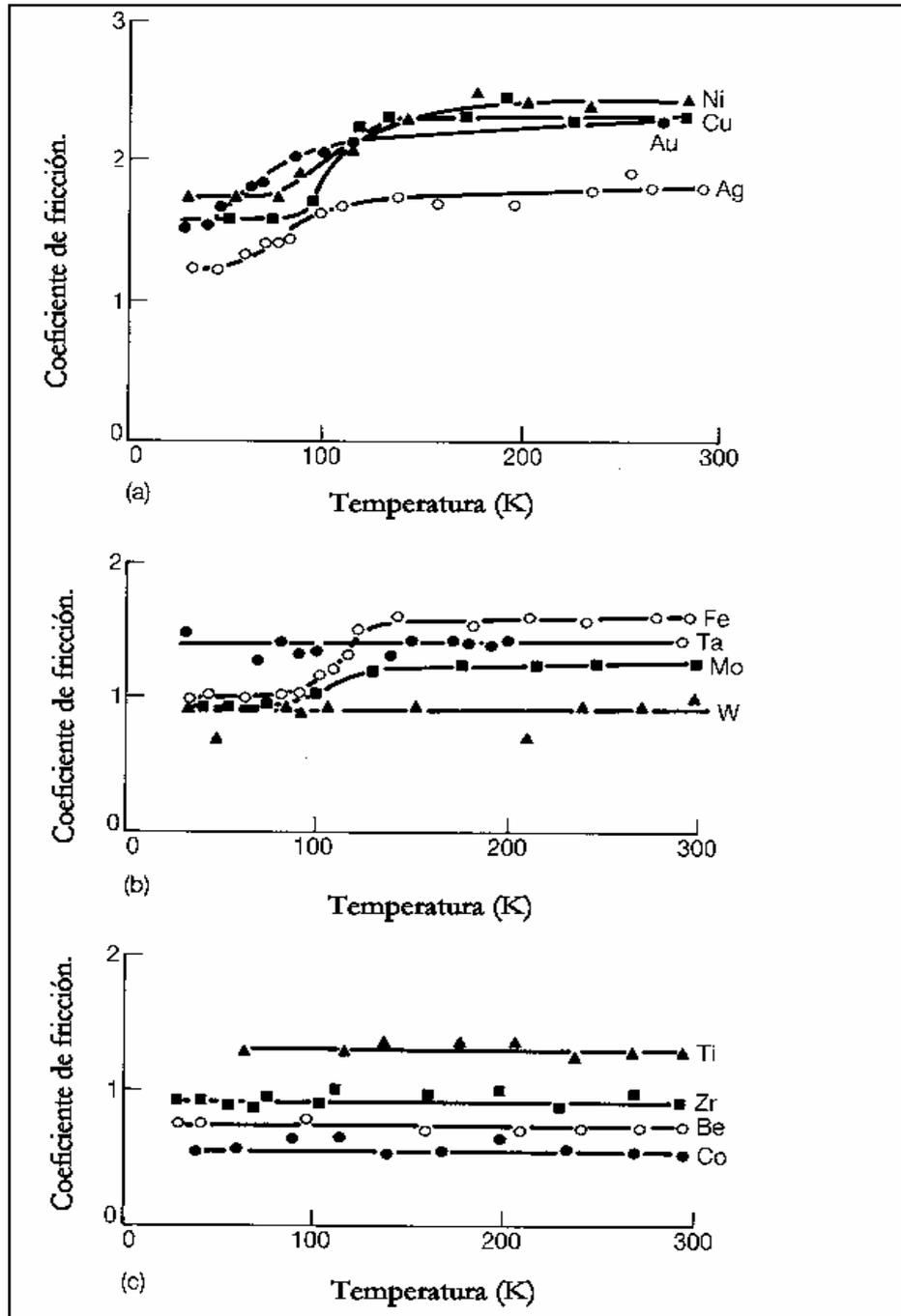


Figura 1.5. Variación del coeficiente de fricción con la temperatura para varios metales puros, en condiciones de vacío ultra altas.

Para el deslizamiento de un acero austenítico contra níquel puro, si se aumenta la temperatura, la ductilidad de los metales aumenta conduciéndolos a un incremento de  $\mu$  hasta los 750°C que se forma una delgada capa de óxido de níquel en la superficie del níquel y la fricción disminuye bruscamente. En frío, la capa de óxido continua separando las asperezas, y el bajo coeficiente de fricción se sigue manteniendo hasta muy baja temperatura. Un

comportamiento similar se observa comúnmente en los aceros. Una capa superficial de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  proporciona una fricción más baja que  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . El óxido que se forma viene determinado por la temperatura y por la composición de la aleación. Otra capa superficial se puede formar en las reacciones gas-sólido, y puede cambiar el comportamiento a fricción en determinados sistemas. El cloro, por ejemplo, reacciona fuertemente con muchos metales y la capa de cloruro resultante puede reducir la fricción.

Las transformaciones de fases, a través de su influencia en las propiedades mecánicas de los metales pueden dar lugar a un amplio cambio en la fricción. El efecto más drástico, es el debido a la fusión, cuando se acerca un metal a su punto de fusión, su resistencia cae rápidamente, y la difusión térmica y el fenómeno de “creep” llega a ser muy importante como resultado hay un incremento en la adhesión y la ductilidad en los puntos de contacto, dando lugar a un pronunciado incremento en la fricción. Cuando una de las superficies en contacto se llega a fundir, y por lo tanto pierde su resistencia a cortadura, los valores de fricción caen a valores muy bajos que vienen determinados por fuerzas viscosas en la capa del líquido. Esto ocurre en el deslizamiento de metales a velocidades muy altas ( $>100 \text{ m s}^{-1}$ , ver *Figura 1.4*) y también en el deslizamiento de la nieve o hielo. En estos casos, la disipación del trabajo de fricción, genera suficiente calor local para aumentar la temperatura en el punto de contacto hasta el punto de fusión y el deslizamiento les lleva a estar bajo condiciones de lubricación hidrodinámica. Para bajas velocidades de deslizamiento, o suficientemente baja temperatura ambiente, la película fundida no se forma y la fricción es controlada por la interacción de superficies sólidas.

La transformación de fases en estado sólido también influye en la fricción. Por ejemplo, el cobalto muestra una lenta transformación (temperatura de equilibrio  $417 \text{ }^\circ\text{C}$ ) desde su estructura hexagonal a baja temperatura con una ductilidad limitada, a una estructura cúbica centrada en las caras con una gran ductilidad. El coeficiente de fricción asociado a la estructura cúbica centrada en las caras es alto, mientras que para la estructura hexagonal es bajo. El cambio en el comportamiento de fricción se observa primero a temperatura ambiente, porque el calentamiento que produce la fricción aumenta la temperatura a nivel local.

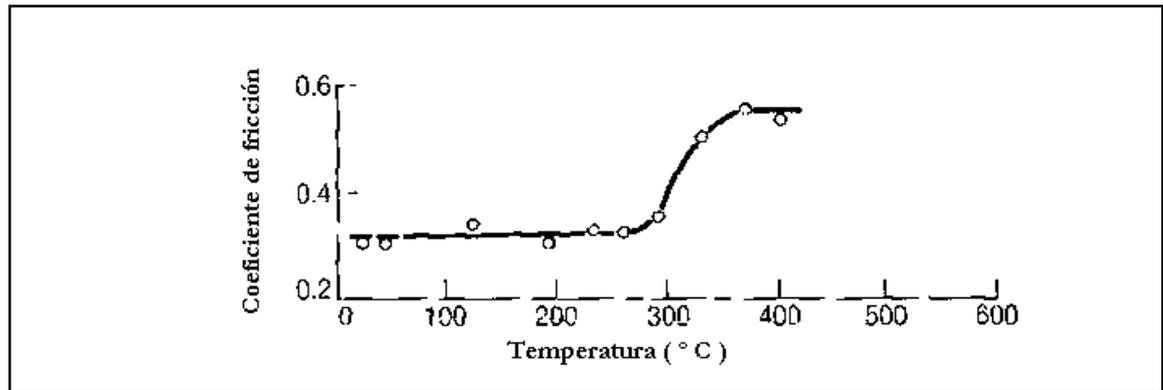


Figura 1.6. Variación del coeficiente de fricción con la temperatura (en vacío) para la aleación Cu<sub>3</sub>Au.

## 2.5 Fenómeno stick – slip.

La norma ASTM G40<sup>[4]</sup> define el fenómeno stick-slip como una oscilación de relajación asociada a un decrecimiento del coeficiente de fricción ( $\mu$ ), a medida que aumenta la velocidad de deslizamiento, tal y como se muestra en la *Figura 1.7*

Este fenómeno es observado bajo ciertas condiciones y en ciertos materiales, cuando se realizan ensayos de fricción donde se va registrando  $\mu$  frente al tiempo.

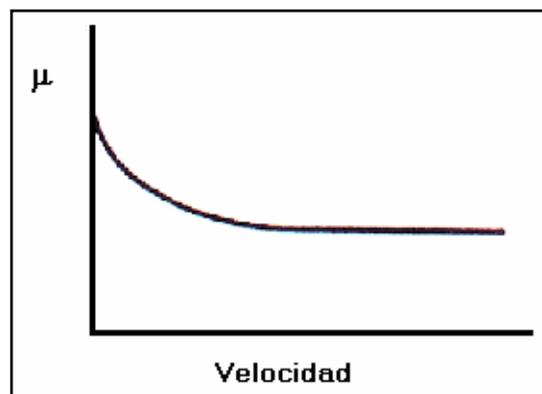
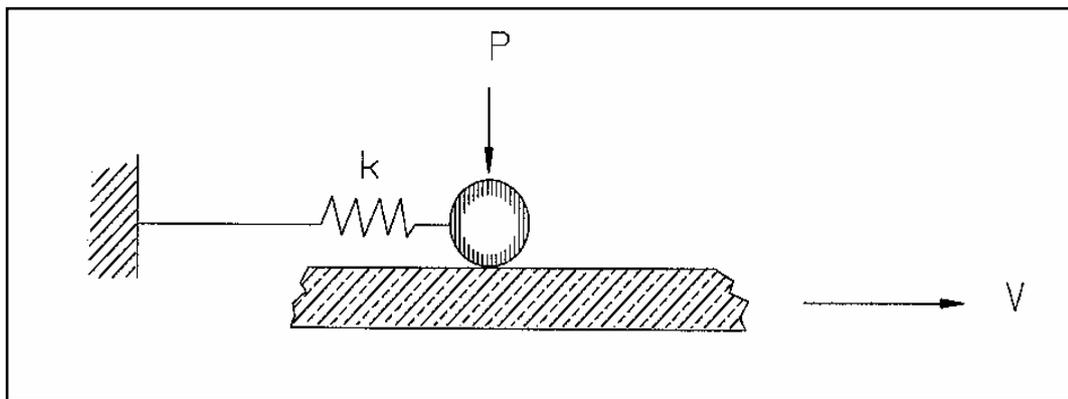


Figura 1.7. Fenómeno Stick-slip: variación de  $\mu$  con la velocidad.

La principal causa de este fenómeno, es la formación y destrucción de uniones interfaciales a escala microscópica de los sólidos en contacto. Hay un desacuerdo sobre los mecanismos que explican el stick-slip.

Algunos investigadores creen que ocurre cuando  $\mu$  dinámico es más alto que el  $\mu$  estático. Otros aseguran que ocurre cuando  $\mu$  frente a la velocidad tiene una pendiente negativa<sup>[6]</sup>. Hasta aquí es lo que se observa, pero realmente no es una explicación de los mecanismos que operan en el proceso.

Williams<sup>[7]</sup> lo explica mediante el modelo que aparece en la *Figura 1.8*.



*Fig. 1.8. Modelo de Williams para el fenómeno Stick-slip.*

En este modelo cuando la base empieza a moverse, la masa “*m*” se mueve con ella hasta que la energía elástica del muelle sobrepasa la fuerza de fricción, *stick*. En este punto, la masa llega a estar libre y se mueve con respecto a la base, *slip*. El sistema ejecuta un movimiento armónico simple. Esto implica una pérdida del coeficiente de fricción, al mismo tiempo, debido a la energía elástica del muelle y la energía disipada por fricción, la bola se detendrá con respecto a la base, cuando esto sucede las dos superficies se unen de forma que la curva de desplazamiento se hace lineal, *stick*. Llegado a este punto el ciclo se repite por sí solo.

Las características del movimiento en relación al tiempo se indican en la *Figura 1.9*.

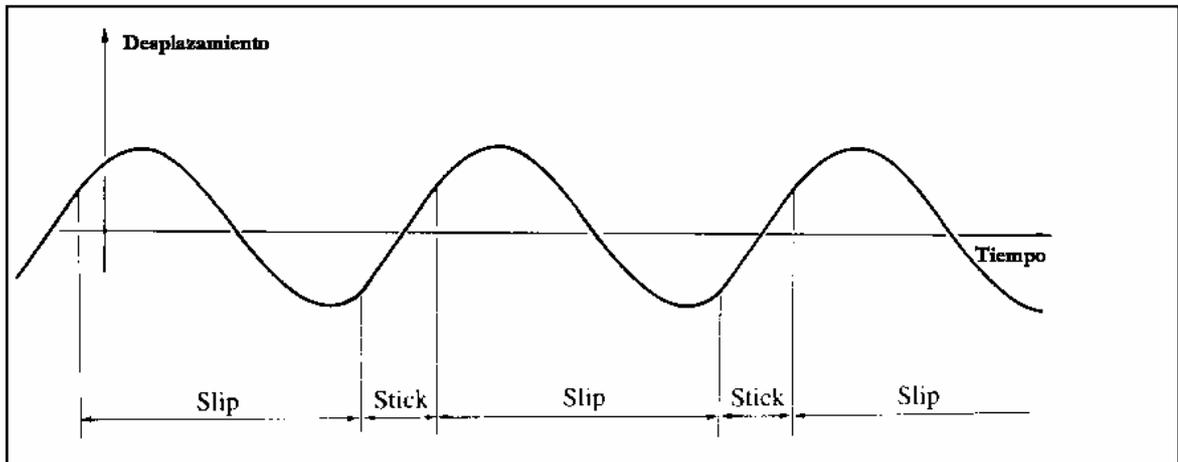


Figura 1.9. Stick-slip: características del movimiento.

Dos son las condiciones que deben concurrir para observar este fenómeno. Uno relacionado con la variación del coeficiente de fricción y el otro con la elasticidad del sistema en deslizamiento. Si el sistema fuera rígido, no se producirían oscilaciones en el coeficiente de fricción. Los contactos de dos sólidos exhiben comportamiento elástico o viscoelástico dependiendo del material.

Otras causas posibles que podrían afectar serían la naturaleza del contacto, topografía de la superficie, naturaleza química de las superficies, conformabilidad y presión de contacto.

El ruido en sistemas deslizantes es un típico ejemplo indicativo de este fenómeno. A veces ocurre que este efecto puede ser producido por el propio tribómetro. La utilización de sistemas con alta rigidez en el movimiento unido al componente que se desliza pueden eliminar este fenómeno. Hechos tan comunes como el chirrido de una bisagra mal engrasada o el sonido de un violín, están asociados con este fenómeno.

### 3. Daño superficial.

#### 3.1 Introducción<sup>[4]</sup>.

El daño superficial se define como el cambio topográfico o microestructural, o ambos, en una capa superficial del material. El daño superficial surge en la superficie de los materiales sometidos a contactos.

Las micrografías juegan un papel importante en el análisis del daño, deterioro o desgaste superficial, pudiendo hablarse de “tribografía” como la descripción micrográfica de las modificaciones topográficas y estructurales en los tribocontactos.

El diagnóstico superficial en relación con los mecanismos y procesos que causan el daño, y la relación de esos mecanismos con la geometría, las propiedades del material y otras características del tribosistema es una metodología de uso creciente para la más profunda comprensión de las variables tribológicas. El objetivo final de los trabajos tribográficos es disponer de mejores tribosistemas.

Frecuentemente, el daño superficial está generado por diferentes micromecanismos, que actúan en etapas consecutivas, alterando la superficie. El daño observado es el efecto acumulado, a macroescala, de dichos micromecanismos.

#### 3.2 Tipos de daño superficial.

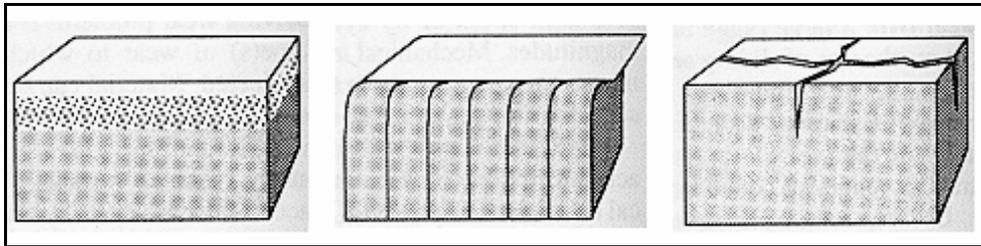
En un principio, un tribosistema puede presentar un único tipo de daño, pero en general, la estructura es una combinación de dos o más tipos. El examen y la interpretación pueden ser bastante complejos, pero es conveniente una clasificación de tipos ideales de daño superficial, como se presenta a continuación.

##### 3.2.1 Daño superficial con cambio de material.

- **Cambios estructurales:** Daño por cambios estructurales como puede ser el envejecimiento, templado, transformación de fases, recristalización, etc. Ver *Figura 1.10 (a)*.

- **Deformación plástica:** Daño caracterizado por deformaciones residuales en la capa superficial, de carácter local o generalizado. El caso extremo se presenta en un cambio en la forma. Ver *Figura 1.10 (b)*.

- **Agrietado superficial:** Daño causado por excesivas tensiones locales de contacto o por variaciones cíclicas de tensiones generadas mecánica o térmicamente. Las tensiones de origen mecánico pueden provocar una densa estructura de fisuras paralelas mientras que las tensiones térmicas cíclicas generan una red de fisuras. Ver *Figura 1.10 (c)*.



*Fig.1.10 (a).*

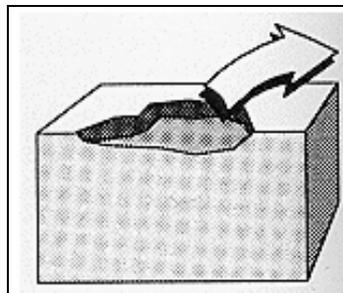
*Fig. 1.10 (b)*

*Fig.1.10 (c).*

*Figura 31. Daño superficial con cambio de material.*

### 3.2.2 Daño superficial con pérdida de material: Desgaste.

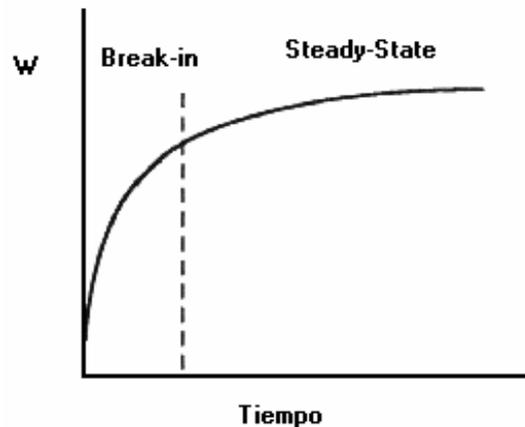
La pérdida de material de la superficie genera partículas de desgaste de varios tamaños y formas. Los elementos fundamentales en el proceso de arrastre del material pueden ser fractura por cizalla, fractura frágil, por fatiga, extrusión, disolución química, difusión, etc.



*Figura 1.11. Daño superficial con pérdida de material.*

### 3.2.3 Daño superficial con ganancia de material.

Se produce por transferencia de material de una superficie a otra.



Gráfica 1.1. Incremento de la transferencia de material respecto al tiempo

- **Corrosión:** Degradación del material por reacciones químicas con elementos ambientales o de la superficie opuesta.

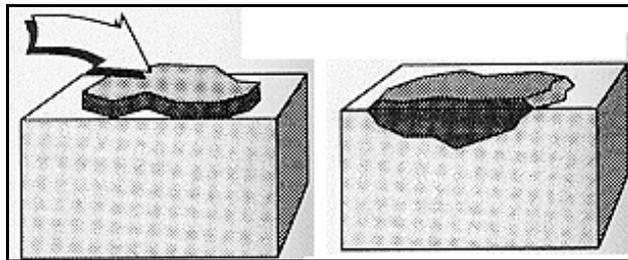


Figura 1.12.. Daño superficial con ganancia de material.

### 3.3 Interacción entre varios tipos de daño superficial.

El hecho de que el daño observado en una superficie sea una combinación de dos o más tipos ideales de daño indica que varios mecanismos han actuado simultáneamente.

Un ejemplo de la sinergia e interacción de los mecanismos de actuación es la corrosión y el desgaste que tienen lugar en la erosión a alta temperatura, siendo la capa oxidada más propensa al desgaste al descubrirse la superficie metálica a la atmósfera.

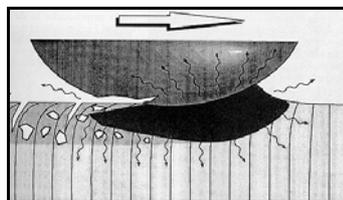
Sin embargo, ocasionalmente los efectos combinados pueden traducirse en una reducción de los efectos individuales, un ejemplo es la supresión del desgaste adhesivo de metales en contacto con deslizamiento, por la formación de una capa de óxido. Esta capa reduce las fuerzas de adhesión entre los cuerpos en deslizamiento, lo que disminuye la probabilidad de fractura por cizalla de las superficies del metal. En casos favorables la fricción se reduce, y el desgaste adhesivo metálico es sustituido por un desgaste suave de la capa de óxido.

### 3.4 Diagnóstico del daño superficial.

#### 3.4.1 Propiedades de la capa superficial.

En las figuras anteriores se puede observar que, si bien el estudio superficial aporta mucha información, es necesario completar dicho estudio con un análisis microestructural de la sección transversal para obtener una visión completa. La estructura e incluso la composición de la capa de material dañado, frecuentemente es muy diferente de la del material virgen.

Debido al tribocontacto que se produce entre materiales se puede hablar de “capa activa”, y de “capa relajada” (postdesgastada). La primera hace referencia a la capa superficial con su composición, estructura, propiedades térmicas y propiedades mecánicas durante el contacto tribológico, mientras que la capa relajada es la misma capa con las propiedades alcanzadas una vez descargada y refrigerada hasta la temperatura ambiente, (ver *Figura 1.12*). Una parte importante de la “tribografía” es el estudio de la “capa relajada”, deducir su estado activo y desde él sacar conclusiones sobre el modo de fallo, la mejora del diseño, la selección de materiales y otros aspectos dependiendo del propósito de la investigación.



*Figura 1.12. Esquema de una acción tribomecánica generando una capa activa por transformación del material superficial original bajo la influencia de altas fuerzas normales y de cizalla y de la temperatura de fricción.*

### **3.4.2 Efectos del daño superficial.**

Cuando se diagnostica un daño superficial por examen tribográfico es importante estar atento al tipo de problema que el daño está causando, es decir, identificar qué tipo de daño genera el criterio de límite de vida. Los efectos de un cierto tipo de daño y la acción recomendada para reducir el problema varían considerablemente de un caso a otro. Para elementos consumibles por desgaste la única acción para llevar a cabo sería intentar reducir el mecanismo de desgaste dominante, mientras que no hay necesidad de preocuparse por las partículas transferidas.

Cuando las exigencias relativas a la topografía son elevadas, como es el caso de superficies de rodamientos o cilindros de impresión, los pequeños rasguños o arañazos, la transferencia de partículas o incluso las grietas superficiales pueden ir en detrimento de la función del sistema. Generalmente los problemas pueden dividirse en los siguientes grupos:

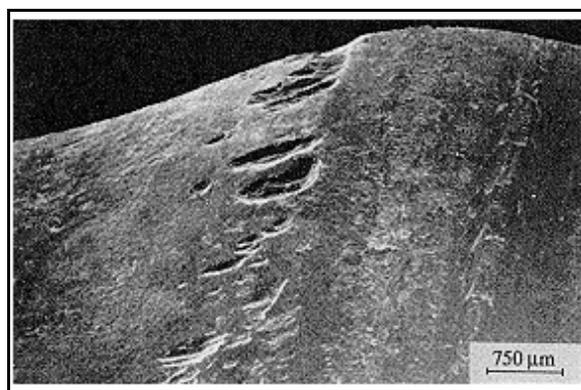
- Pérdidas de material que eventualmente consumen la parte desgastada (por ejemplo: dientes de rotopala excavadora, suelas de zapato).
- Pérdidas de material que deterioran la función (juego excesivo en rodamientos, corte romo en herramientas de corte).
- Carencias topográficas de la estructura o de la composición que deterioran la función (por ejemplo: rugosidad superficial de determinadas herramientas, de lentes ópticas).
- Las partículas de desgaste deterioran la función (por desgaste abrasivo, por contaminación de los productos finales como es el caso de procesos de la industria alimentaria, etc.).

También hay numerosos ejemplos de daño superficial que pueden ser altamente beneficiosos para la función. Durante el rodaje de muchas máquinas, por ejemplo, las tribosuperficies son alisadas por desgaste y deformación plástica, lo que proporciona una mejor conformidad, reduce la concentración de tensiones y realza la lubricación.

Otro mecanismo es la formación de sobrecapas protectoras del desgaste, por ejemplo en el filo de herramientas de corte o sobre rodillos de trabajo en caliente. Las capas de reducción de la fricción también frecuentemente se establecen en el tribosistema en deslizamiento seco entre polímeros y metales o en sistemas lubricados con aceites que contienen aditivos químicamente activos.

### 3.4.3 Importancia de los mecanismos de desgaste simultáneos.

Si se puede identificar más de un tipo de mecanismo de desgaste en una superficie, una persona inexperta que examine la superficie tiende a sobrestimar la importancia de una grieta grande antes que a un conjunto de grietas escasamente distribuidas sobre una superficie desgastada. Sin embargo, para los casos en que la pérdida de material genera un daño que limita el tiempo de vida, la primera tarea es reducir el desgaste. El desgaste, a su vez, está determinado por el volumen de partículas de desgaste producidas y la frecuencia con la que se producen. Si una gran huella cubre sólo una pequeña parte de la superficie, es el resultado de un suceso raro, incluso si se trata de una grieta profunda. De hecho, para la etapa estable con velocidad de desgaste constante, (“Steady-State wear”), la cantidad relativa en que un mecanismo contribuye al desgaste total es aproximadamente proporcional a la fracción de área ocupada por las huellas de ese mecanismo. Por ello, para combatir el desgaste de aparatos en los que operan mecanismos de desgaste antagónicos o rivales, los esfuerzos deberían focalizarse en el mecanismo que daña la mayor fracción de área superficial y no en el mecanismo que produce la mayor huella o raya individual. En la *Figura 1.13* se muestra un ejemplo de daño superficial causado por dos mecanismos de desgaste en competencia en el filete de un acoplamiento de una taladradora de percusión.



*Figura 1.13. Micrografía electrónica del filete de una taladradora de percusión.*

## 4. Desgaste.

### 4.1 Introducción.

Hay varias definiciones del término desgaste. Podríamos definir el desgaste como el daño en la superficie como resultado del movimiento relativo con respecto a otra sustancia. Un aspecto clave en esta definición es el daño que se produce, esto no significa que necesariamente se produzca una pérdida de material de la superficie. Sin embargo, cuando hay pérdida de material tenemos una forma de desgaste.

Otra forma de desgaste que se puede extraer de esta definición, es que se produzca un movimiento de material sin pérdida de masa. Un ejemplo de esto sería el cambio en la geometría o dimensión como resultado de una deformación plástica sufrida por el material (Por ejemplo: al trabajar con el martillo). Hay también una tercera forma, el daño en la superficie que no da lugar a una pérdida de masa, ni cambio dimensional. Por ejemplo, el desarrollo de una serie de grietas en la superficie. Las ventanas de los aviones, son ejemplos donde ésta es una adecuada definición de desgaste.

En otras definiciones de desgaste, particularmente en las antiguas, términos adicionales y frases deberían ir acompañando a la frase “como resultado del movimiento relativo con respecto a otra sustancia”. Ejemplos de esto sería “el movimiento relativo de dos cuerpos en contacto” y “deslizamiento entre dos superficies”. Estas definiciones están más limitadas que la anterior. Un punto en común, es que hay un movimiento relativo involucrado. Una superficie del cuerpo es dañada como resultado de un movimiento relativo, entre esta superficie y otra sustancia. Sin embargo, la “otra sustancia” no está limitada a cuerpos sólidos, ni su movimiento relativo se limita a deslizamiento, rodadura o impacto. Las superficies pueden desgastarse como resultado de las interacciones con fluidos, afectándose y propagándose a lo largo de la superficie.

Los tipos genéricos de desgaste más comunes son los reflejados en la *Figura 1.14*.

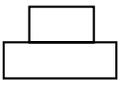
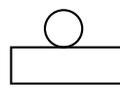
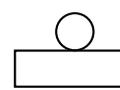
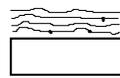
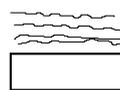
Elemento de interacción	Movimiento relativo	Mecanismos de desgaste
Sólido/Sólido  (Metales, polímeros, minerales, etc.)  con o sin lubricantes	 Deslizamiento	Desgaste por deslizamiento
	 Rodadura	Desgaste por rodadura.
	 Impacto	Desgaste por impacto.
	 Oscilación	Fretting.
Sólido/líquido	 Flujo	Cavitación.
Sólido/líquido + partículas	 Flujo	Erosión.

Figura 1.14. Tipos de desgaste.

El caso sólido/sólido ocurre cuando dos sólidos están en contacto y se desplazan uno contra otro. Esta primera situación se subdivide según la naturaleza del movimiento en:

- deslizamiento.
- rodadura.
- impacto.
- oscilación.

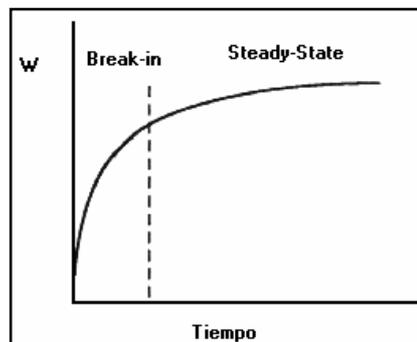
El tipo sólido/líquido ocurre cuando el desgaste es producido por un líquido con movimiento relativo a la superficie del sólido, este tipo de desgaste generalmente se denomina erosión o desgaste erosivo.

La tercera situación (sólido/líquido más partículas), la cual es denominada generalmente como desgaste abrasivo, ocurre cuando es producido por partículas duras. Erosión y desgaste abrasivo se pueden dividir a su vez en otras situaciones. Ejemplos de estos son cavitación, erosión por partículas y por ludimiento.

El desgaste<sup>[8]</sup> inicial de un tribosistema es a menudo diferente del comportamiento a lo largo del tiempo. Hay un par de razones para este hecho. Uno es que el desgaste y los procesos de desgaste modifican las superficies y esto lleva un tiempo antes de que la superficie o las condiciones se estabilicen. Otro es que la relativa mezcla de mecanismos que operan pueden variar como resultado de los cambios de las superficies y las interfases o porque algunos mecanismos como la fatiga requieren algún tiempo antes de llegar a ser importante.

Los cambios más importantes ocurren durante el periodo inicial denominado *break-in* o periodo de ruptura, el cual se representa en la *Figura 1.15*. Durante este periodo, pueden ocurrir muchos fenómenos como estabilización de óxidos, modificación de la rugosidad, formación de tribocapas y otros. Las tasas de desgaste son generalmente altas.

El otro periodo claramente definido es el llamado *steady-state* donde el desgaste permanece estabilizado o incluso con tasas ascendentes muy suaves conforme aumenta el tiempo. La estabilidad de este periodo depende del mecanismo de desgaste que opere.



*Figura 1.15. Periodos en el proceso de desgaste.*

## 4.2 Procedimientos de ensayo.

Para estudiar el desgaste por deslizamiento existen numerosos dispositivos experimentales. Estos dispositivos empleados en el laboratorio simulan las condiciones de trabajo en la práctica, con lo que se pretende obtener datos útiles sobre el coeficiente de fricción y grado de desgaste, así como estudiar el mecanismo por el que se produce el desgaste.

Hay que tener en cuenta que el control y la medida de las variables que pueden influir en el desgaste son muy importantes ya que, tanto la fricción como el desgaste dependen de las condiciones de deslizamiento.

Aunque la fricción y el desgaste no son equivalentes, son dos fenómenos que están relacionados, debido a la influencia mutua que ejerce uno sobre el otro. No obstante, durante el ensayo de desgaste es aconsejable ir registrando los valores de fricción ya que, un cambio brusco de ésta puede significar un cambio en el mecanismo de desgaste.

Cuando al realizar el ensayo de desgaste las superficies en contacto están lubricadas, este mecanismo se denomina “desgaste por deslizamiento con lubricación”. Sin embargo, en algunos de los ensayos en el laboratorio, si las superficies se deslizan en el aire sin que se añada ningún lubricante, se denomina entonces “desgaste por deslizamiento en seco”.

El desgaste depende de las condiciones de deslizamiento: de la velocidad, de la distancia recorrida, carga nominal, área de contacto, duración del ensayo...

La velocidad lineal afecta al grado de disipación de la energía que se genera por fricción y, por lo tanto, a la temperatura de la interfase que interviene en los procesos de deformación. A mayor velocidad lineal mayor temperatura.

Además de la carga nominal, el tiempo de ensayo y la distancia recorrida, hay otros factores a tener en cuenta en el proceso de desgaste.

La temperatura de ensayo tiene gran importancia por su influencia en las propiedades mecánicas de los materiales.

También influyen notablemente en el desgaste la composición de la atmósfera y la orientación del aparato de ensayo. La atmósfera contiene oxígeno y vapor de agua que influye en el grado y mecanismo de desgaste, mientras que la orientación del aparato de ensayo puede afectar al desgaste debido a que, el comportamiento es distinto si las partículas de desgaste están alejadas del área de contacto a sí quedan atrapadas entre ambas superficies.

#### 4.2.1 Fricción y desgaste por deslizamiento en seco<sup>[9]</sup>.

La fricción implica una disipación de energía debido a la conversión de energía mecánica en calor.

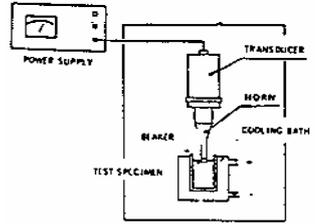
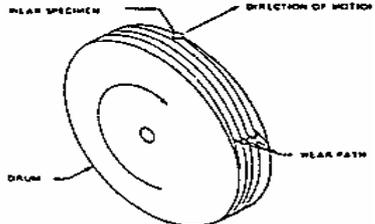
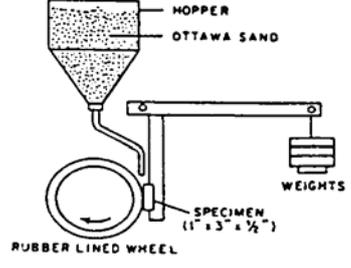
Supongamos un ensayo tribológico en el cual se ponen en contacto dos superficies. Si la interacción entre los dos materiales puestos en contacto se limita a distancias atómicas, la fricción se limita a un fenómeno superficial. Sin embargo, si las condiciones del ensayo llevan a una extensa deformación plástica, entonces las pérdidas de energía asociadas pueden ser tenidas en cuenta como algo más que pérdidas por fricción. En este caso la fricción implica más que simples fenómenos superficiales.

Excepto durante los procesos de desgaste severos, se puede proponer el siguiente mecanismo para el desgaste por deslizamiento: debido a la tensión acumulada, las heterogeneidades resultantes abandonan la superficie del material. Esto da lugar a una transferencia de material alrededor de la interfase posiblemente ayudada por la adhesión. Así se inicia un complejo proceso de mezcla, similar al que ocurre durante las primeras etapas del proceso de aleación mecánica descrito en la página. Las partículas de desgaste son normalmente generadas por el material mezclado mecánicamente (MMM), no directamente por el material base. Cada uno de estos pasos puede ser controlado, aunque va a depender del sistema tribológico empleado, por lo que no será posible obtener una ecuación de desgaste universal.

La composición y propiedades de los MMM pueden variar bruscamente para diferentes materiales y condiciones de ensayo. Esto da lugar a un amplio abanico de comportamientos que pueden ser entendidos en términos de durezas relativas y variaciones de éstas con el tiempo y la posición. Esto puede explicarse mediante una correlación existente en los ensayos tipo punzón sobre disco. Cuando la relación de dureza entre el disco y el pin es  $\geq 1,2$ , el deslizamiento es suave. Por contra, valores de esta relación  $\leq 0,8$  están asociados con deslizamientos ásperos.

### 4.3 Ensayos de desgaste normalizados<sup>10</sup>.

Norma ASTM	Denominación	Par Tribológico (Parámetros medidos)	Configuración
G-73	" Norma de ensayo de erosión por líquido "	-Determinación de la resistencia a la degradación de las propiedades ópticas de materiales para ventanas y la penetración, separación o destrucción de recubrimientos.	
G-75	" Método de ensayo de abrasividad de lodos de acuerdo con el número de Miller "	- Se utiliza para medir y clasificar la abrasividad de líquidos y sólidos bombeables.	
G-76	" Norma para la realización de ensayos de erosión por partículas sólidas empleando chorros de gas "	- Se ensaya la erosión por impactos repetidos. La norma fija las condiciones de ensayo y preparación de probetas.	
G-77	" Norma para la clasificación de materiales según su resistencia al desgaste por deslizamiento usando el ensayo de desgaste del bloque sobre anillo "	- Permite el ensayo de múltiples pares de materiales en rozamiento, así como lubricantes, atmósferas líquidas o gaseosas, simulando condiciones de servicio.	

Norma ASTM	Denominación	Par Tribológico (Parámetros medidos)	Configuración
G-32	" Métodos de ensayo de erosión por cavitación vibratoria "	- Determinación de la velocidad de erosión por cavitación producida en diferentes materiales.	
G-56	" Método de ensayo de la abrasividad de cintas de impresión impregnadas de tinta "	- Determina la cantidad de material aliminado de la esfera de acero. - El volumen desgastado se usa para adjudicar un coeficiente de desgaste a la cinta.	
G-65	" Norma para la realización de ensayos de abrasión con arena secarueda de goma "	- Clasificación de materiales por su resistencia al rayado por abrasión bajo condiciones especificadas.	

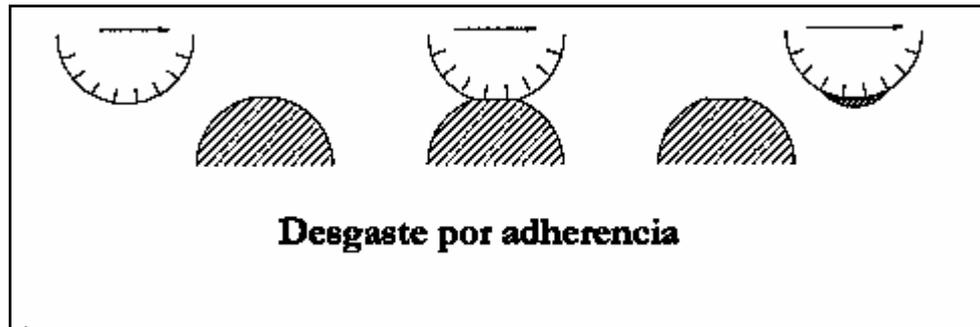
#### 4.4 Mecanismos de desgaste<sup>[7]</sup>.

Siempre que exista movimiento relativo entre dos sólidos que soportan una carga se produce desgaste en mayor o menor grado, dependiendo de la naturaleza del movimiento y de los diversos factores que intervienen en el proceso de deslizamiento. Veamos a continuación los diversos mecanismos que podemos encontrar.

##### 4.4.1 Desgaste por adherencia.

En el mecanismo de desgaste por adherencia, las interacciones del material juegan un importante papel. Si dos cuerpos sólidos son puestos en contacto, experimentarán en primer

lugar fuerzas de Van de Waals, que son denominadas de rango largo. A distancias de alrededor de 1 nm, entran en acción fuerzas superficiales de rango corto en las áreas de contacto real, cuyo tipo depende de la naturaleza de las superficies en contacto. Así, uniones adhesivas fuertes pueden formarse cuando la superficie de uniones crece y se eliminan los contaminantes superficiales.



*Figura 1.16. Desgaste por adherencia..*

Para que se produzca desgaste por adhesión, la fractura de las uniones cuando prosigue el movimiento relativo, debe producirse en zonas subsuperficiales de uno o ambos materiales, como se indica esquemáticamente en la *Figura 1.16*.

En contraste con otros mecanismos de desgaste, en los cuales generalmente debe pasar un cierto tiempo hasta que alcancen magnitudes críticas que lleven a la destrucción del elemento rozante, el desgaste adhesivo puede producirse de forma rápida, dando lugar al “gripado” de piezas móviles en sistemas mecánicos.

En este tipo de desgaste se puede producir un alto grado de transporte de materiales de una pieza a otra, quedando fuertemente adheridos en forma de soldaduras en frío.

El desgaste por este mecanismo es severo, siendo el mecanismo principal por el que se produce el fenómeno de desgaste.

#### 4.4.2 Desgaste por abrasión.

En el mecanismo de desgaste abrasivo, el arranque de partículas está causado principalmente por el contacto con deformación. Este mecanismo es el responsable del 50% del desgaste en la industria.

El efecto de abrasión se produce en situaciones en las que se produce un contacto físico entre dos superficies, una de las cuales es considerablemente más dura que la otra. Las asperezas de la superficie más dura penetran en la más blanda, con flujo plástico en esta última. Cuando se impone un movimiento tangencial a la superficie dura, se produce un fenómeno parecido al del mecanizado en la superficie blanda.

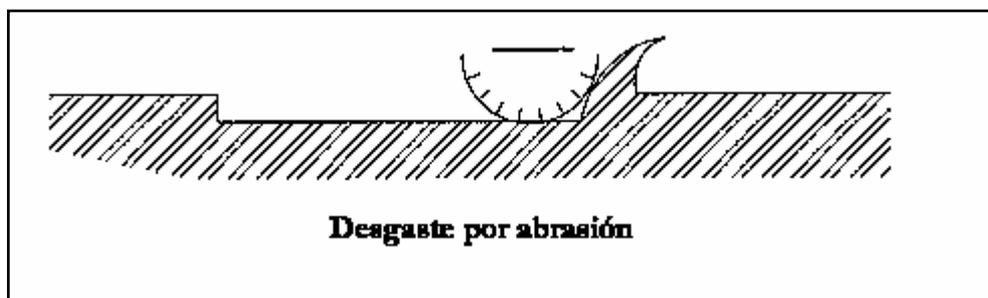


Figura 1.17. Desgaste por abrasión.

Se ha encontrado que el desgaste abrasivo depende de la correlación entre la dureza del abrasivo,  $H_a$ , y la dureza del metal,  $H_m$ , conduciendo a tres regímenes de desgaste distintos, como se muestra en la figura 10, donde el sector I, de bajo desgaste, se produce para  $H_a < H_m$ ; El sector II, zona de transición, se da para  $H_a = H_m$ ; Y el sector III, zona de alto desgaste, se produce cuando  $H_a > H_m$ .



Figura 1.18. Influencia de la dureza del abrasivo sobre el desgaste en metales.

Esto lleva a la importante conclusión de que, para reducir la componente abrasiva del desgaste, la dureza  $H_m$  del material, debe ser mayor que la dureza de las partículas abrasivas, en un factor de alrededor de 1,3, es decir:

$$H_m = 1,3 \cdot H_a$$

Puede ser utilizado como un criterio para una baja velocidad de abrasión. Si se aumenta la dureza del material,  $H_m$ , no se obtienen mejoras significativas.

#### 4.4.3 Desgaste por fatiga.

En el desgaste por fatiga, el deslizamiento, rodadura o impacto repetido varias veces, hace que el material próximo a la superficie experimente una carga cíclica. Como resultado de este ciclo de carga, las grietas se inician en estas regiones. Al continuar el ciclo de carga, las grietas se propagan e interseccionan con la superficie y consigo mismas. El entramado de grietas da lugar a partículas libres que se separan fácilmente de la superficie por cualquier movimiento posterior, de este modo aparece el desgaste.

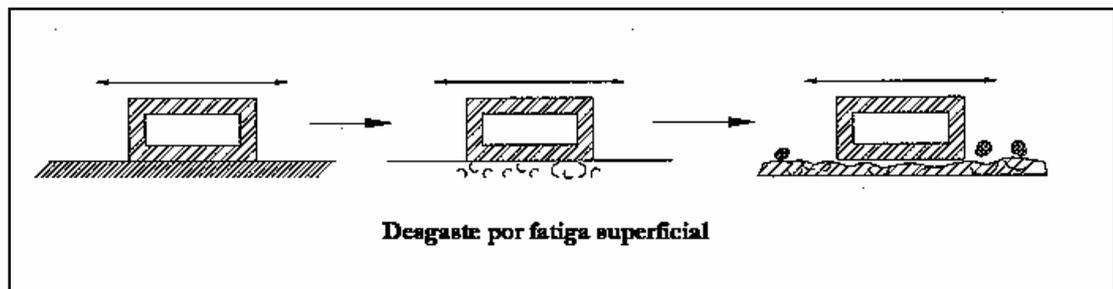
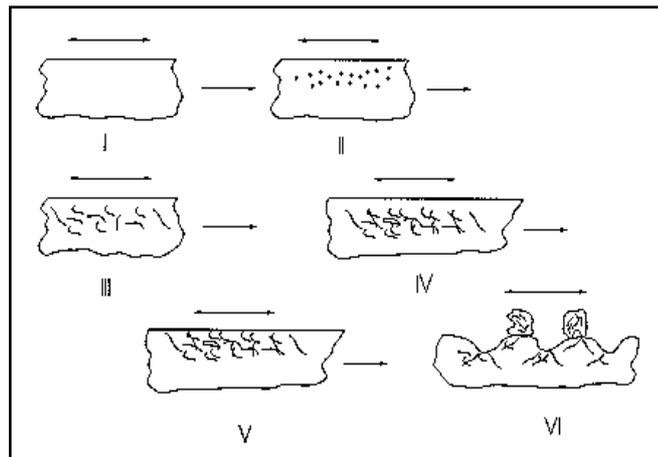


Figura 1.19. Desgaste por fatiga.

Esta superficie desgastada además, si se le sigue aplicando una carga cíclica, el proceso continua; dando lugar a una pérdida progresiva del material de la superficie. Este concepto se ilustra en la *Figura 4.7*.

Este mecanismo de desgaste es más evidente en situaciones de desgaste por rodadura o impacto.



*Figura 1.20 - Modelo general de desgaste por fatiga. Etapa I: carga cíclica en la superficie; etapa II: nucleación de grietas en regiones próximas a la superficie; etapa III: el crecimiento de las grietas; etapa IV: unión de grietas; etapa V: Intersección de las grietas con la superficie; etapa VI: formación de partículas libres.*

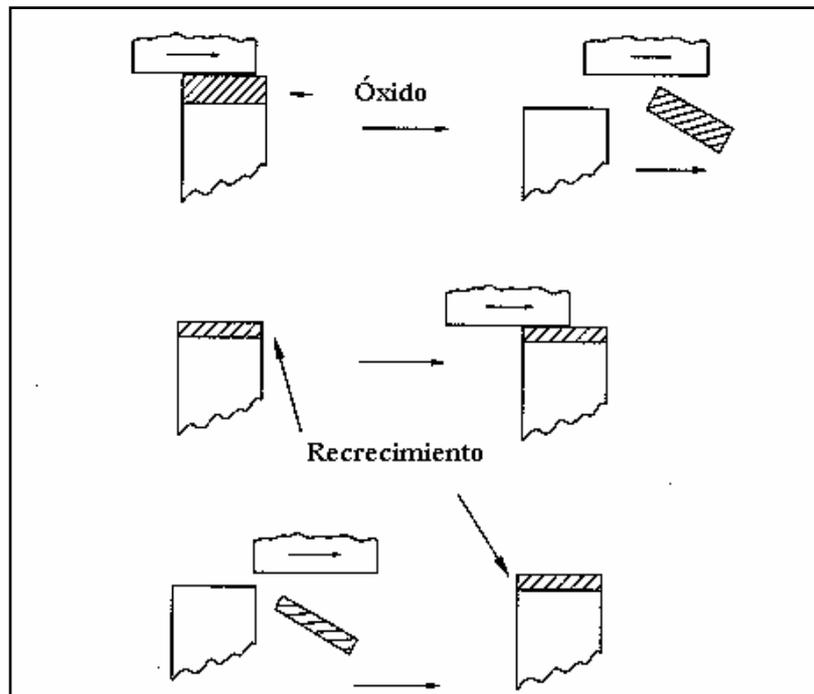
El desgaste por fatiga lo podemos dividir en dos fases principales. En el periodo inicial, se forman las grietas y se propagan por la superficie. Algunos cambios topológicos pueden empezar a ser evidentes durante este periodo, incluyendo algunas evidencias de deformación plástica. Sin embargo no hay pérdida de material en la superficie o formación de partículas libres. Después de esta fase aparece la formación de partículas libres.

Para la fatiga convencional, esto debería ser equivalente a la fractura o número de ciclos que aguanta el material. En el caso de desgaste por fatiga, el proceso ocurriría una y otra vez, dando lugar a una cada vez más profunda grieta. Además de este aspecto, hay otra diferencia que se debería tener en cuenta. En la fatiga convencional, la mayoría de los materiales manifiestan un límite de endurecimiento, es decir un nivel de esfuerzo por debajo del cual, la fractura no ocurrirá. Para el desgaste por fatiga, no parece que exista dicho límite, al menos en términos de cargas macroscópicas: Para las condiciones prácticas de cargas, no importa lo pequeña que sea la carga o la tensión.

#### **4.4.4 Desgaste por oxidación.**

Para el deslizamiento en seco bajo cargas ligeras, la huella en el desgaste metálico que se observa es muy suave, y de apariencia vidriosa. Bajo estas condiciones el coeficiente de desgaste es muy pequeño y se observan finas partículas de desgaste de óxidos metálicos. El aspecto vidrioso que muestra la superficie, se asocia a la formación de una capa de óxido. El concepto básico de este mecanismo, es que el desgaste aparece al arrancarse la capa de óxido

como resultado del contacto entre las asperezas. Sin embargo, el óxido vuelve a aparecer en estas áreas desnudas de la superficie, pero vuelve a separarse de esta como consecuencia del contacto entre las asperezas. Se puede usar un modelo simple para describir los elementos básicos que intervienen en este mecanismo. Una suposición implícita en este modelo, es que el punto más desgastado está en la interfase entre el metal y el óxido y que es el resultado de “despegarse” la capa óxido durante el deslizamiento. Esta secuencia se muestra en la *Figura 1.21*.



*Figura 1.21. Modelo para desgaste por oxidación.*

Si consideramos que el área de contacto es una unión uniforme, tal como muestra la *Figura 1.22*, el coeficiente de desgaste asociado a la unión será:

$$w_i = \frac{\pi \cdot a^2 \cdot d}{2 \cdot a} \quad \longrightarrow \quad w_i = \frac{\pi \cdot a \cdot d}{2}$$

Donde  $2 \cdot a$  es el diámetro de la unión circular, y  $d$  es el espesor de la capa de óxido. El coeficiente de desgaste de desgaste de la superficie quedaría:

$$w = \frac{\pi \cdot n \cdot a \cdot d}{2}$$

donde n es el número de uniones.

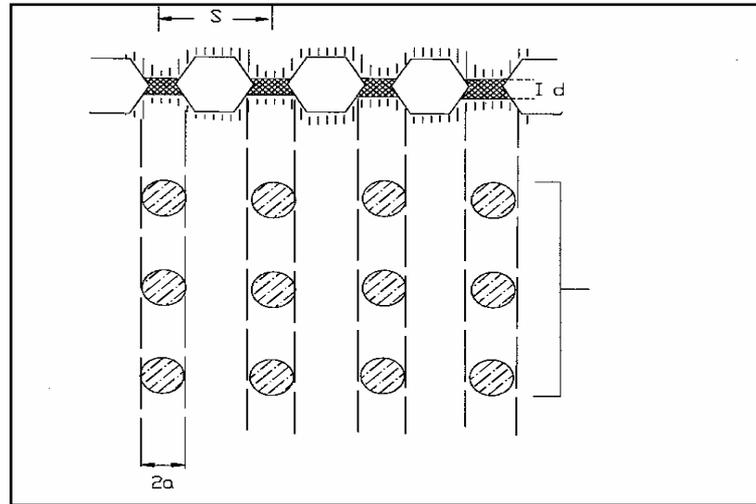


Figura 1.22. Conjunto de uniones usadas como modelo en el desgaste por oxidación.

#### 4.5 Relación entre fricción y desgaste.

Fricción y desgaste son dos fenómenos que están relacionados, debido a la influencia que puede producir uno sobre otro.

Hay que tener en cuenta que en el desgaste se producen partículas que quedan atrapadas entre las superficies que están en contacto, influyendo en la fricción. Además, en las uniones se generan temperaturas muy altas en períodos cortos de tiempo, afectando al proceso de deformación y, por lo tanto, al desgaste.

Las altas temperaturas son debidas al calor que se genera durante el proceso, dependiendo de las condiciones de funcionamiento, de la carga, velocidad y rapidez con la que se elimine el calor, por lo que dependerá de las propiedades térmicas de las superficies que están en contacto.

La fricción es un fenómeno que está relacionado con el contacto superficial, donde es notable la influencia de la naturaleza de las superficies, su composición y microestructura.



La fricción y el desgaste son sensibles a los mismos parámetros y en general a los mismos tipos de fenómenos.

El hecho de observar cómo evoluciona la fricción en un sistema nos puede ayudar a distinguir procesos o cambios en los mecanismos de desgaste, por lo que su observación en conjunto nos da una información valiosa sobre el comportamiento tribológico del material.

Por ello, la fricción y el desgaste deben considerarse fenómenos relacionados pero no equivalentes, aunque no sean independientes. El desgaste puede dar lugar a modificaciones superficiales que influyan sobre la fricción, tales como formación de películas y cambios de rugosidad. Por su parte, la fricción, mediante un efecto de calentamiento o de esfuerzos de tracción, puede modificar el comportamiento del material y, por tanto, influir en el desgaste. En este caso, la acumulación de partículas de desgaste en la interfase metal-polímero puede dar lugar, como hemos comentado, a un menor arranque de material, a pesar del aumento del coeficiente de fricción.

## 5. Materiales nanoestructurados.

### 5.1 Introducción.

A menudo se mencionan hoy términos tales como compuestos nanocristalinos, nanomateriales, nanoestructuras, nanocomposites, nanotecnología, nanociencia, nanotubos, nanopartículas, nanovarillas, nanoresortes..... y resulta casi infinita la cantidad de palabras con el prefijo que involucra al nanómetro. La nanotecnología se define, en general, como la investigación y el desarrollo a escala atómica o molecular (1-100nm) y se la relaciona con la fabricación de dispositivos miniaturizados, capaces, por ejemplo, de circular por el cuerpo humano para reparar tejidos dañados o de producir nanosportes (virus nanoblocks-VNB) sobre los cuales se pueden conectar circuitos electrónicos que involucran la inserción de mutaciones puntuales específicas sobre el VNB empleando la biología molecular).

Como materiales nanoestructurados se definen, en cambio, aquéllos cuyas partículas discretas tienen un diámetro por debajo de los 100nm en el caso que éstas sean esféricas; cuando se refiere a nanotubos o nanohilos la dimensión mayor se considera de hasta 200nm. En realidad, referirse sólo al tamaño para caracterizarlos conduciría a una visión muy pobre de los mismos ya que presentan propiedades espectaculares (las que dependen del tamaño y de la forma de las partículas que los componen).

Se comenzó a hablar de nanotecnología en los sesenta, sin embargo, algunos nanomateriales eran ya empleados 2000 años atrás. Un ejemplo de ello es la copa de vidrio de Licurgo (Roma, siglo IV A.C.), hoy expuesta en el British Museum. La copa cambia de color de acuerdo con la incidencia de la luz sobre la misma; observada con luz reflejada aparece verde e, iluminada desde su interior, la luz transmitida a través del vidrio hace que se la vea roja. El análisis del vidrio permitió revelar que contenía partículas muy pequeñas (~70nm) de plata y oro, en una proporción molar de 14:1 y, es justamente el tamaño de esas partículas en suspensión, lo que confiere al vidrio los diferentes colores.

Además de este ejemplo de nanocompuesto obtenido casualmente, podemos citar otros con bases intencionales: la fabricación de partículas de negro de humo y la obtención de dióxido de silicio “fumé”, en los años cuarenta. Esta época marca quizás la iniciación real de la era nanotecnológica.



Los materiales nanoestructurados, compuestos por granos de tamaño inferior a la micra (cristales), tienen nuevas propiedades que no suelen encontrarse en los materiales convencionales. Esto es debido a que los nanomateriales presentan un área de borde de grano mayor comparados con una cantidad idéntica de un material corriente, lo que los hace más reactivos químicamente (a veces materiales inertes en estado normal se vuelven reactivos en su forma nanoestructural), más resistentes e incluso mejores conductores eléctricos. Además, estas propiedades pueden variar cambiando el tamaño de grano.

Como muestra del gran interés que despiertan los materiales nanoestructurales citaremos los siguientes datos:

- Aproximadamente el 30% de los artículos publicados en revistas de Ciencia de Materiales tratan sobre materiales nanoestructurados.
- El número de artículos sobre materiales nanoestructurados se duplica aproximadamente cada 2.5 años.
- Los presupuestos para investigación en Estados Unidos, la Unión Europea, Corea, Japón... cada vez destinan más fondos al desarrollo de los materiales nanoestructurados.

## 5.2 ¿ Por que interesan tanto?

Porque si habitualmente hablamos de que:

- los metales son “blandos”, dúctiles y tenaces, y
- las cerámicas son duras pero frágiles.

Con los materiales nanoestructurados podemos alcanzar lo deseado:

- metales tenaces, pero duros como cerámicas
- cerámicas duras, pero dúctiles y tenaces

En todo caso, el conjunto de propiedades que presentan es espectacular:

Notable mejora en:

- + resistencia-dureza
- + tenacidad
- + ductilidad a temperaturas altas (superplasticidad)
- + coeficiente de expansión térmica
- + calor específico
- + resistividad eléctrica
- + difusividad
- + límites de solubilidad
- + reactividad química
- + permeabilidad magnética

Disminución de:

- módulo elástico
- densidad
- ductilidad a baja temperatura
- conductividad térmica

### **5.3 ¿Cómo se obtienen?**

En este punto radica el talón de Aquiles de los materiales nanoestructurales. Su obtención resulta bastante costosa, lo que supone un importante freno a su expansión comercial a gran escala.

Los métodos existentes para la obtención de materiales de estructura nanocristalina se basan en el uso de procesos de alta energía o de severa deformación plástica (SPD) para conseguir el refinamiento de la estructura. En general, estas técnicas intentan conseguir la nanoestructura mediante deformaciones a gran escala utilizando procesos como laminado, estirado, extrusión o torsión de alta presión.

Como ejemplo podemos citar la extrusión angular de igual canal o ECAE (Equal Channel Angular Extrusion), la torsión a alta presión o HPT (High Pressure Torsión), y mas recientemente, el mecanizado.

Usando este método, se han obtenido materiales nanoestructurados a partir de metales y aleaciones de una resistencia inicial baja o moderada. Sin embargo, los metales y aleaciones de alta resistencia son difícilmente procesables por los métodos SPD.



El **mecanizado** es un proceso en el que un indentador duro, en forma de cuña, (herramienta) elimina material (viruta) de la superficie de un sólido (pieza) mediante una deformación muy alta. El descubrimiento de que el mecanizado confiere a los materiales estructura nanométrica fue realizado por investigadores de la Universidad de Purdue (Indiana, USA), y supone un gran avance ya que revela que las virutas de una gran variedad de metales y aleaciones obtenidas por los procesos convencionales de mecanizado (torneado, fresado...) presentan estructuras de grano ultrafino (con tamaño de grano entre 100 y 800 nanómetros), lo que permite reducir en dos órdenes de magnitud el coste de fabricación de estos materiales.

La formación de viruta tiene lugar debido a la concentración del esfuerzo cortante a lo largo de una estrecha zona llamada “plano de corte”. En este plano de corte es posible imponer a las virutas deformaciones significativamente mayores de las que pueden alcanzarse en los otros procesos SPD de una etapa o incluso multietapa.

Por las razones anteriormente expuestas, recientemente se ha propuesto el mecanizado como un proceso simple para la obtención de materiales nanoestructurados de grano ultrafino (UFG). La formación de viruta, que implica la introducción de grandes deformaciones de corte uniformes ( $\gg 1$ ) en un único pase, también ofrece un buen marco para estudiar los efectos de grandes deformaciones en gran variedad de materiales.

Se ha demostrado que grandes deformaciones en los materiales por mecanizado da como resultado una microestructura que es más fina y dura que la obtenida por otras técnicas de fabricación de materiales de grano ultrafino. Sin embargo, desde el punto de vista práctico, el mecanizado presenta una gran desventaja, y es que no podemos controlar a priori la geometría final del material.

Pero una reciente investigación de la antes citada Universidad de Purdue, ha encontrado una variante del proceso de mecanizado que combina el refinamiento de la microestructura del material producido por el mecanizado con el control de la forma y dimensiones del material final gracias al efecto de extrusión. Es el *mecanizado con extrusión bajo gran deformación* o LSEM (Large Strain Extrusion Machining).

## 5.4 Proceso de mecanizado

### 5.4.1 Introducción.<sup>[21]</sup>

Vamos a hablar del mecanizado convencional, es decir, del que nos proporciona un material del que no podemos controlar la geometría final, para después compararlo con el LSEM.

El mecanizado es, en esencia, el proceso de eliminar el metal no deseado de barras, piezas forjadas o piezas vaciadas para producir la forma y dimensión deseadas. Es uno de los cuatro procesos principales para la conformación de metales. Los otros tres son la deformación de materiales en caliente o en frío, el vaciado de metales fundidos y la metalurgia de polvos.

El mecanizado se hace desprendiendo el metal en pequeños trozos, a los que se llama virutas, usando herramientas de corte muy duras y máquinas herramientas muy duras y máquinas herramientas rígidas y potentes. La herramienta puede mantenerse fija y moverse transversalmente a una pieza de trabajo en rotación como se hace en un torno, o bien, la pieza de trabajo puede sostenerse rígidamente y moverse para pasar frente a una herramienta de corte en movimiento, como sucede en una fresadora. Existen diversas variantes de éstos principios.

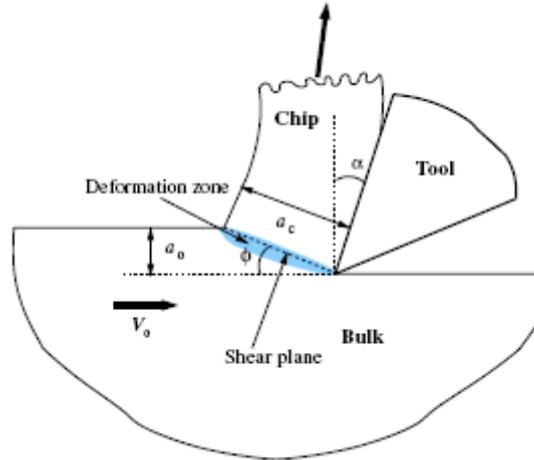
### 5.4.2 Variables del mecanizado con deformación plana<sup>[14]</sup>.

El mecanizado de deformación plana (*Figura 1.23*) se caracteriza por una herramienta afilada en forma de cuña que elimina una profundidad de material determinada ( $a_0$ ) mediante su movimiento en una acción perpendicular al filo de corte.

La formación de viruta tiene lugar por la concentración de esfuerzos dentro de una estrecha zona de deformación, a menudo idealizada como “plano de corte”. La mayor parte del refinamiento de grano asociado con la deformación de virutas nanoestructuradas o de grano ultrafino ha sido atribuida a las grandes deformaciones de corte impuestas en esta zona de deformación.

La geometría de la zona de deformación y la asociada a la deformación por cortante están definidas por el ángulo de ataque ( $\alpha$ ) y el ángulo del plano de corte ( $\phi$ ).

El ángulo de ataque ( $\alpha$ ) se considera positivo cuando se mide en el sentido de las agujas del reloj con respecto a la normal de la superficie de la pieza de trabajo. En la *Figura 1.23* se muestra un caso con un ángulo ( $\alpha$ ) positivo.



*Figura 1.23. Esquema del proceso de mecanizado y representación física de las variables.*

La deformación cortante efectiva ( $\gamma$ ) impuesta en la viruta durante su deformación viene dada por:

$$\gamma = \frac{\cos\alpha}{\sin\phi \cdot \cos(\phi - \alpha)} \quad (1.4)$$

Donde  $\phi$  se calcula midiendo  $a_0$  y  $a_c$  (Figura 1.23) mediante:

$$\tan\phi = \frac{\left(\frac{a_0}{a_c}\right) \cdot \cos\alpha}{1 - \left(\frac{a_0}{a_c}\right) \cdot \sin\alpha} \quad (1.5)$$

### 5.4.3 Deformación plana para la obtención de materiales más resistentes.

La aplicación de ángulos de corte negativos en el mecanizado presenta algunas ventajas, como son:

- Mecanizado de materiales de resistencia elevada.
- Operaciones de acabado muy preciso.

Pero en el caso que nos ocupa, uno de los aspectos más destacados está relacionado con las propiedades de las virutas obtenidas tras el mecanizado, ya que éstas, tras el mecanizado se caracterizan por una reducción del tamaño de grano y un aumento de su dureza.

El grado de deformación cortante efectiva aplicado en el proceso va a influir en el tamaño de grano obtenido, y éste a su vez en las propiedades de la viruta obtenida. En este proyecto se analiza la influencia del tamaño de grano obtenido en el desgaste.

El hecho de la mejora de las propiedades en las virutas obtenidas indica un futuro aprovechamiento de lo que actualmente es material de desecho y sitúa el proceso de mecanizado como método de obtención de materiales con mejores propiedades mecánicas y tribológicas de un modo más económico.

## 5.5 Mecanizado con extrusión bajo gran deformación (LSEM)<sup>[13]</sup>.

En la figura 1.24 se puede ver cómo mediante un proceso de LSEM se produce un material de dimensión controlada y estructura de grano ultrafino en un solo paso utilizando una herramienta diseñada especialmente. Ésta se mueve hacia un macizo de forma redonda que gira a velocidad constante.

La herramienta consiste en dos componentes, una inferior con un filo de corte inclinado un ángulo  $\alpha$  (ángulo de rascado), y la parte superior donde hay un tope en forma de cuña. Ambas partes están fabricadas a partir de materiales muy duros.

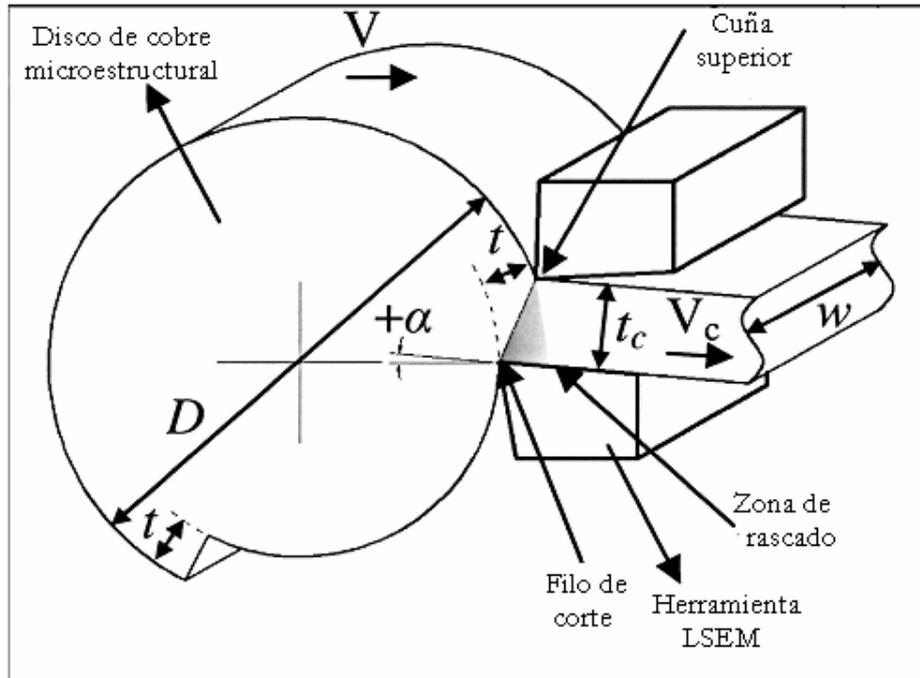


Fig.1.24. Herramienta de mecanizado con extrusión bajo alta deformación.

El material mecanizado es simultáneamente forzado a una extrusión a través del rascador inferior y el tope en cuña superior, de ahí el control del ancho de la viruta y de la forma de la misma.

La herramienta de corte se desplaza de forma radial hacia el interior del macizo redondo. La velocidad de alimentación será de una distancia “t” por cada revolución de la pieza. Es el equivalente a la anchura de la viruta no deformada en el mecanizado convencional.

La deformación tiene lugar durante el avance de la herramienta en la región sombreada en el dibujo.

Mientras prevalezcan las condiciones de deformación, la velocidad de salida del material viene dada por la siguiente expresión:

$$V_c = \frac{Vt}{t_c} \quad (1.6)$$

Donde:

$t_c$ : ancho de la viruta deformada.

Mediante un análisis más avanzado, se puede demostrar que la deformación cortante efectiva ( $\gamma$ ) debida a la combinación del mecanizado y la extrusión depende únicamente del cociente entre las dimensiones de la viruta antes y después de ser deformada, y del ángulo de rascado. A dicho cociente lo denominamos como  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{t_c}{t} \quad (1.7)$$

Así, la expresión que nos da la deformación cortante efectiva es:

$$\gamma = \frac{\lambda}{\cos \alpha} + \frac{1}{\lambda \cdot \cos \alpha} - 2 \cdot \tan \alpha \quad (1.8)$$

Como puede verse en la figura 1.24,  $t_c$  también es la distancia entre el filo de corte inferior y la cuña superior de la herramienta LSEM.

El mecanizado se puede entender como un proceso de gran deformación plástica (SPD) en el que se aplican grandes deformaciones de forma controlada variando el ángulo de rascado. En el proceso LSEM, podemos realizar dicho control de otra forma, variando  $t_c$ , pero hay que señalar que si se excede de una cierta distancia no tiene lugar la extrusión y entonces se trataría de un proceso de mecanizado convencional.

## 5.6 Materiales empleados.

Los materiales nanoestructurados ensayados en este trabajo han sido proporcionados por el grupo de investigación del Prof. Chandrasekar, director del “*Center for Materials Processing and Tribology*” de la Universidad de Purdue (Indiana, USA). Este grupo trabaja en el desarrollo de nuevos procedimientos para la obtención de materiales nanoestructurados. En el capítulo III (Materiales y métodos) se hace una descripción detallada de las muestras de cobre utilizadas en los ensayos.

## 6. Introducción a los materiales nanoestructurados de cobre.

### 6.1 Introducción.

El cobre puro siempre ha despertado un considerable interés debido a su gran conductividad eléctrica y térmica, pero una serie de inconvenientes tales como su baja resistencia mecánica y dureza restringen su campo de aplicaciones. A través del refinamiento de grano se consigue una mejora en estos puntos débiles, y de esta forma, el diseño de microestructuras se convierte en una estrategia que en estos últimos años cobra una gran importancia. En algunas aplicaciones industriales la resistencia al desgaste de algunos materiales toma una importancia de primer orden, con lo cual el comportamiento tribológico de los materiales ha recibido mucha atención en el ámbito de las nanoestructuras en la década pasada, y muchos experimentos han aportado una mejora significativa en cuanto a resistencia frente al desgaste debido al mayor refinamiento en el tamaño de grano.

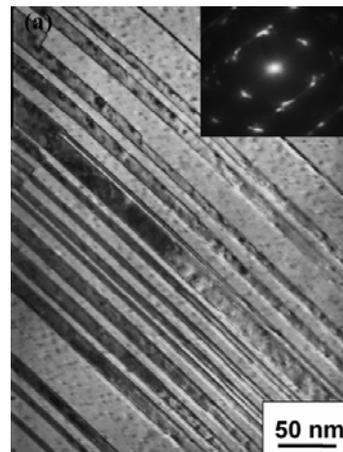


Fig.1.25. Micrografía SEM de una muestra de cobre nano twin.

Podemos encontrar estudios sobre comportamiento frente al desgaste bajo condiciones de deslizamiento en seco de cobre con estructuras nanocristalinas emparejadas (*nano-scaled twins*) en un artículo de la Academia China de Ciencias (Chinese Academy of Sciences)<sup>[11]</sup>. Este material se obtiene mediante la aplicación del método SMAT (Tratamiento de aleación mecánica superficial) a un disco de cobre puro (99% en peso). En dicha estructura, los granos se disponen de forma paralela entre sí, y diferente a la de la matriz de la estructura.

Al investigar la fricción y las características de desgaste de esta estructura en comparación con cobre nanocrystalino equiaxial y cobre con estructura de grano grueso se observa una mejora significativa en las propiedades tribológicas del cobre nanocrystalino respecto a los demás para cualquier valor de carga y de velocidad de deslizamiento.

Por otro lado encontramos un método para obtener estructuras nanocrystalinas basado en la electrodeposición. Las propiedades tribológicas de los materiales así obtenidos han sido estudiadas de forma poco intensiva, especialmente para aplicaciones tribológicas o potenciales aplicaciones en dispositivos a escala nanométrica, tales como MEMS Y NEMS (en el apartado 6.2.3 se explican estos dispositivos). Podemos encontrar una aplicación de esta tecnología en un trabajo realizado por la Universidad de Alberta (Canada)<sup>[15]</sup>, donde aplican una variante del electrodepositado convencional (basado en corriente continua). En esta investigación se determinaron los parámetros de la electrodeposición (Densidad de pico, frecuencia, tiempo de corriente activa y pasiva, pulso de corriente, etc.) con el propósito de optimizar el proceso. El tamaño de grano de las capas electrodepositadas se determina usando Rayos X y Microscopio de fuerza atómica (AFM). Las propiedades mecánicas y tribológicas se han investigado mediante nanoindentación y técnicas de rayado a nivel micro y nanométrico. Se ha demostrado que la película nanocrystalina era mayor que las obtenidas mediante electrodepositado convencional, las cuales, además, presentan estructuras de grano de mayor tamaño; los depósitos nanocrystalinos presentan mayor dureza, menor coeficiente de fricción y menor volumen de desgaste.

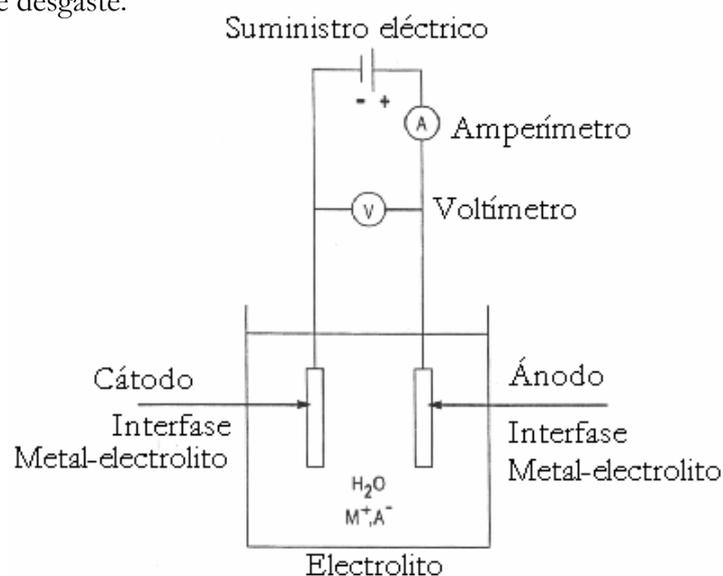


Fig.1.27. Esquema de una célula electrolítica para depositar el metal "M" sobre una placa, a partir de una solución de sales del metal anterior "MA".<sup>[20]</sup>

También se evaluaron la estabilidad electrónica de la superficie y la reactividad química mediante la medida de su comportamiento eléctrico (Electron work function – EWF). Todos los resultados indican que la superficie nanocristalina tiene mayor estabilidad electroquímica que las placas obtenidas mediante corriente continua. Este aumento es resultado de la formación de una película pasiva más fuerte y adherente en el cobre nanocristalino.

## **6.2 Aplicaciones tribológicas del cobre nanoestructurado.**

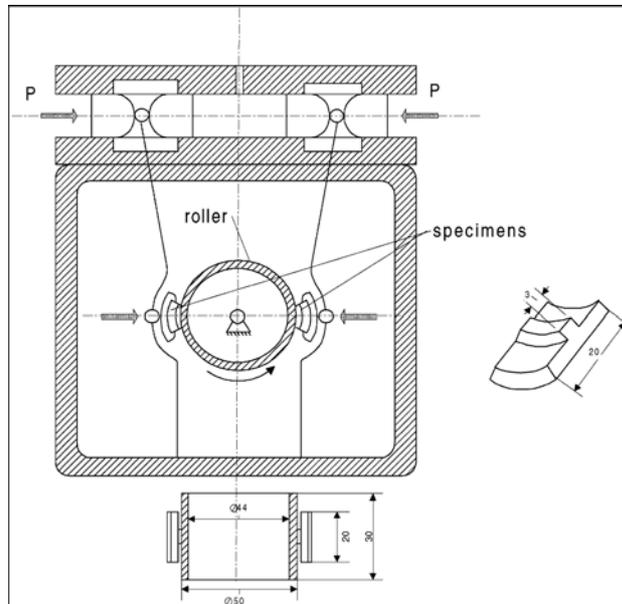
### **6.2.1 Reducción de la fricción en motores de explosión mediante adición de nanocompuestos de cobre al aceite motor.**

Para evitar un desgaste excesivo que produzca fallos catastróficos en el motor, la estrategia a emplear se centra en reducir el volumen del metal deformado, incluso a escala microestructural, donde el tamaño del volumen afectado se corresponde con el tamaño de grano. Estas estrategias se han aplicado a nivel comercial. En un principio se trató de recubrir con una capa suficientemente delgada la superficie de los componentes sometidos a desgaste. Una alternativa es utilizar revestimientos maleables que reducen la transmisión de esfuerzos de contacto a las capas subyacentes de metal.

Se han llevado a cabo un gran número de cuidadosos estudios para determinar el efecto de aceites y aditivos en el desgaste y la fricción. Generalmente, el resultado de estos estudios se caracterizan, bien por un metal puro y sus compuestos como aditivos lubricantes que producen una película protectora, o bien por extender aditivos metálicos sobre una superficie ya desgastada. En ambos casos se consigue baja fricción y una rápida relajación del esfuerzo de contacto, y por lo tanto, se previene la deformación del metal subyacente. Una de las características de los aditivos nanoparticulados es que no se recogen en los filtros de partículas.

En un estudio llevado a cabo conjuntamente por investigadores de las universidades de Tomsk (Rusia) y Sanford (Florida, USA)<sup>[16]</sup>, se trata de determinar el efecto de la adición de polvos de cobre nanoestructurado al aceite motor de una máquina donde la fricción se produce entre superficies de acero. El polvo nanoestructurado de cobre se produce usando un método energético, la explosión eléctrica de un hilo metálico (EEW) en un gas inerte.

Se utiliza un aceite SAE 30 junto con aditivos de cobre nanoestructurado utilizando diferentes gases inertes (  $\text{Cu}(\text{CO}_2)$ ,  $\text{Cu}(\text{Ar})$ ,  $\text{Cu}(\text{Ar}+\text{O}_2)$ ,  $\text{Cu}(\text{N}_2)$  ). En la figura 1.28 se muestra el esquema del procedimiento de ensayo.



*Fig.1.28. Esquema del procedimiento de ensayo de aditivos de cobre nanoestructurado en aceite de motor.*

Los resultados del experimento revelan que dichos aditivos contribuyen notablemente a la reducción de la fricción, y lo hacen de forma mas efectiva cuanto mayores son la carga y la velocidad de deslizamiento. El polvo nanoestructurado de cobre provoca cambios en la topología de la superficie de desgaste y no perjudica las características de lubricación del aceite. El sobrecalentamiento local debido al contacto directo de las superficies desencadena una deposición del cobre en el acero, proporcionando una superficie maleable limitada a la ubicación específica del par de fricción. Se ha demostrado que las nanopartículas de cobre se adhieren preferentemente a los pares de fricción de acero y reducen notablemente la fricción.

### 6.2.2 Comportamiento frente al desgaste por deslizamiento de hilos de aleaciones de cobre en tendidos eléctricos de trenes de alta velocidad.

Con el desarrollo tecnológico de los trenes eléctricos, se hace necesario un aumento de la velocidad y una reducción del coste. En este aspecto cobra un gran interés el mecanismo que conecta la catenaria con la locomotora, conocido como trole, donde se produce el contacto eléctrico, ya que afecta de gran manera a la velocidad del tren y al coste de mantenimiento. En busca de una reducción del desgaste y una buena combinación de resistencia y alta conductividad, hacen su aparición nuevos materiales, como puede ser la aleación de cobre, plata y cromo.

En una reciente investigación conjunta de las universidades de Luoyang y Xi'an (China)<sup>[18]</sup>, se estudió el comportamiento frente al desgaste de este material utilizando un dispositivo de ensayo específicamente diseñado para tal fin, como puede verse en la figura 1.29.

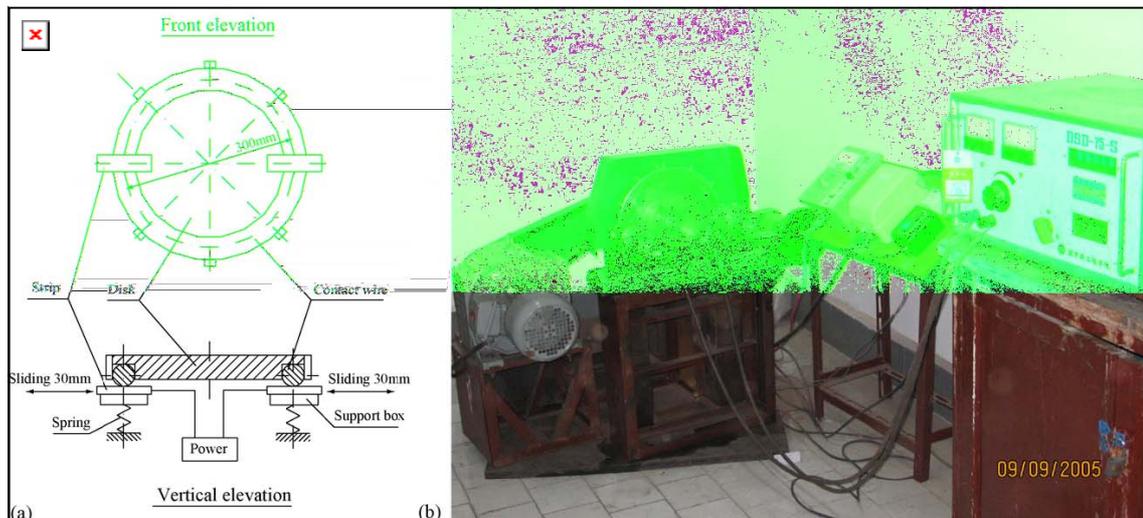


Fig.1.29. Maquinaria de ensayo para estudiar el desgaste en el contacto eléctrico de trenes de alta velocidad.

El cable eléctrico fabricado con una aleación Cu-Ag-Cr, se desliza contra una cinta de cobre fabricada por pulvimetalurgia, la cual es usada como cinta de contacto en el pantógrafo (dispositivo de toma de corriente, fig.1.30) de una locomotora eléctrica.

En este estudio se discute el mecanismo de desgaste de la aleación de Cu-Ag-Cr comparada con la aleación Cu-Ag bajo las mismas condiciones de ensayo, del cual se pueden extraer las siguientes conclusiones:

El desgaste de la aleación de Cu-Ag-Cr aumenta con la corriente eléctrica. Bajo una corriente de 50A, el desgaste es el doble que sin corriente.

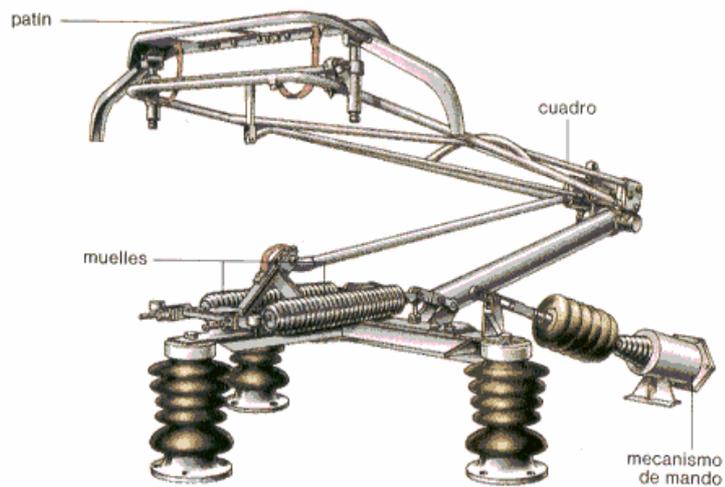


Fig.1.30. Pantógrafo

El desgaste aumenta con la distancia recorrida bajo diferentes parámetros tribológicos. Aumenta rápidamente al principio y mas lentamente después.

Los mecanismos de desgaste predominantes fueron la adhesión, abrasión por desgaste y erosión eléctrica.

La adición de cromo incrementa notablemente la resistencia al desgaste (fig.1.31).

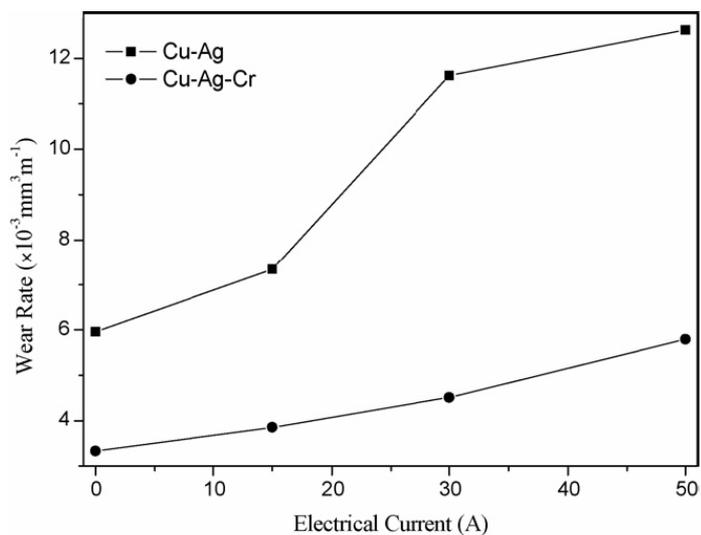


Fig.1.31. Efecto del cromo en el desgaste por corriente eléctrica de la aleación Cu-Ag

### 6.2.3. Utilización del cobre en sistemas micro eléctrico-mecánicos con el fin de construir interruptores eléctricos de bajo coste.

Los sistemas micro electro-mecánicos (MEMS) comprenden la integración de elementos mecánicos como sensores y actuadores, y electrónicos en un sustrato común de silicio mediante tecnología de microfabricación. La tecnología MEMS promete revolucionar en breve productos en todas las categorías de productos basados en la microelectrónica del silicio, haciendo posible la integración en una pastilla de sistemas complejos.

Esta tecnología proporciona ojos y manos a los circuitos microelectrónicos que actúan como cerebro de un sistema, y le permiten medir y controlar el entorno, aumentando su capacidad de decisión. Como los dispositivos MEMS se fabrican usando técnicas similares a las que se emplean en los circuitos integrados convencionales, se consiguen niveles de funcionalidad y sofisticación sin precedentes en una pequeña pastilla de silicio a un coste relativamente bajo.

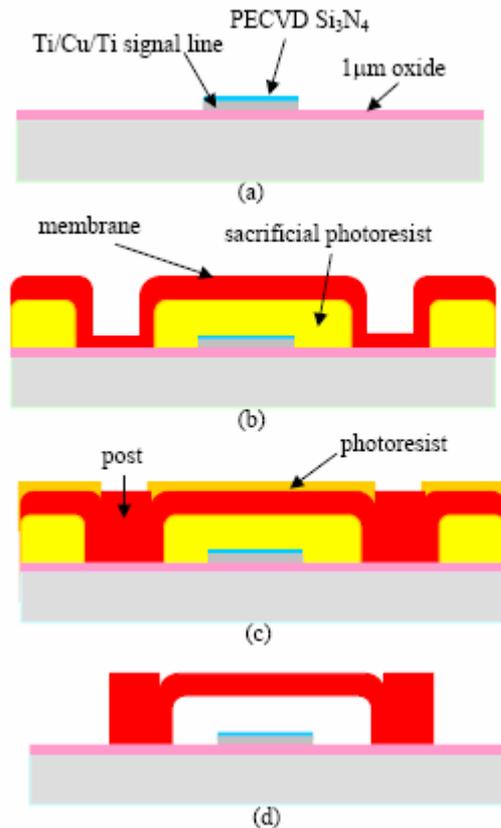


Fig.1.32 . Pasos en el proceso de fabricación del interruptor de cobre MEMS.

En un estudio de la universidad de Georgia (Atlanta, USA)<sup>[19]</sup>, se presenta el diseño, fabricación y ensayo de interruptores de cobre basados en tecnología MEMS fabricados en sustrato de silicio. Estos dispositivos son firmes candidatos a sustituir a los convencionales transistores de efecto campo (FET) y a los diodos interruptores en los sistemas de telecomunicación por microondas, gracias a su buen aislamiento, características y bajo consumo de potencia. El dispositivo analizado es un interruptor capacitivo CPW (Coplanar Waveguide), en el cual se ha utilizado cobre rociado como material estructural.