

# LA INFLUENCIA DE LA NATURALEZA DE LAS SUPERFICIES EN LA TRIBOLOGÍA

D. PEÑA

Grupo de Investigaciones en Corrosión-GIC, Universidad Industrial de Santander  
Bucaramanga, Colombia  
e-mail: dypena@uis.edu.co

---

## RESUMEN

En este artículo se hace una revisión, desde un ángulo de visión microscópico, en un aspecto fundamental como es la naturaleza de las superficies involucradas en un sistema tribológico; ya que la interacción entre ellas, gobierna los mecanismos que rigen los daños por fricción y desgaste, que usualmente, son sólo detectados macroscópicamente por medio de la medición de pérdida de peso y cambios de fuerzas.

---

## INTRODUCCIÓN

Tribología es la ciencia y tecnología de superficies sólidas en contacto y movimiento relativo, lo cual implica el estudio de áreas tales como fricción, desgaste y lubricación. Lo anterior indica que un sistema tribológico cualquiera es altamente complejo que incluye muchas variables y envuelve fenómenos que ocurren, generalmente, en varias interfaces sólido-líquido-gas, por lo tanto es un tema que debe ser tratado de manera interdisciplinaria, incluyendo expertos en distintas áreas tales como ingeniería mecánica, metalúrgica, física, química y materiales.

Se reconoce la tribología como un tema de inmensa importancia económica y tecnológica. Una serie de informes ha demostrado que aproximadamente el 1.5% del producto interno bruto de un país industrializado, puede ser ahorrado solamente controlando el comportamiento tribológico de los materiales.

Con los nuevos avances en los estudios tribológicos, es más factible calcular el desgaste y como los procesos para lograrlo se tornan más económicos y fáciles, es predecible que dentro de

algunos años, el cálculo del desgaste con el tiempo será exigencia para la mayoría de máquinas y sus elementos, incrementando así los métodos de control y prevención. Lo anterior conlleva que el desgaste, su control y diagnóstico, formará parte de los sistemas de calidad.

Es la tarea de los tribólogos garantizar la efectividad y fiabilidad del trabajo de las máquinas, las cuales cada día tienen un mayor exigencia.

## ESTRUCTURAS SUPERFICIALES

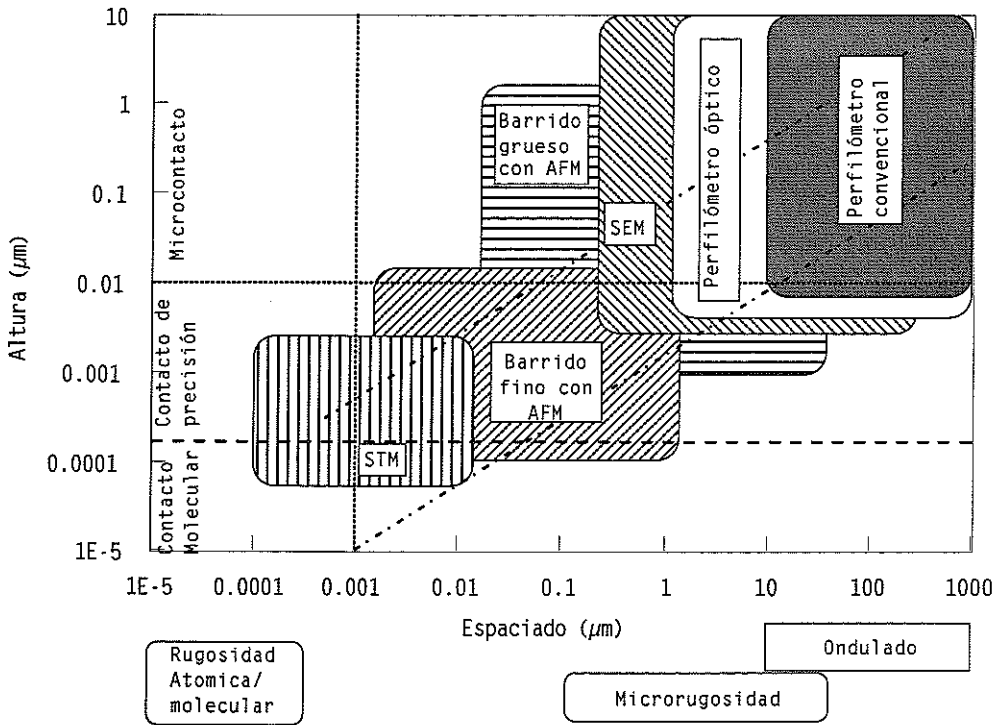
Hay tres importantes puntos que se deben analizar: las superficies casi nunca son perfectamente planas, sus propiedades difieren significativamente del volumen grueso del material y son muy rara vez, perfectamente limpias<sup>1</sup>. En este artículo se examinarán tres aspectos fundamentales en cuanto a superficies reales: la topografía superficial, la microestructura cerca de la superficie y la naturaleza química de la superficie.

**TOPOGRAFÍA SUPERFICIAL**

La topografía superficial y los métodos para su descripción y estimación son muy complejos y no pueden ser rápidamente resumidos, por lo que sólo se describirá uno de los métodos más comunes para estimarla; el uso del perfilómetro. El funcionamiento del perfilómetro es sencillo, un sensor fino es arrastrado suave y establemente a través de la superficie bajo examen y mientras él viaja sobre la superficie, su desplazamiento vertical es convertido por un transductor en una señal eléctrica, la cuál es amplificada y luego es representada gráficamente en cualquier equipo diseñado para ello.

Cabe anotar, que una limitación de este método es la forma de la punta del sensor. Por razones de resistencia, las formas del diamante utilizadas (piramidal y cónica) impiden que el sensor penetre totalmente en las estrechas y angostas formas de la superficie<sup>2</sup>. En resumen, todos los sensores, inevitablemente producen un "efecto suavizante" del perfil debido a las dimensiones finitas de la punta del sensor.

Recientemente, las técnicas de medición de la rugosidad han mejorado ostensiblemente por lo tanto se puede obtener una mejor precisión<sup>3</sup> en las mediciones. La Figura 1, resume dichos métodos teniendo en cuenta la resolución obtenida.



**FIGURA 1.** Diagrama esquemático de los parámetros de altura y espaciado, incluyendo los rangos de resolución vertical-lateral para diferentes métodos de medición de rugosidad <sup>3</sup>.

Para el propósito de este artículo, sólo se debe tener presente que las superficies reales, por bien pulidas y planas que aparentemente parezcan, tienen alguna rugosidad. Los perfiles superficiales se describen usualmente con diferentes escalas

de magnificación horizontal y vertical, así lo que parece ser una superficie muy rugosa cubierta por picos, en realidad es una superficie ondulante, ver Figura 2. La pendiente real de una superficie es muy rara vez mas grande de 10<sup>o2</sup>.

Es útil recordar las escalas de las dimensiones de la rugosidad superficial, comparadas con la resolución de un microscopio óptico y un SEM, ver Figura 3. Las películas de óxido son varios órdenes de magnitud más delgadas.

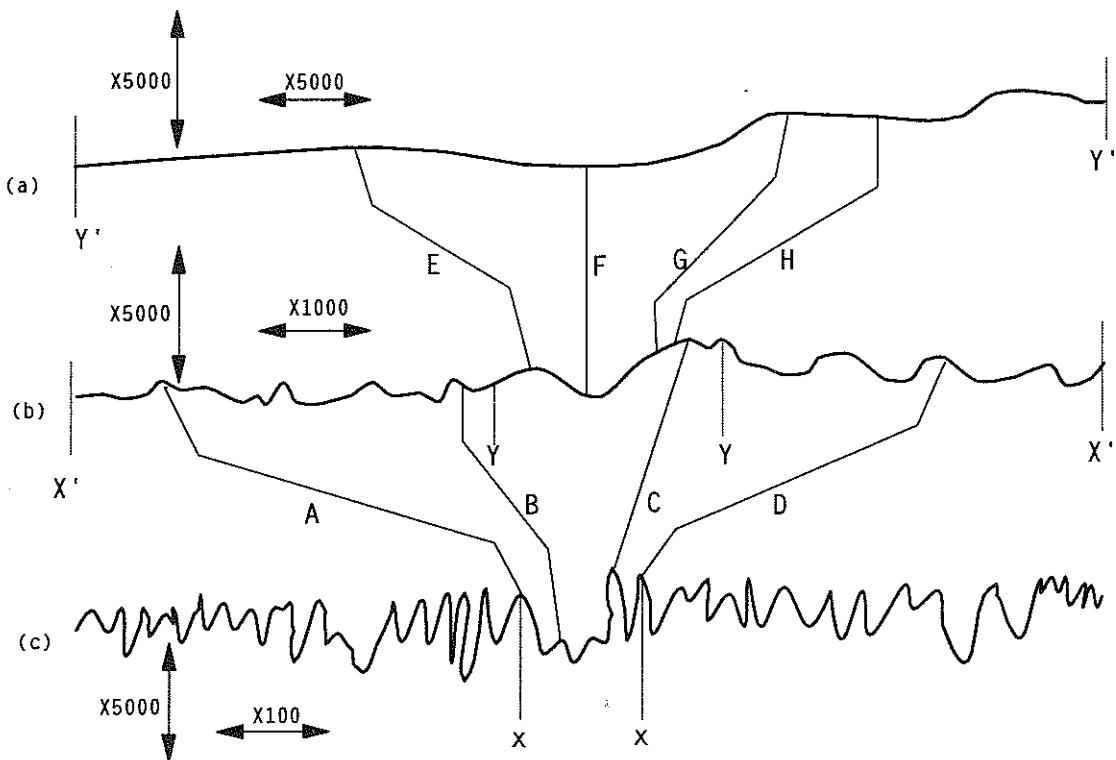
La caracterización de la rugosidad superficial es importante para predecir y entender las propiedades tribológicas de sólidos en contacto. Esto ocurre cuando dos superficies planas se ponen en contacto, la rugosidad produce puntos de contacto discretos. Esto provoca una deformación en esos puntos y puede ser ó plástica ó elástica, dependiendo del esfuerzo nominal, rugosidad y propiedades del material<sup>4</sup>.

La rugosidad puede ser definida de muchas maneras, las cuáles están por fuera del objetivo de este artículo, pero, asumiendo de un modo amplio que es la desviación promedio de la superficie en estudio con respecto a una superficie

perfectamente lisa, se puede hacer una lista de las rugosidades típicas producidas por los procesos mas comunes de manufactura, como efectivamente se puede ver en la tabla 1.

**TABLA 1.** Rugosidades promedio para superficies ingenieriles acabadas por diferentes procesos<sup>7</sup>.

Proceso de fabricación	Ra (micras)
Cepillado y Perfilado	1-25
Fresado	1-6
Estirado, Extrusión	1-3
Torneado, Barrenado	0.4-6
Esmerilado	0.1-2
Rectificado	0.1-1
Pulido	0.1-0.4
Pulido fino	0.05-0.4



**FIGURA 2.** (a) Perfil de una superficie real en alta magnificación; (b) La misma superficie, pero con una magnificación vertical 5 veces más grande que la horizontal y (c) con una relación de 50:1 entre las magnificaciones horizontal y vertical<sup>5</sup>.

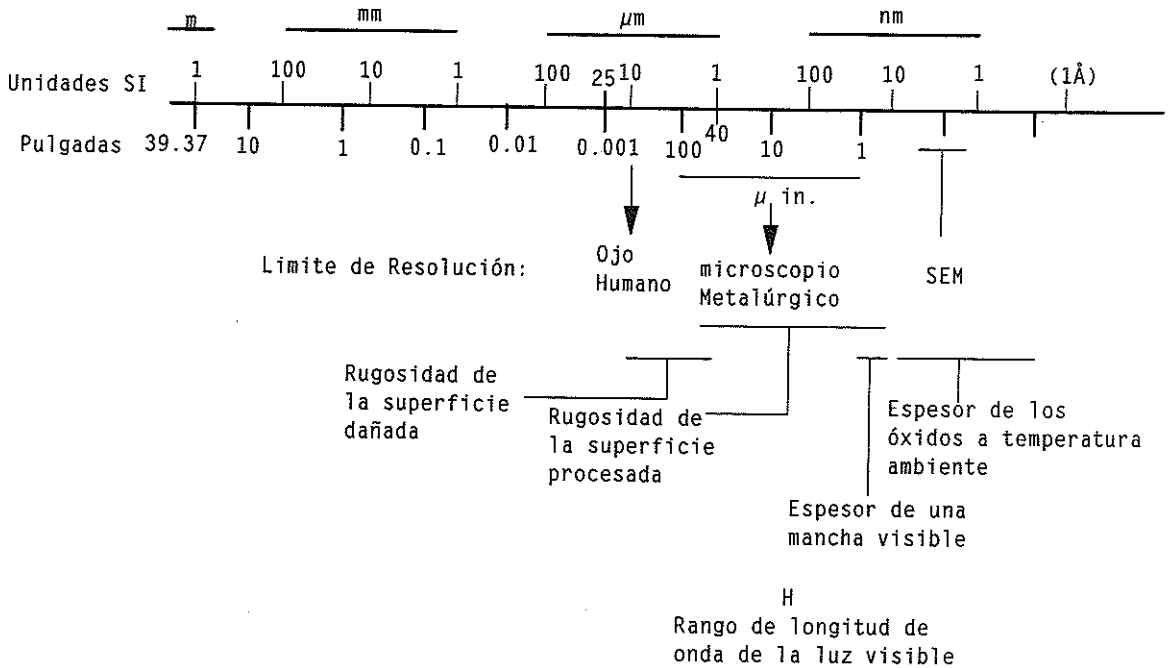


FIGURA 3. Rangos de resolución de recubrimientos y superficies seleccionadas relativas a las capacidades de visión de varios aparatos ópticos y el ojo humano<sup>6</sup>.

### EFFECTO DEL MAQUINADO MECÁNICO SOBRE LA ESTRUCTURA SUPERFICIAL

Para observar como es diferente la microestructura del material muy cerca de la superficie en comparación con el volumen del mismo, se va a analizar como es el daño producido por los procesos de maquinado mecánico. Cualquiera que sea el método utilizado para hacer el acabado final, la superficie del material estará sujeta al trabajado mecánico.

Una herramienta de corte o una partícula abrasiva remueve material por deformación plástica y por lo tanto introduce un esfuerzo plástico no sólo en el material que es removido, sino también en el material que esta siendo trabajado. Otro factor importante es la profundidad del daño la cuál depende de la geometría de la herramienta de corte; sí se tiene un gran ángulo en la punta de corte, la zona de distorsión puede extenderse una distancia considerable por debajo de la superficie final. La Figura 4 muestra la deformación producida por una herramienta de corte.

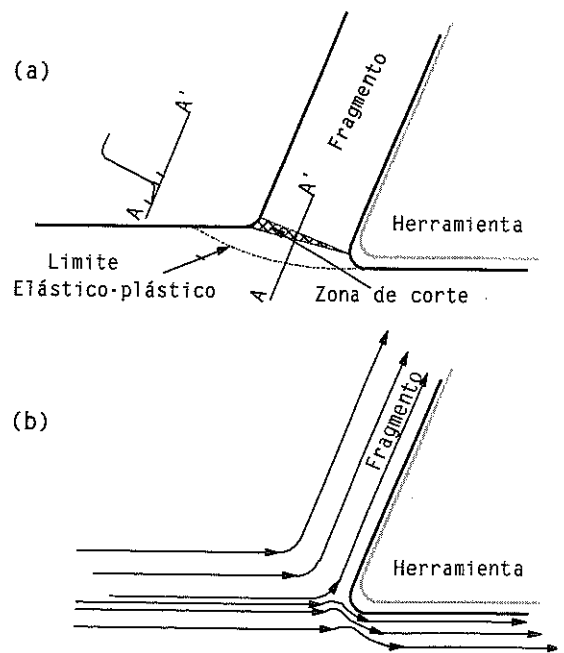


FIGURA 4. Diagrama esquemático que muestra algunas características de la formación de virutas durante el proceso de maquinado. (a) Distribución de esfuerzos y (b) patrón de flujo en el material cuando el borde de la herramienta se aproxima en la zona de corte<sup>1</sup>.

En procesos como el torneado y fresado, la geometría de la herramienta de corte está bien definida, mientras que en procesos que utilizan partículas abrasivas (pulido, desbaste) se tiene menos control sobre la deformación. Por ejemplo, mediante el proceso de lijado, las mediciones experimentales determinaron que se produce una significativa deformación que se puede detectar tan profunda como a 0.5 mm debajo de la superficie de un latón- $\alpha$ . Con un pulido más fino puede reducirse la profundidad de la capa deformada en los latones hasta unas pocas micras, aún cuando en aceros inoxidable apreciablymente más duros se pueden observar similares profundidades de deformación<sup>1</sup>.

El microscopio de barrido electrónico se puede usar para revelar la estructura deformada del material cerca de la superficie. La estructura del grano distorsionada en el metal exhibe un incremento de la densidad de dislocaciones hacia

la superficie, con una tendencia para formar paredes de dislocación, en forma de planchas alargadas en la dirección del pulido o desbaste y unos subgranos muy finos en la parte más cercana a la superficie. Se observa una apreciable orientación cristalográfica cerca de la superficie<sup>8</sup>.

La distorsión del material superficial está asociada con un gradiente de esfuerzo de corte, el cuál se incrementa progresivamente desde el volumen del material hacia la superficie. En materiales, como algunos aceros y aleaciones de cobalto, las transformaciones de fase inducidas por el esfuerzo pueden ocurrir en regiones cerca de la superficie<sup>2</sup>. La Figura 5 muestra la severidad de la deformación en un material exactamente debajo de la superficie.

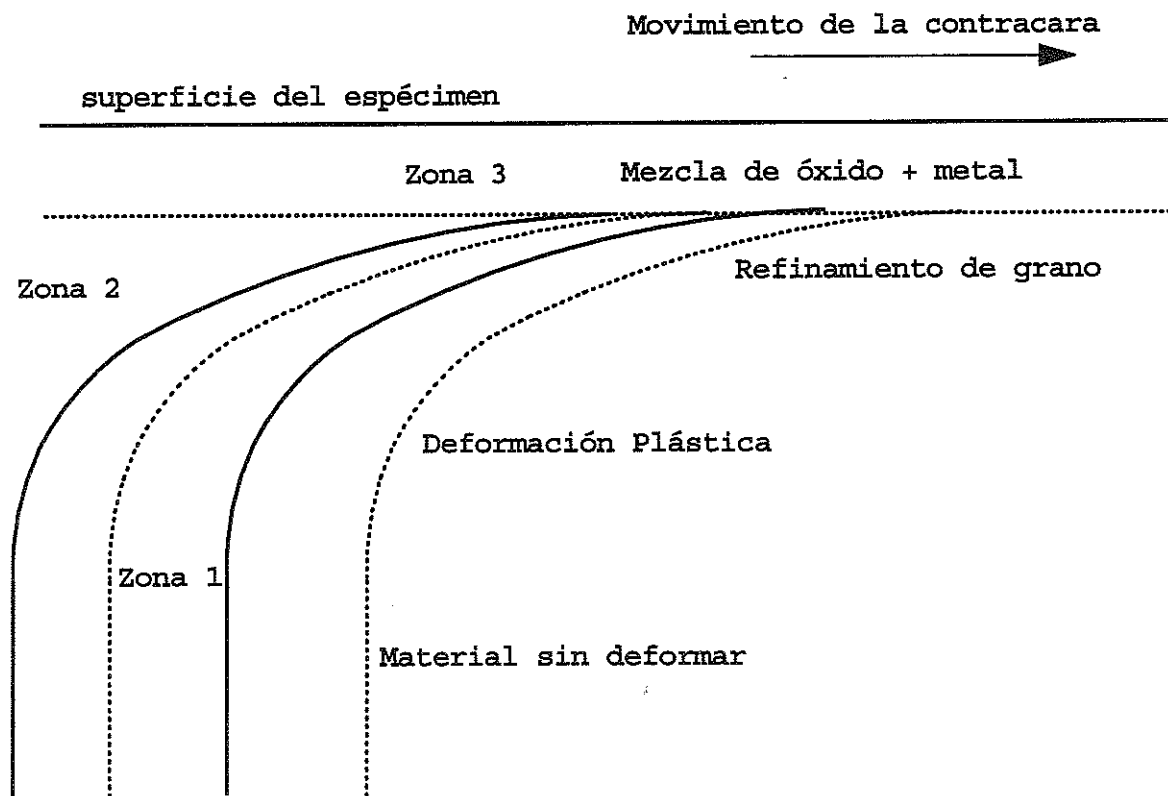


FIGURA 5. Diagrama esquemático donde se observa como la severidad de la deformación plástica se distribuye bajo la superficie desgastada del material en el régimen de desgaste severo<sup>9</sup>.

## LA COMPOSICIÓN DEL MATERIAL CERCA DE LA SUPERFICIE

En algunas ocasiones la aparición de material extraño en la superficie del material (por ejemplo óxidos ó partículas de abrasivos), los cuáles no están presentes dentro del material original, puede hacer variar la composición progresivamente hacia dentro del material por alguna considerable profundidad debajo de la superficie<sup>2</sup>.

En cuanto a los cerámicos, los cuáles pueden ser usados como recubrimientos ó como materiales solos, tienen la particularidad que la extensión de la deformación plástica es menor que la de los metales, aunque sí bien se observa una gran densidad de dislocaciones cerca de la superficie maquinada. Las grietas son producidas por el maquinado, las cuáles pueden ser del orden de un tamaño de grano en profundidad. Ellas pueden estar localizadas en los límites de grano o intergranularmente, dependiendo del tipo de cerámico, y pueden producir debilidad del cerámico en algunas aplicaciones<sup>10</sup>.

La superficie de un material es el punto de encuentro con el medio que lo rodea, por lo que no es una sorpresa que películas superficiales se formen por la reacción con la atmósfera. Todos los materiales, excepto el oro, titanio y otros pocos (técnicamente la película de su óxido es muy delgada), forman óxidos con el aire, los cuáles pueden tener un espesor entre 1 a 10nm aproximadamente. A menudo, el que no es especialista en corrosión mal interpreta la palabra "material resistente a la corrosión", dándole el significado que dicho material no reacciona con el oxígeno.

De hecho, los metales sí se oxidan y muy rápidamente, y es sólo la estabilidad de la capa de óxido muy delgada la cuál forma una barrera protectora que previene al material de una posterior oxidación catastróficamente rápida<sup>11</sup>. Las aleaciones de aluminio y titanio y los aceros inoxidable son ejemplos de dichos materiales. Cabe anotar que las películas de óxido juegan un importante papel en la fricción por deslizamiento y el comportamiento al desgaste de los metales en el aire.

Los materiales cerámicos, por sí mismos, son a menudo óxidos (alúmina, zirconia, etc.) y por lo tanto no se esperaría que ellos se oxidan en el aire<sup>12</sup>. Sin embargo, son susceptibles a reaccionar con el vapor de agua, formando películas delgadas de hidróxido u óxidos hidratados. Los materiales cerámicos sin óxidos (nitruro de silicio y carburo de silicio) a menudo se oxidan bajo condiciones de deslizamiento (es un modo de desgaste) y posteriormente reaccionan con el vapor de agua para formar una película debido a la reacción con los componentes de la atmósfera<sup>2</sup>.

Los aceites lubricantes se utilizan en presencia de aire y contienen alguna cantidad de oxígeno disuelto. Por lo tanto, metales bajo condiciones lubricadas forman películas de óxido superficial. Muchas grasas y aceites también contienen moléculas denominadas "lubricante límite" y otros compuestos los cuáles se adsorben sobre la superficie del óxido y forman una capa protectora. Un ejemplo es la quimisorción de las moléculas del ácido esteárico sobre el acero al carbono<sup>6</sup>. En este caso, varios mecanismos de adsorción pueden estar involucrados pero por su extensión no fueron tratados en este artículo.

## CONCLUSIONES

Es importante reconocer la gran importancia de las condiciones superficiales de los materiales, los cuáles posteriormente serán utilizados en diferentes procesos. Las superficies ingenieriles nunca son perfectamente planas, y además la estructura cerca de la superficie es apreciablemente diferente del resto del material, debido a que ha sido deformada durante el proceso de manufactura, durante el uso o por ambos.

También se debe tener en cuenta que el material puede tener una superficie (a nivel microscópico) químicamente modificada, por ejemplo un óxido o en el caso de los cerámicos una capa hidratada.

Todo lo anterior se debe tener en cuenta en procesos como la fricción, lubricación, desgaste y en los procesos normales de corrosión y erosión, entre otros, ya que de acuerdo a como la superficie haya sido maquinada, el material se comportará en el proceso para el cuál fue diseñado.

## ABSTRACT

Tribology is the science and technology of solid surfaces in contact and relative move which, involve studying areas such as friction, wear and lubrication. Therefore any tribology system is highly complex which includes many variables and phenomena occurring in different solid-liquid-gas interfaces.

It is well known that the tribology is a subject of great importance for the economy and technology of the countries. Many surveys have demonstrated that about 1.5% of the gross national product of an industrialized country could be saved solely controlling the tribologic behavior of the materials.

This paper pretends to review, from the microscopic view, about an fundamental aspect of the surfaces nature which are involved in a tribologic system; so that the interaction between them rules the governing mechanisms of friction and wear damage, which usually, are only detected in macroscopic changes like wastage and thickness measurements.

## BIBLIOGRAFÍA

1. I.M. Hutchings, Introduction to tribology and the structure of engineering surfaces, Materials design for reducing wear and corrosion, ImechE, :1- , London, 1997.
2. I.M. Hutchings, Tribology: friction and wear of engineering materials, : 4- , Edward Arnold Ed., London, 1992.
3. N.K. Mjyshkim, M.I. Petrokovets y S.A. Chizhik, Simulation of real contact in tribology, New directions in tribology, ImechE, : 330- , London, 1997.
4. B. Bhushan, Micro/nanotribology using atomic force/friction force microscopy: State of the art, New directions in tribology, ImechE, : 144- , London, 1997.
5. H. Dagnall, Exploring surface texture, Rank Taylor Hobson Ed., 1980.
6. Friction, lubrication and wear technology, ASM Handbook, 18, 1992.
7. K.J. Stout, Materials in engineering, 2, : 287-295, 1981.
8. L.E. Samuels, Metallographic polishing by mechanical Methods, ASM Handbook, 1982.
9. S.L. Rice, H. Nowotny y S.F. Wayne, Wear of materials, ASME, :47-52, Rhee, Ruff y Ludema Eds., 1981.
10. R.L. Davidge, Mechanical behaviour of ceramics, Cambridge University Press, 1979.
11. N. Birks and G.H. Meier, Oxidation of alloys, Introduction to high temperature oxidation of metals, : 91-128, Edward Arnold Ed., London, 1983.
12. J. Martin, Glasses and ceramics, Materials for engineering, The Institute of Materials, : 129-140, London, 1996.