

# **ROZAMIENTO Y DESGASTE**

**Roque Calero Pérez**

TEMA           .- ROZAMIENTO Y DESGASTE EN LOS ELEMENTOS DE MÁQUINA EN CONTACTO.

- 1.- Introducción.
- 2.- Tensiones y deformaciones en elementos de máquina en contacto, con superficies ideales.
  - 2.1.- Caso de cargas normales.
  - 2.2.- Caso de carga normal y tangencial.
  - 2.3.- Aplicación al caso de miembros en rodadura.
    - 2.3.1.- Caso de cilindros rodantes.
    - 2.3.2.- Caso de dos esferas en contacto.
    - 2.3.3.- Caso de esfera y anillo de rodadura.
- 3.- Composición y topografía de las superficies de los elementos de máquinas.
  - 3.1.- Composición de las superficies. Diferentes capas.
  - 3.2.- Topografía de las superficies. Parámetros estadísticos.
- 4.- Análisis del proceso de contacto estático entre elementos de máquinas con superficies "reales".
  - 4.1.- Áreas real y aparente.
  - 4.2.- Fisicoquímica del contacto. Fuerzas de adhesión.
  - 4.3.- Energía disipada en el fenómeno de contacto estático.
  - 4.4.- Caso de existir cargas tangenciales, pero sin que ocurra deslizamiento. Crecimiento de las microsoldaduras.
- 5.- Análisis del proceso de fricción entre elementos de máquinas.
  - 5.1.- Estudio del rozamiento de deslizamiento.
    - 5.1.1.- Generalidades.
    - 5.1.2.- Cálculo del coeficiente de rozamiento a la fricción. Contribución de la adhesión, y de la deformación de asperezas.
    - 5.1.3.- Energía disipada en el deslizamiento.

- 5.1.4.- Efectos en la fricción de la velocidad de rozamiento.
- 5.1.5.- Inestabilidad de la fricción.
- 5.2.- Estudio del rozamiento a la rodadura.
  - 5.2.1.- Generalidades.
  - 5.2.2.- Cálculo del coeficiente de resistencia a la rodadura.
    - 5.2.2.1.- Caso de cilindro sobre plano.
    - 5.2.2.2.- Caso de esfera sobre plano.
    - 5.2.2.3.- Contacto elíptico general.
- 6.- Estudio del desgaste en los elementos de máquina en contacto.
  - 6.1.- Generalidades.
  - 6.2.- Estudio de los mecanismos de desgaste.
    - 6.2.1.- Desgaste adhesivo.
    - 6.2.2.- Desgaste abrasivo.
    - 6.2.3.- Desgaste por fatiga superficial.
    - 6.2.4.- Desgaste corrosivo.
    - 6.2.5.- Otros tipos de desgaste: Fretting, Erosión, Cavitación, Chispas eléctricas, etc.
  - 6.3.- Tamaño de las partículas desgastadas.
  - 6.4.- Factores que afectan al desgaste.
  - 6.5.- Medida del desgaste.

1.- INTRODUCCION AL ESTUDIO DEL ROZAMIENTO Y DESGASTE ENTRE ELEMENTOS DE MAQUINAS EN CONTACTO.

- En los elementos de máquinas en contacto (pares) con movimiento relativo entre si ( deslizamiento, pivotamiento o rodadura), aparecen, como es sabido, unas resistencias pasivas ( fuerzas, pares) que se oponen a tal movimiento relativo.

Tales resistencias se traducen en una producción de calor ( trabajo de las fuerzas de rozamiento ) y en una pérdida de material ( desgaste). Eventualmente también pueden traer como consecuencias el cambio en la propia estructura superficial de los materiales, en sus propiedades, etc.

- En todo caso, el rozamiento y el desgaste suponen siempre la existencia de dos factores simultaneos:

Contacto directo entre dos cuerpos.

Movimiento relativo entre ellos.

- Esquemáticamente, el siguiente cuadro resume todos los casos posibles:

SISTEMA	RESISTENCIA	DESGASTE	EJEMPLOS
Sólido/ Gas	Fluida	Erosión	- Lubricación por aire - Mov. aviones.
Sólido/ Líquido	Viscosa	Cavitación	- Mov. barcos. - Embragues hidraulicos - Tuberias
Sólido/ Sólido	Fricción Rodadura	Abrasión	- Frenos - Rueda-rail - Pistón-cilindro

\* Aunque casi siempre la fricción y el desgaste tienen una connotación negativa, no siempre ocurre así.

Por ejemplo, la fricción es imprescindible para la locomoción ==

( adherencia zapatas ruedas, frenos), etc. En cuanto al desgaste, también es útil en muchos casos, por ejemplo en el período de rodaje de las máquinas, operaciones de pulimentado, etc.

Por el contrario, en los casos en que el rozamiento y el desgaste son perjudiciales, se recurre a diferentes procedimientos para disminuir sus efectos, siendo los más usuales la elección de materiales rozantes de baja resistencia al deslizamiento y el empleo de fluidos interpuestos, o sea, lubricantes.

- Aunque ambos fenómenos de rozamiento y desgaste se conocen desde muy antiguo, no fue hasta el año 1781 cuando Coulomb formuló las leyes básicas de la fricción, expresada en sus ~~cuatro postulados~~ básicos:

- 1º.- La fuerza de rozamiento es proporcional a la carga
- 2º.- La fuerza de rozamiento es independiente del área de las superficies en contacto.
- 3º.- La fuerza de rozamiento depende de la naturaleza de las superficies en contacto.
- 4º.- La fuerza de rozamiento, entre ciertos límites, es independiente de la velocidad relativa de deslizamiento.

Estas leyes, admitidas por válidas hasta fechas muy recientes, han sido en los últimos tiempos modificadas, en base a las crecientes necesidades de conocer y manejar los fenómenos de rozamiento y desgaste asociados a todos los elementos de máquinas en movimiento relativo ( aparte de otros muchos campos, tales como conformación de los metales por arranque de viruta, la navegación aérea y marítima, etc.)

Estos estudios, asociados a los de lubricación, han dado lugar a la aparición de un cuerpo de conocimientos, conocido por TRI-

- BOLOGIA ( 1 966 ), y que puede definirse como la " ciencia y la tecnología que estudia la interacción entre superficies en movimiento relativo, y los problemas a ello asociados" .
- Como tendremos ocasión de ver más adelante, la fricción y el ~~de~~ desgaste son fenomenos asociados a las propiedades superficiales de los cuerpos en contacto, y ahí reside, precisamente, el origen de la complejidad de su estudio. Es preciso conocer, con bastante detalle, tales características superficiales, tanto desde un punto de vista mecánico, como también fisicoquímico. Del conocimiento de tales características ( rugosidades, etc.) = superficiales, se deducen una serie de aspectos derivados de las fuerzas de contacto, del reparto de presiones superficiales, y = las consecuencias que ellas acarrearán.
  - De tal estudio pormenorizado se deducirán leyes de comportamiento de materiales rozantes más precisas que las de Coulomb, y se comprenderán mejor algunos aspectos que ellas dejaban en el aire ( específicamente, la " constancia" del valor del coeficiente de rozamiento, la " invariabilidad" de la fuerza de rozamiento con la velocidad, la " independencia" del área de contacto, etc.)
  - Aparte de lo anterior, también ha de señalarse la fundamental distinción entre rozamiento de deslizamiento y de rodadura, los cuales obedecen a razones profundamente diferentes.
  - Todos estos aspectos son a los que se va a dedicar atención en los próximos puntos.

2.- TENSIONES Y DEFORMACIONES EN ELEMENTOS DE MAQUINAS EN CONTACTO,  
CON SUPERFICIES IDEALES.

2.1.- CASO DE CARGAS NORMALES.

- Dado que las presiones existentes entre los materiales en contacto juegan un papel fundamental en el estudio del rozamiento, vamos a efectuar un resumen de los resultados de Boussinesq y Hertz, para varios casos de sólidos en contacto, sometidos a cargas normales al plano de tangencia.
- Hemos de señalar que tales valores de la presión de contacto ( y deformación consecuente ) son valores absolutamente teóricos, = " ideales", que no responden a la realidad, como más adelante = comprobaremos.

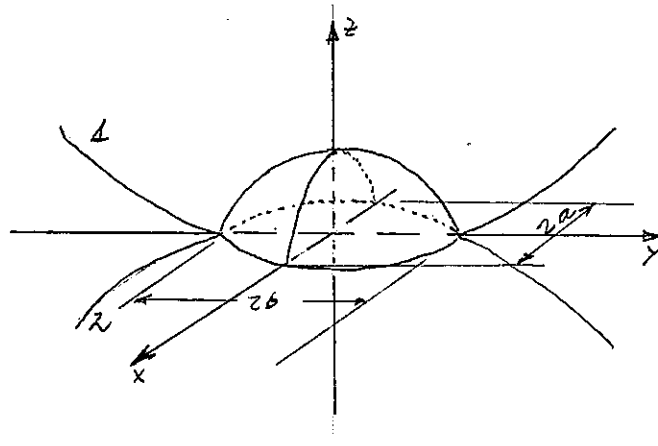
En tales cálculos, se supone:

- 1º.- Los materiales son perfectamente elásticos.
- 2º.- Las superficies son perfectamente lisas.
- 3º.- No se aplican fuerzas tangenciales ( en la dirección del plano tangente )
- 4º.- No existe ninguna velocidad relativa entre ambos = cuerpos en contacto.

Sin embargo para los cuerpos metálicos, y para elevadas cargas normales, los valores de la presión y deformación de contacto, halladas por las fórmulas de Hertz, son relativamente válidas. Ellos nos ayudarán, por otro lado, a comprender ciertos fenómenos asociados al deslizamiento, por lo que es conveniente recordarlos aquí de nuevo, recogiendo los resultados en la tabla adjunta.

( Tales valores, como se recordará, fueron demostrados en el tema anterior ).

A.- CASO GENERAL



Datos:

- Carga normal F
- Radios de curvatura principales en el punto de contacto

$$r_1 \quad , \quad r_1'$$

$$r_2 \quad , \quad r_2'$$

- Módulos de elasticidad

$$E_1 \quad , \quad E_2$$

- Módulos de Poisson

$$\nu_1 \quad , \quad \nu_2$$

Valores de la presión de contacto:

$$p = \frac{3}{2} \cdot \frac{F}{\pi a b} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}$$

$$p_0 = \frac{3}{2} \frac{F}{\pi a b} \quad (\text{presión máxima})$$



Valores de la superficie deformada:

$$a = m \sqrt[3]{\frac{3 \pi F}{4} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2} \right) \frac{1}{A + B}}$$

$$b = n \sqrt[3]{\frac{3 \pi F}{4} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2} \right) \frac{1}{A + B}}$$

siendo m y n coeficientes tabulados y

$$A + B = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_2} \right)$$

B.- DOS ESFERAS ( RADIOS R<sub>1</sub> Y R<sub>2</sub> )

$$p = \frac{3 F}{2 \pi a^2} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{a^2}}$$

$$a = b = \sqrt[3]{\frac{3 F}{4} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}$$

siendo

$$\frac{1}{A + B} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Si ambas esferas son del mismo material:

$$a = b = \sqrt[3]{\frac{3 F}{2} \left( \frac{1 - \nu^2}{E} \right) \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}$$

$$p_o = \frac{3 F}{2 \pi a^2} = \sqrt[3]{\frac{3 F}{2 \pi^3} \frac{E^2}{(1 - \nu^2)^2} \frac{(R_1 + R_2)^2}{R_1^2 \cdot R_2^2}}$$

C.- ESFERA Y PLANO

$$a = b = \sqrt[3]{\frac{3 F}{4} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) R}$$

$$p = \frac{3 F}{2 \pi a^2} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{a^2}}$$

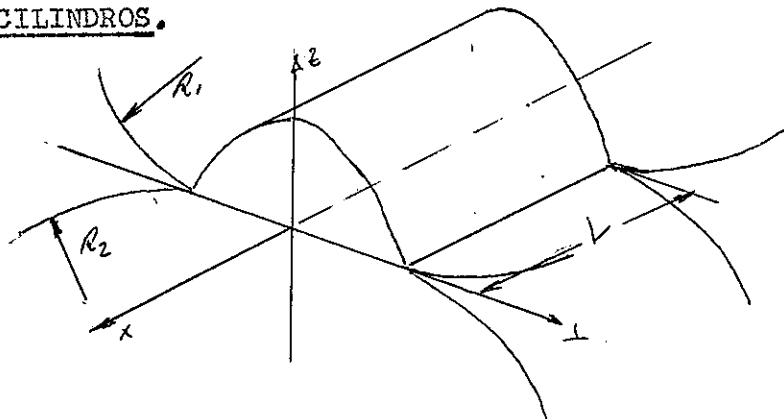
$$p_o = \sqrt[3]{\frac{6 F}{R^2} \frac{1}{\left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)}}$$

Si ambos son del mismo material:

$$a = b = \sqrt[3]{\frac{3 F}{2} R \frac{1 - \nu^2}{E}}$$

$$p_o = \sqrt[3]{\frac{3 F}{2 R^2} \frac{E^2}{(1 - \nu^2)^2}}$$

D.- DOS CILINDROS.



$$b = \sqrt{\frac{4 F}{\pi L} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}$$

$$p_0 = \sqrt{\frac{F}{\pi L} \frac{E_1 E_2}{(1 - \nu_1^2) E_2 + (1 - \nu_2^2) E_1} \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}}$$

$$p = p_0 \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}}$$

Si ambos son del mismo material:

$$b = \sqrt{\frac{8 F}{\pi L} \frac{1 - \nu^2}{E} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}$$

$$p_0 = \sqrt{\frac{F}{2 \pi L} \frac{E (R_1 + R_2)}{(1 - \nu^2) R_1 R_2}}$$

E.- CILINDRO Y PLANO.

$$b = \sqrt{\frac{4 F R}{\pi L} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)}$$

$$p_0 = \sqrt{\frac{F}{\pi L R} \frac{E_1 E_2}{(1 - \nu_1^2) E_2 + (1 - \nu_2^2) E_1}}$$

$$p = p_0 \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}}$$

Si ambos son del mismo material:

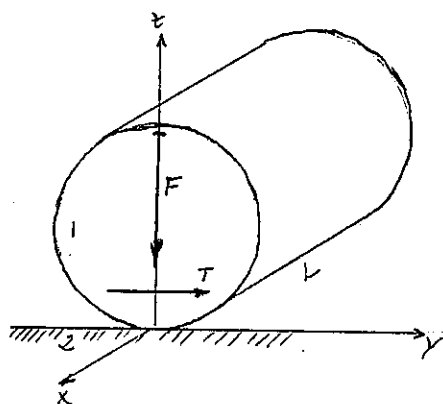
$$b = \sqrt{\frac{8 F R}{\pi L} \frac{1 - \nu^2}{E}}$$

$$p_o = \sqrt{\frac{F E}{2 \pi L R (1 - \nu^2)}}$$

2.2.- CASO DE CARGA NORMAL Y TANGENCIAL.

- Vamos a analizar el caso más sencillo de un cilindro apoyado sobre un plano, sometido a una carga normal  $F$ , y a una tangencial  $T$ , <sup>pero</sup> que se ve impedido para rodar ( solo puede deslizar) Supongamos que el plano es mucho más rígido que el cilindro, es

decir, que solo sufre deformación apreciable el cilindro Según se obtiene de la teoría de Hertz, la carga  $F$  provoca:



$$p = p_0 \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}}$$

$$p_0 = \sqrt{\frac{F}{\pi L R} \frac{E_1 E_2}{(1 - \nu_1^2) E_2 + (1 - \nu_2^2) E_1}}$$

$$b = \sqrt{\frac{4 F R}{\pi L} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)}$$

- Al aplicar la fuerza  $T$ , la experiencia enseña que el cilindro no se desplazará ( a medida que se va aumentando  $T$ ) hasta que esta alcance el valor  $T = \mu F$  ( siendo  $\mu$  el llamado coeficiente de rozamiento).

A primera vista parece como si al ser  $F = cte$ , " $\mu$ " hubiera de ser variable, al variar  $T$ , puesto que la igualdad  $T = \mu F$  se sigue cumpliendo para todo valor de  $T$  menor que  $\mu F$ .

Como sabe que  $\mu$  es un valor constante, debe haber otra razón

que justifique tal comportamiento.

- Al aplicar la fuerza T se generará una tensión de rozamiento === ( fuerza por unidad de área) que será, en todo momento,

$$t = \mu \cdot p$$

siendo p la presión de Hertz.

Esta combinación de tensiones de cortadura t y normales p dará = lugar, en la superficie y en el seno del cilindro, a unas tensio nes normales y cortantes  $\sigma_y, \sigma_z, \sigma_x, \tau_{xy}, \tau_{xz}$ , dadas por las conocidas expresiones de Hertz.

Como es lógico, tales tensiones darán lugar a las correspondien tes deformaciones, las cuales, como veremos a continuación, nos darán la respuesta al problema planteado.

- Para simplificar el razonamiento, vamos a estudiar por separado dos casos posibles. El primero se refiere al cilindro deslizando sobre el plano ( o a punto de deslizar), en el cual se puede a segurar que

$$T = \mu \cdot F$$

y por consiguiente

$$t = \mu p,$$

es decir, la distribución de presiones t es conocida, y sigue la misma ley que la de p.

El segundo se refiere a cuando

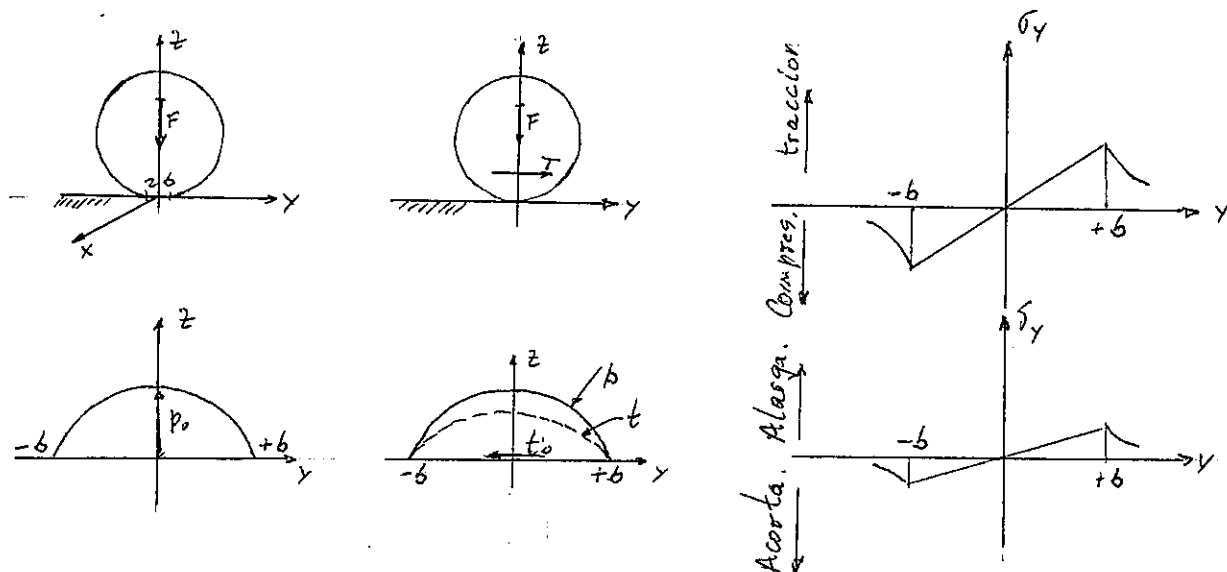
$$T < \mu \cdot F \quad \implies \quad T' = \mu \cdot F \quad \text{siendo} \quad T' < T$$

en cuyo caso se cumplirá también que

$$t' = \mu \cdot p'$$

lo cual implica que  $p'$  no puede tener la misma distribución que = la predicha por Hertz, en el caso de solo carga  $F$ , o sea,  $p' \neq p$ .

a.-  $T = \mu \cdot F$ .



En este caso se conocen las distribuciones de tensiones en el con tacto,  $p$  y  $t$  ( del lado de la esfera).

Las  $p$  se deben a la fuerza  $F$ , y son las predichas por la teoria de Hertz.

Las  $t$  son el resultado de multiplicar cada  $p$  por  $\mu$  ( $t = \mu p$ )

En estas condiciones, la teoria de Hertz permite hallar  $\sigma_y$ , y con ella, el alargamiento ( en cada punto)  $\delta_y$ . ( Todo ello se ha representado graficamente en las figuras).

Como es logico, estas deformaciones  $\delta_y$ , sobre la zona de con- tacto del cilindro con el plano ( el cual, al ser rigido, se su- pone que no se deforma) da lugar a unos microdeslizamientos en = toda el área de contacto, debido precisamente a los alargamientos = tos y acortamientos del material, que permite el deslizamiento = posterior del cilindro sobre el plano, tan pronto  $T > \mu \cdot F$

( deslizamiento macroscopico de todo el cilindro, o lo que es i- gual, el movimiento de puntos del cilindro alejados de la zona =

de influencia de la deformación de contacto).

b.-  $T < \mu \cdot F$ .

- En este caso, la experiencia enseña que no hay deslizamiento macroscópico. Pero, por supuesto, en cada punto se cumplirá que

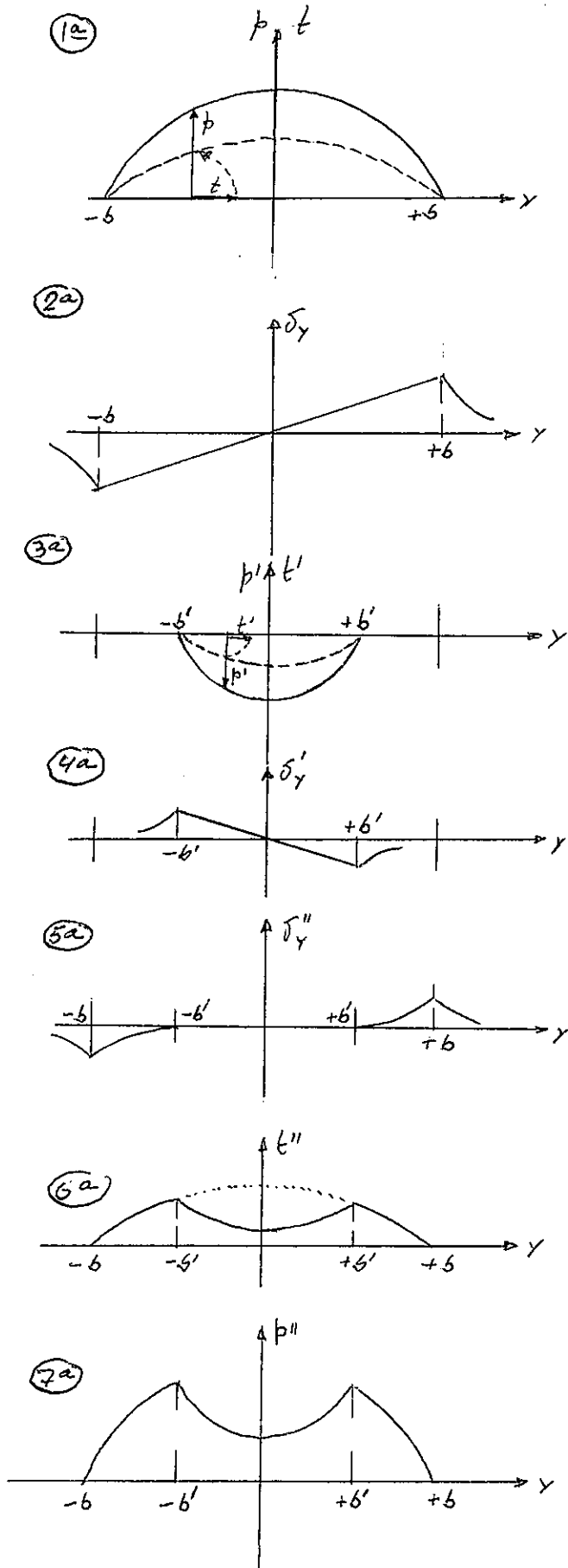
$$t = \mu \cdot p$$

solo que ahora habra una distribución desconocida de tensiones  $p$  y  $t$ , las cuales darán lugar a unas tensiones  $\sigma_y$  en la superficie. Estas tensiones han de ser tales que al menos en una cierta zona  $2b'$  del área de contacto  $2b$  no den lugar a alargamientos o acortamientos, es decir, que las deformaciones sean nulas.

La inmovilidad de esta zona del área de contacto es la que garantiza el no deslizamiento macroscópico del cilindro sobre el plano.

En las siguientes figuras se expone un método gráfico e intuitivo para hacer **ver este fenómeno.**





Se parte de la misma distribución  $t$  anterior (fig 1) en el caso límite ( inicio del deslizamiento).

En esas condiciones, el cuerpo 1 está sometido a unos alargamientos, en todos los puntos de su superficie de contacto, representados en la fig. 2a.

Si entonces suponemos que en una zona centrada, de tamaño  $2 b'$ , se aplica una distribución cortante  $t'$ , tal que en ese intervalo de lugar ( conjuntamente con la presión normal  $p'$  de magnitud aún desconocida) a un alargamiento  $\delta_y'$  en cada punto, igual y contrario al anterior, el resultado será un deslizamiento relativo nulo en todos los puntos interiores a  $2 b'$ .

$\delta_y'' = 0$  en el intervalo

$2 b'$  (fig. 5a.) (  $t'$  también

corresponderá a un caso límite, en que  $t' = \mu \cdot p'$  )

La tensión cortante resultante será la suma de las gráficas 1<sup>a</sup> y 3<sup>a</sup>, tal como se ve en 5<sup>a</sup>.

La distribución interna de presiones,  $p_z''$ , es la mostrada en la figura 7 (curva semejante a la anterior).

( Todo lo mismo podría hacerse para el cilindro 2 )

Como es obvio, a nivel macroscópico, se cumple

$$T'' = \int \mu \cdot p_z'' \cdot dy < \int \mu \cdot p \cdot dy = \mu \cdot F$$

$$T \cong T'' < \mu \cdot F$$

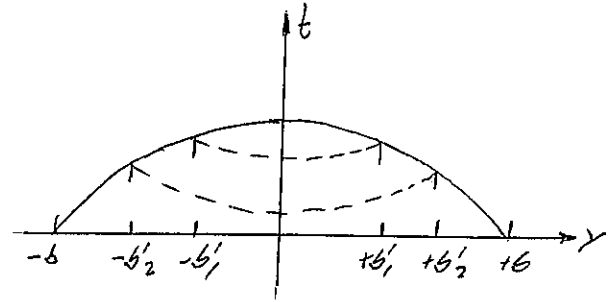
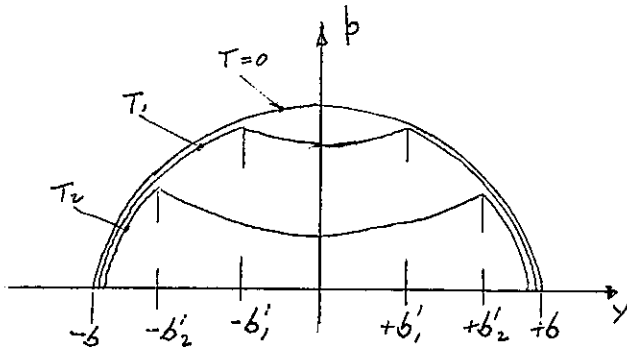
- De esta manera se puede calcular la distribución de tensiones, en un contacto de Hertz, cuando la carga tangencial es menor que la fuerza de rozamiento.

Ella muestra una importante relación entre las tensiones de Hertz ( calculadas para el caso límite, en el cual  $t$  seguía la misma ley que la  $p$  debida a la carga puramente normal, en el tema anterior) y las fuerzas de rozamiento, dando una visión totalmente nueva para estas.

El rozamiento seguido demuestra que aun cuando  $\mu$  tiene un valor constante, lo que ocurre al ir aumentando  $T$ , para una  $F$  dada, es que la zona en reposo ( de clavado - stick) va disminuyendo desde el valor inicial  $2b$ , dado por la fórmula de Hertz, (deformación debida a la carga  $F$ ), hasta un valor cero para el momento del inicio del movimiento. Es decir, la franja  $2b'$  va disminuyendo a medida que aumenta  $T$ .

En igual medida, las presiones de contacto  $p$  también van variando.

Ambos fenómenos se representan en la figura, para tres valores de  $T$ , ( y uno solo de  $F$ ).

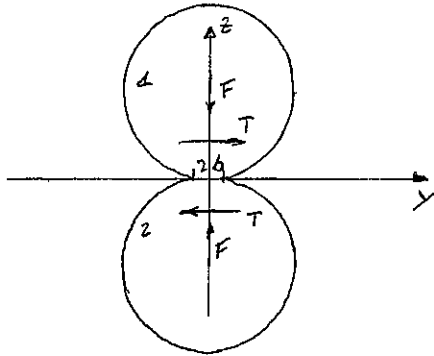


2.3.- APLICACION AL CASO DE MIEMBROS EN RODADURA.

2.3.1.- CASO DE CILINDROS RODANTES.

Supongamos dos cilindros 1,2, que se mueven con velocidades  $\omega_1$  y  $\omega_2$ , y sobre los cuales se aplica la fuerza normal F.

- En el caso de dos cilindros en contacto, la deformación y la presión debidas a la fuerza normal F valen:



$$b = \sqrt{\frac{4 F}{\pi L} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}$$

$$p_0 = \sqrt{\frac{F}{\pi L} \frac{E_1 E_2}{(1 - \nu_1^2) E_2 + (1 - \nu_2^2) E_1} \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}}$$

$$p = p_0 \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}}$$

- Al aplicar la carga T, igual en ambos cilindros ( debido a un momento motor en uno y un momento resistente en el otro), aparecen unas tensiones cortantes debidas a la fuerza de rozamiento, de valor, en cada punto

$$t = \mu \cdot p$$

Tal combinación de tensiones t, y p dará lugar a unas tensio-

nes  $\sigma_y$ , las cuales a su vez producirán unas deformaciones en las zonas de contacto de ambos cilindros.

- Al igual que vimos para cilindro y plano, son dos los casos que pueden presentarse:

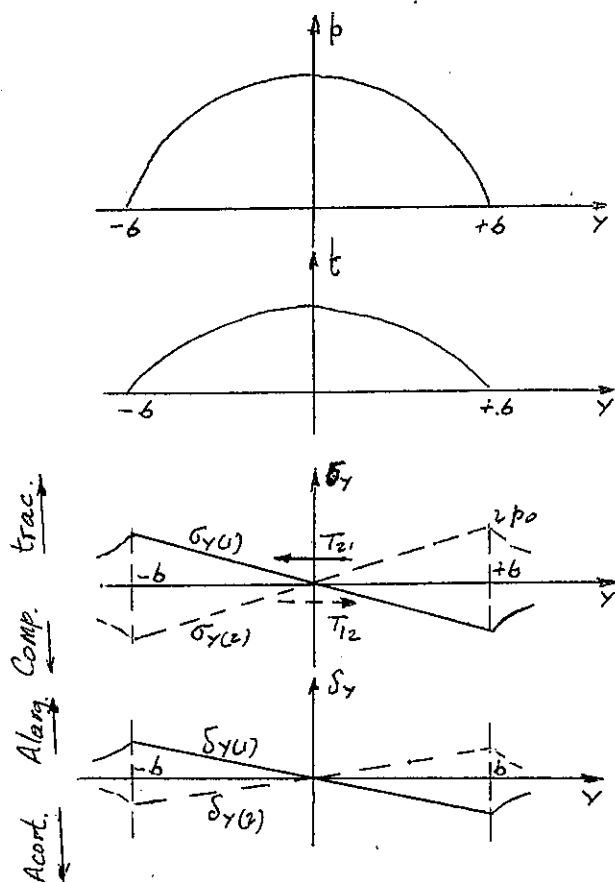
a)  $T \geq \mu \cdot F \implies t = \mu p$

b)  $T < \mu \cdot F \implies t' = \mu \cdot p' \quad p' \neq p$

a.-  $T \geq \mu \cdot F$  .

En este caso, las fuerzas elementales actuantes, sobre cada uno de los cilindros (iguales en ambos) son  $p$  y  $t$ , siendo  $p$  el valor dado por (1) y  $t = \mu \cdot p$ .

Según vimos en la teoría de Hertz, ellas dan lugar a unas tensiones  $\sigma_y$ , de distribución lineal en la zona de contacto  $2b$ , y de valor en los extremos de la misma  $2p_0$ .



Representando graficamente estos valores para los dos cilindros = se observa claramente como en el área de contacto  $2b$  se producen unos microdeslizamientos, debidos a los acortamientos y alargamientos respectivos en cada punto de la zona de contacto.

De este modo, el único punto fijo es el centro de la unión, y = el equilibrio está a punto de romperse.

Si  $T$  aumenta un poco más, ambos

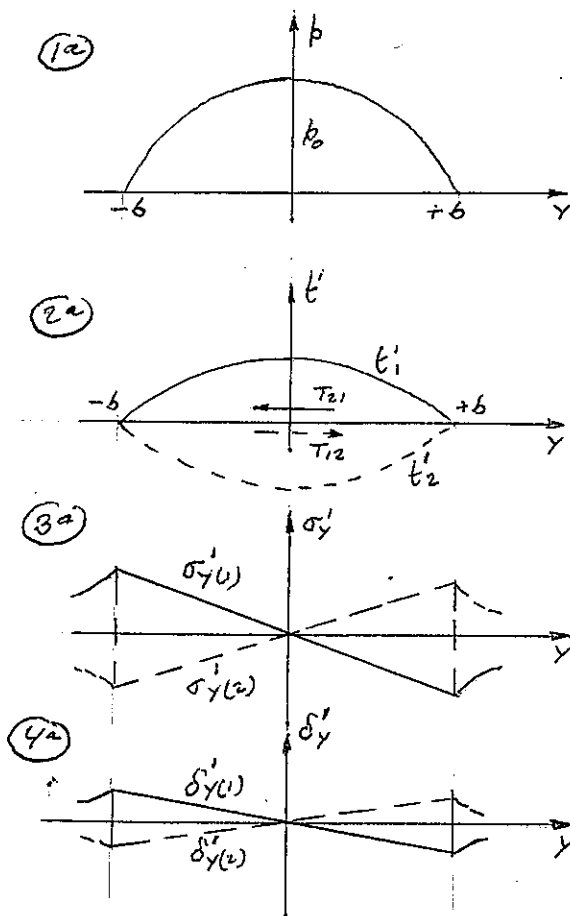
cilindros deslizan entre si.

b.-  $T < \mu \cdot F$ .

- En este caso, la experiencia indica que los cilindros no deslizan (no patinan), pero sí se observa un nuevo fenómeno. "La relación de transmisión no es constante ( $\omega_2 / \omega_1 = R_2 / R_1$ ), sino que el cilindro conducido gira un poco más lento que lo que le correspondería teóricamente por la expresión anterior."

Ello se debe, precisamente, a los fenómenos de alargamientos y acortamientos respectivos, en la zona de contacto, como tendremos ocasión de analizar a continuación.

La figura siguiente muestra, en forma intuitiva y gráfica, lo que ocurre en este tipo de contacto.

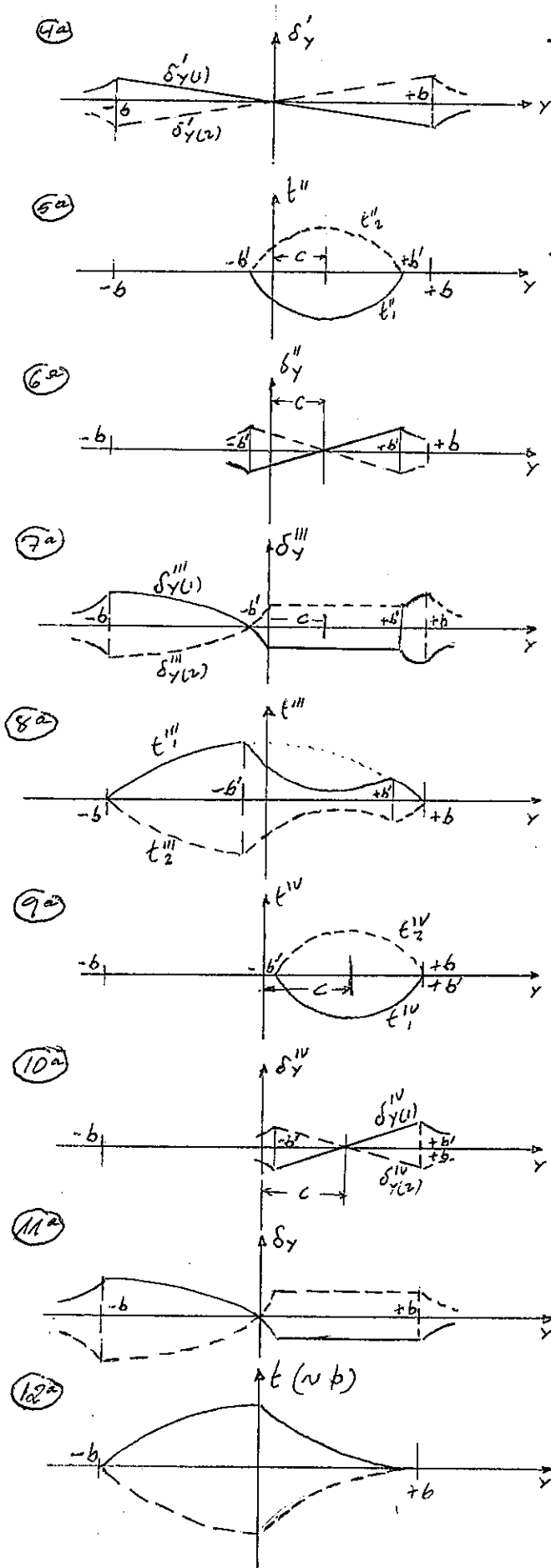


- Se parte de un valor de la presión de contacto  $p$  conocida, debida solo a la fuerza  $F$  (Fig. 1)

- También se parte de unas fuerzas elementales  $t'$  conocidas, supuesto el citado límite  $T = \mu F$

Estas serán  $t'_1$  y  $t'_2$ , iguales en módulo, pero de diferentes sentidos.

- Tales estados tensionales  $p - t'_1$  y  $p - t'_2$  provocan, en cada cilindro, unas tensiones en la superficie, y en dirección del eje  $OY$ ,  $\sigma'_{y(1)} >$



$\sigma'_{y(2)}$  ( Fig. 3)

- Estas tensiones dan lugar a = las deformaciones  $\delta'_{y(1)}$  y  $\delta'_{y(2)}$  representadas en la figura 4.

- Si ahora superponemos al estado anterior, otro estado de tensiones  $t''$ ; (fig 5), de tamaño  $2 b'$ , también límite  $( t'' = \mu \cdot p' )$ , centrado en un punto arbitrario C, el producirá, junto con la presión desconocida  $p''$  unas deformaciones  $\delta''_{y(1)}$  y  $\delta''_{y(2)}$

(Fig. 6), lineales en el intervalo  $2 b'$ , y de igual pendiente que las anteriores.

El conjunto de ambas deformaciones da lugar a la deformación total  $\delta'''_{y(1)}$  y  $\delta'''_{y(2)}$  mostrada en la figura 7.

En ella se observa que los acortamientos en el cilindro 1 permanecen del mismo valor en una zona del área de contacto ( de 0 a  $b'$  ), e igualmente ocurre con los alargamientos en el cilindro 2.

Por consiguiente, en la zona

O-b', ambos cilindros tienen un movimiento relativo nulo, debido a tales alargamientos y acortamientos.

Sin embargo, en el resto del área de contacto, los alargamientos y acortamientos respectivos varían de un punto a otro (según el eje OY), por lo cual hay un microdeslizamiento entre ambos.

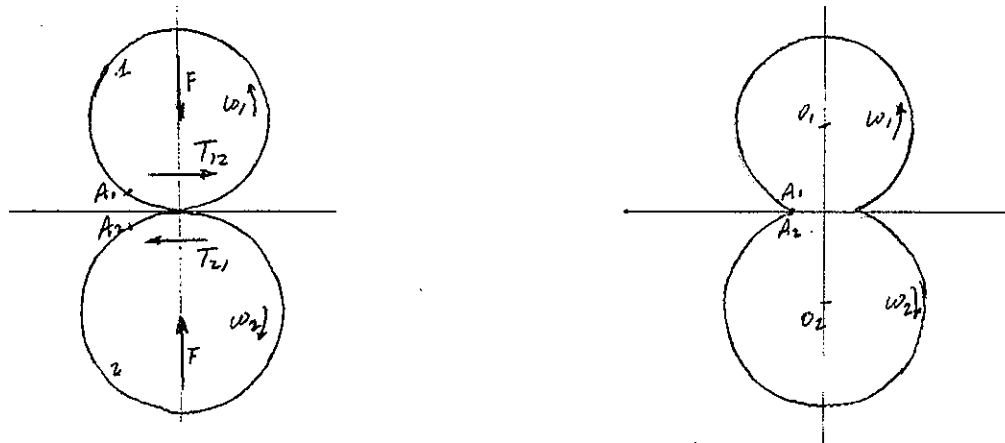
- La distribución de presiones  $p''$ , similar a la de  $t''$ , se muestra en la figura 8.

En todo punto se tiene

$$t'' = \mu \cdot p''$$

- En todo el razonamiento anterior, quedan dos matices importantes que conviene aclarar:

En primer lugar, en la zona de "reposo relativo" entre ambos cilindros, O-b', ninguno de ellos tiene una deformación nula. Precisamente, los puntos de esta zona, en el cilindro 1, están "acortados", y los puntos en contacto con ellos, pertenecientes al cilindro 2, están alargados.



Si ahora observamos el movimiento macroscópico de los cilindros 1 y 2, y en concreto en dos puntos  $A_1$  y  $A_2$  de ellos, se tiene que a medida que se aproximan al contacto, las tensiones  $\sigma_y$  aumentan, y por consiguiente, las deformaciones  $\delta_y$ . En el momento en que se tocan, las tensiones y las deformaciones son máximas



$$\sigma_{y(A_1)} = 2 p_0 \quad \text{tracción} \implies \delta_{y(A_1)} \quad \text{alarga}$$

$$\sigma_{y(A_2)} = 2 p_0 \quad \text{Compresión} \implies \delta_{y(A_2)} \quad \text{acorta}$$

luego, a medida que  $A_1$  y  $A_2$  avanzan por el eje OY, sus tensiones y alargamientos van disminuyendo, por lo cual existe un microdeslizamiento entre ambas superficies.

A continuación llega un momento en que las tensiones y deformaciones permanecen a un nivel constante, mientras los puntos  $A_1$  y  $A_2$  se desplazan por el eje OY desde  $b'$  hasta el centro O.

A partir de ese momento, las tensiones comienzan a decrecer hasta anularse en el punto K, a partir del cual comienzan de nuevo a crecer, pero en sentido contrario. En todo ese intervalo de movimiento existe un microdeslizamiento relativo entre los puntos  $A_1$  y  $A_2$ .

Pues bien, ese alargamiento y acortamiento de los puntos  $A_1$  y  $A_2$ , en los cilindros 1 y 2, al entrar en la zona de " reposo relativo" ( stick) es precisamente la causa del " retraso" del movimiento = del cilindro arrastrado.

- En segundo lugar, en el razonamiento seguido a partir de la figura 7 hay algo evidentemente erróneo, y ello es esa "disminución" de la tensión entre el momento del contacto y la estabilización de las tensiones, es decir, el tramo  $b-b'$ . En efecto, el deslizamiento relativo en ese tramo no ocurre, ni puede ocurrir, puesto que significaría un deslizamiento en la misma dirección = que la tracción  $\mu \cdot p$ , lo cual iría contra las propias leyes de la fricción ( el deslizamiento siempre ocurre en dirección contraria a la fuerza de rozamiento)

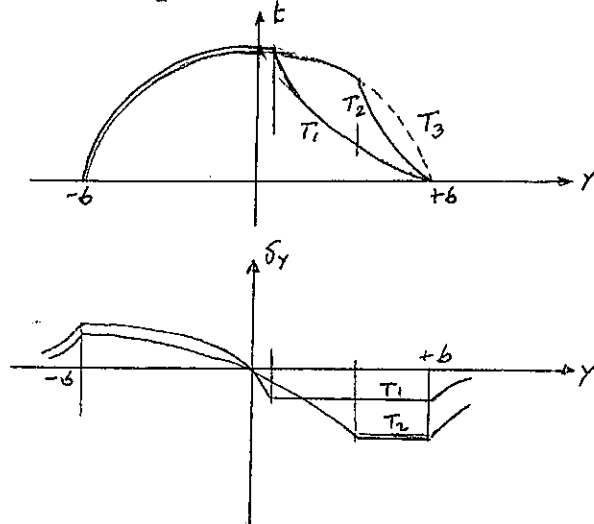
Por consiguiente, se precisa introducir una pequeña modificación

en el razonamiento seguido, que consiste en desplazar el centro C de la distribución de tensiones  $t''$  ( de tamaño  $2 b'$ ), una distancia tal que

$$C = b - b'$$

Con ello, los puntos  $+b$  y  $+b'$  coinciden, (fig 9) siendo las soluciones finales las mostradas en las figuras 11 y 12.

- Si ahora se analiza el fenómeno desde el punto de vista de las cargas, se ve claramente que para una F dada, a medida que aumenta T va disminuyendo la zona de " reposo relativo" , al tiempo que van aumentando los alargamientos y acortamientos con que se "entra" en esa zona, es decir, la diferencia entre las velocidades de los cilindros conductor y conducido. ( En la figura se ha representado el comportamiento de un solo cilindro)



- El cálculo de ese " retardo" de la velocidad puede hacerse del modo siguiente:

Supongase un punto A que dista una distancia Y del origen de coordenadas, cuando no existe carga T. Supongase ahora que debido a esa carga T, se desplaza una distancia v, en la dirección OY.

La posición del punto A vendrá dada por :  $y = Y + v$

Su velocidad será

$$\frac{dy}{dt} = \frac{dY}{dt} + \frac{dv}{dy} \frac{dy}{dt}$$

( suponiendo que  $v$  no varia con el tiempo)

Como la deformación  $v$  siempre será muy pqueña,  $y \approx Y \implies$

$$\frac{dy}{dt} \approx \frac{dY}{dt}$$

$\frac{dY}{dt} = U_A$  = velocidad de A cuando no se tiene en cuenta el alargamiento.

$\frac{dv}{dy} = \delta_A$  = alargamiento en la dirección de OY

Entonces, la velocidad " real" de A será:

$$V_A = U_A + U_A \delta_A = U_A (1 + \delta_A)$$

Considerando dos puntos  $A_1$  y  $A_2$ , uno en cada cilindro, tendríamos:

$$V_{A1} = U_{A1} (1 + \delta_{A1})$$

$$V_{A2} = U_{A2} (1 + \delta_{A2})$$

Como se cumple que  $\delta_{A1} = -\delta_{A2}$

$$V_{A1} = U_{A1} (1 + \delta_{A1})$$

$$V_{A2} = U_{A2} (1 - \delta_{A1})$$

Cuando no hay deslizamiento,  $V_{A1} = V_{A2}$ , con lo cual:

$$U_{A1} (1 + \delta_{A1}) = U_{A2} (1 - \delta_{A2})$$

$$U_{A1} - U_{A2} = - \delta_{A1} (U_{A1} + U_{A2})$$

Llamando a la velocidad tangencial media

$$U = \frac{U_{A1} + U_{A2}}{2}$$

queda finalmente

$$\frac{\Delta U}{U} = - \delta_{A1} \quad (2)$$

siendo  $\Delta U$  la diferencia entre las velocidades tangenciales de los dos cilindros ( en puntos remotos de la zona de contacto, donde las deformaciones no tienen lugar)

- Del razonamiento efectuado anteriormente se deduce que

$$\delta_{A1} = \delta'_{A1} + \delta^{IV}_{A1}$$

Como

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta'_{A1} = - \frac{\mu}{2R} y \\ \delta^{IV}_{A1} = \frac{\mu}{2R} (y - c) \end{array} \right. \quad \left( \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Moviendo los ejes hasta el centro del intervalo  $2b'$  o sea, en  $c$ , resulta:

$$y'' = y - c$$

Según estos nuevos ejes,  $\delta^{IV}_{A1}$  tiene sentido contrario a  $\delta'_{A1}$

Sustituyendo:

$$\delta_{A1} = - \frac{\mu}{2R} y + \frac{\mu}{2R} (y - c) = - \frac{\mu}{2R} c$$

Por consiguiente

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{\mu}{R} \cdot c \quad (3)$$

Esta expresión también puede ponerse en función de las cargas aplicadas F y T.

En efecto:

$$T = \text{área bajo la curva de la figura 12} = T' - T^{IV}$$

$$T = \int_{-b}^{+b} t' dy - \int_{-b'}^{+b'} t^{IV} dy = \int_{-b}^{+b} p dy - \int_{-b'}^{+b'} t^{IV} dy$$

$$T = \mu \cdot F - \mu \cdot F \left( \frac{b'}{b} \right)^2$$

( ya que  $T^{IV}$  tiene la misma forma que  $t'$ ; solo que en un ancho  $-b'$  +  $b'$ , menor)

$$T = \mu \cdot F \left[ 1 - \left( \frac{b'}{b} \right)^2 \right]$$

Como  $b' = b - c$ , puede escribirse también:

$$T = \mu \cdot F \left( 2 \frac{c}{b} - \frac{c^2}{b^2} \right) \quad (4)$$

Sustituyendo el valor de c de (3) en (4):

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{\mu b}{R} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{T}{\mu \cdot F} \right)^{1/2} \right] \quad (5)$$

Expresión que permite hallar  $\Delta U$ , conocidas la velocidad media  $U$  y las cargas  $T$  y  $F$ .

En esta expresión se observa que sólo cuando  $T = 0$  habrá rodadura pura, sin deslizamiento; en consecuencia, no habrá "retardo" en la velocidad (  $\Delta U = 0$  ).

A medida que aumenta  $T$ ,  $\Delta U$  se hace mayor.

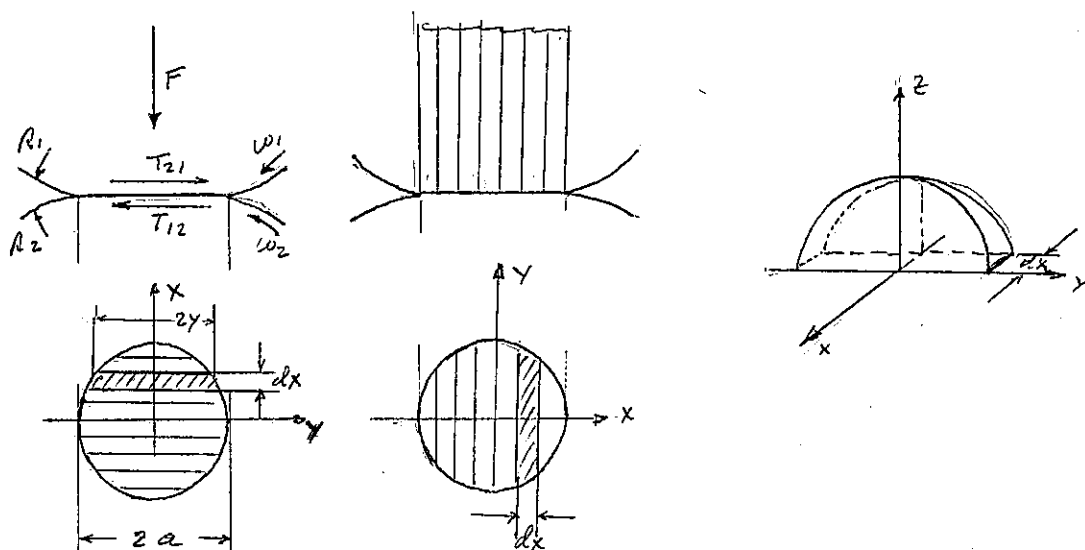
2.3.2.- CASO DE DOS ESFERAS EN CONTACTO.

- Supongamos dos esferas girando con las velocidades  $\omega_1$  y  $\omega_2$ , y sobre las que se aplican las fuerzas F (normal) y T (tangencial). Según Hertz, la presión de contacto debida a F vale:

$$p = \frac{3 F}{2 \pi a^2} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{a^2}}$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{3 F}{4} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}$$

- Para los efectos de nuestro estudio, el caso de dos esferas puede asimilarse al de una serie de cilindros elementales, de espesor dx, tal como se ve en la figura.



La carga total en el ancho dx será:

$$F(dx) = dx \left[ \frac{3 F}{2 \pi a^2} \int_{-(a^2 - y^2)^{1/2}}^{+(a^2 - y^2)^{1/2}} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{a^2}} dy \right] =$$

$$= \frac{3 F}{4 a^3} (a^2 - x^2) dx$$

la carga por unidad de ancho será

$$F' = \frac{F(dx)}{dx} = \frac{3 F}{4 a^3} (a^2 - x^2)$$

- Excepto para el caso límite, en que  $t = \mu p$  y  $T = \mu F$ , en cada elemento de anchura  $dx$ , la solución del problema es muy complicada, y no existe aún una respuesta satisfactoria.

- Sin embargo, existe otro modo de enfocar el problema, que nos == puede llevar a comprender mejor lo que sucede.

Se basa en la suposición de que el tamaño de las esferas es grande comparado con la zona de contacto; entonces puede admitirse = que las velocidades  $U_1$  y  $U_2$ , correspondientes al cuerpo rígido, son las mismas en todos los cilindros elementales de espesor  $dx$ .

$$U_1 = \omega_1 R_1$$

$$U_2 = \omega_2 R_2$$

Sustituyendo estos valores en la Ec.  $\frac{\Delta U}{U} = \frac{\mu}{R} c$ ,

se obtiene:

$$\frac{\mu}{R} c = \frac{\omega_1 R_1 - \omega_2 R_2}{\omega_1 R_1 + \omega_2 R_2} = \frac{j - \frac{R_2}{R_1}}{j + \frac{R_2}{R_1}}$$

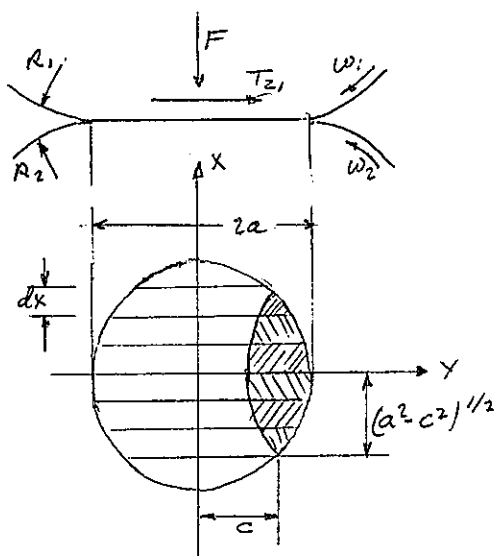
siendo

$$j = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$



Este resultado sugiere que  $c$  es el mismo para todos los cilindros elementales, lo que dado sus diferentes radios, llevaria a considerar una zona de " reposo relativo" como la que se ve en la figura

rayada.

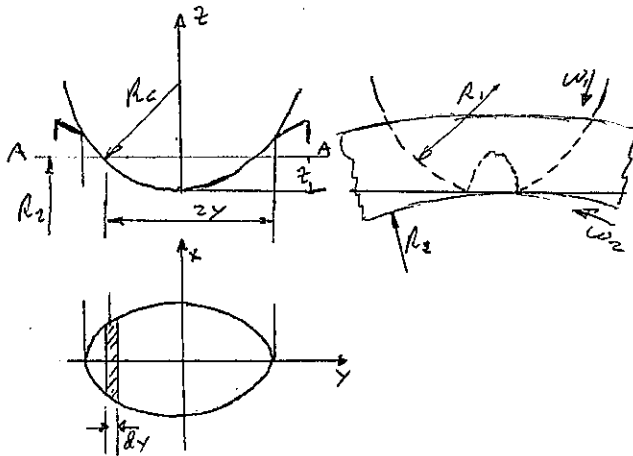


En ella se observa que las dos franjas extremas están todas en deslizamiento relativo (microdeslizamiento)

Las demás franjas poseen una zona de " reposo relativo", y en todas ellas, los puntos  $c$  están alineados ( tienen el mismo valor de  $y$ ).

2.3.3.- CASO DE ESFERA Y ANILLO DE RODADURA.

- También en este caso puede aplicarse la misma simplificación del punto anterior, asimilando el conjunto a una serie de cilindros de fricción de ancho  $dx$ . Solo que en este caso las velocidades  $u$  valdrán ( si A-A es la línea de rodadura)



$$U_1 = \omega_1 ( R_1 - z )$$

$$U_2 = \omega_2 ( R_2 + z )$$

siendo  $z$  la ordenada correspondiente a los particulares cilindros de ancho  $dy$  y  $R_c$  el radio de curvatura común en dicho punto.

En la figura se ve que

$$z = R_c - ( R_c^2 - y^2 )^{1/2} = R_c - R_c ( 1 - \frac{y^2}{R_c^2} )^{1/2}$$

y como  $y$  y  $z$  son normalmente pequeños frente a  $R_1$

$$z = R_c - R_c + \frac{y^2}{2 R_c} - \dots \approx \frac{y^2}{2 R_c}$$

Con esto se tiene:

$$U_1 = \omega_1 ( R_1 - \frac{y^2}{2 R_c} )$$

$$U_2 = \omega_2 ( R_2 + \frac{y^2}{2 R_c} )$$

Sustituyendo en la ecuación  $\frac{\Delta U}{U} = \frac{\mu}{R} c$ , se tiene:

$$\frac{\mu}{R} c = \frac{\omega_1 \left( R_1 - \frac{y^2}{2R_c} \right) - \omega_2 \left( R_2 - \frac{y^2}{2R_c} \right)}{\omega_1 \left( R_1 - \frac{y^2}{2R_c} \right) + \omega_2 \left( R_2 + \frac{y^2}{2R_c} \right)}$$

$$\frac{\mu}{R} c = \frac{\left( j - \frac{R_2}{R_1} \right) - \frac{y^2}{2R_c R_2} (1 + j)}{\left( j + \frac{R_2}{R_1} \right) + \frac{y^2}{2R_c R_2} (1 - j)} ; \left( j = \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)$$

Siendo

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \text{y} \quad j = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

Como siempre será  $j = \omega_1 / \omega_2 \approx R_2 / R_1$ , los dos términos del numerador son del mismo orden de magnitud, mientras que el segundo sumando del denominador siempre será mucho más pequeño que el primero ( $y^2$  es mucho menor que  $R_c$ )

En consecuencia:

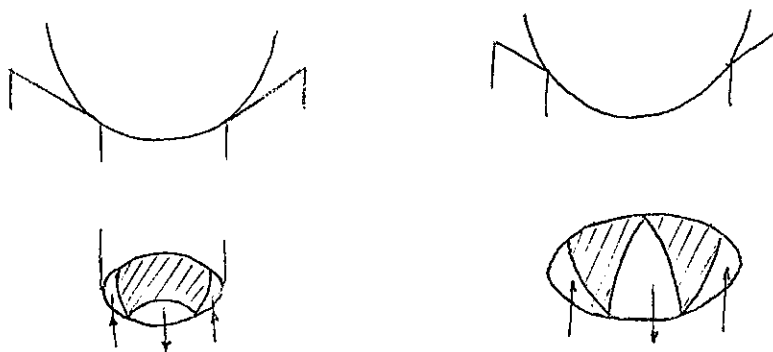
$$\frac{\Delta U}{U} c \approx \frac{\left( j - \frac{R_2}{R_1} \right) - \frac{y^2}{2R_c R_2} (1 + j)}{\left( j + \frac{R_2}{R_1} \right)}$$

Esta ecuación muestra que para un cilindro elemental de ancho  $dy$ , situado en la cota  $y$ ,  $c$  es una función cuadrática de  $y$ .

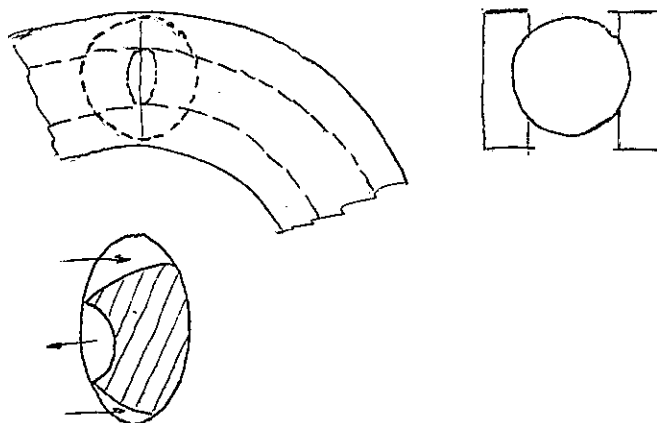
Además,  $c$  será nulo cuando

$$y^2 = 2 R_c R_2 \left( \frac{j - R_2/R_1}{1 + j} \right)$$

Esto indica que la distribución de zonas de "microdeslizamiento" y de "reposo relativo" siguen una forma parecida a las representadas en las figuras, notándose que el grado de deslizamiento es tanto mayor, cuanto más "cerrado" sea el camino de rodadura.



En el caso de que el camino de rodadura tenga una curvatura como = la mostrada en la figura ( caso de cojinetes de rodamientos, de empuje), el resultado sería aproximadamente el que se muestra en la figura.



(observese, en este caso, la asimetría de las zonas de deslizamiento y "reposo relativo" ).

### 3.- COMPOSICION Y TOPOGRAFIA DE LAS SUPERFICIES DE LOS ELEMENTOS DE MAQUINAS.

#### 3.1.- COMPOSICION DE LAS SUPERFICIES DIFERENTES CAPAS.

Las superficies de los elementos de máquinas están compuestas de una serie de capas o estratos, de diferente espesor, y que pueden ser divididas en dos grupos:

- a.- Capas internas al material.
- b.- Capas externas al material.

Las capas internas son dos:

- a.- Capa deformada por el mecanizado, o capa trabajada.
- b.- Material base, o sustrato, formada por el material original.

En algunos casos, la capa deformada por el mecanizado puede incluir impurezas debido al mismo proceso. En cuanto al material base también puede contenerlas, dependiendo del proceso de metalurgia, conformación, etc.

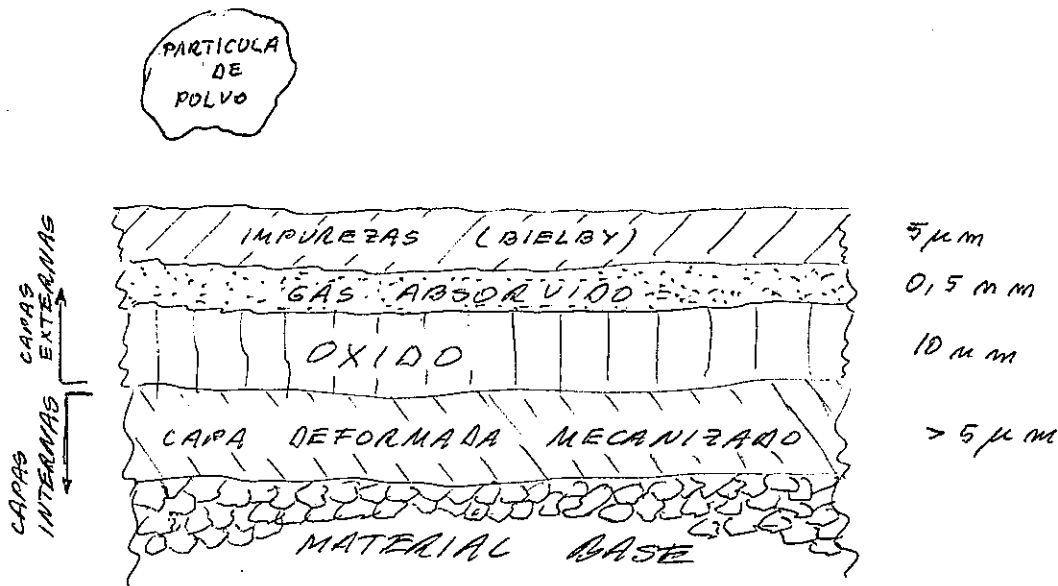
En cuanto a las capas externas, pueden considerarse:

- a.- Capa de óxido, resultado de la reacción con el aire.
- b.- Capa de gas absorbido, los cuales a veces presentan propiedades diferentes a aquellas de los mismos gases libres en el entorno.
- c.- Capa de contaminantes o impurezas (llamada capa Bielby), producida por la fusión de par

metálicas durante el maquinado, que fluyen hacia la superficie, recibiendo una especie de temple al depositarse en ella ( que se encuentra más fría), quedando, por consiguiente, más dura.

Tanto la capa de gas como la de óxido forman parte también de esta capa contaminante, penetrando más o menos en ella.

Los espesores " normales" de cada una de ellas se muestran en la figura adjunta:



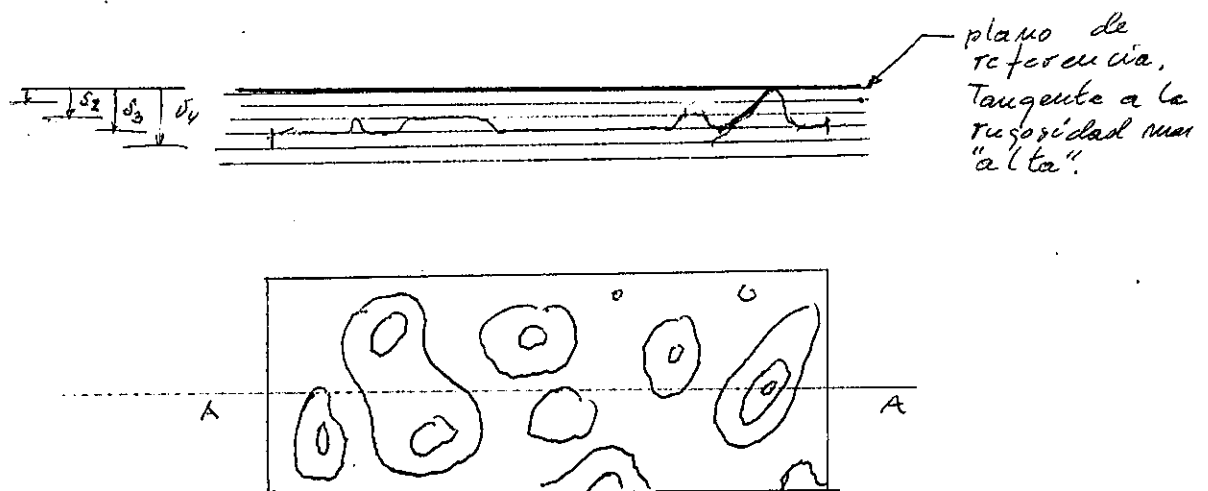
Como se ve, las características superficiales de los elementos de máquinas, en cuanto a su composición, no dependen solo de la naturaleza del material, sino también del tipo de conformación, ambiente que le rodea, etc.

3.2.- TOPOGRAFIA DE LAS SUPERFICIES, PARAMETROS ESTADISTICOS.

Desde un punto de vista geométrico, las superficies de los elementos de máquinas presentan una serie de irregularidades, mostrando diferentes amplitudes y frecuencias.

Aunque ello ya se trató al hablar de los procesos de conformación de los elementos de máquinas, conviene recordar algunos de los conceptos más significativos.

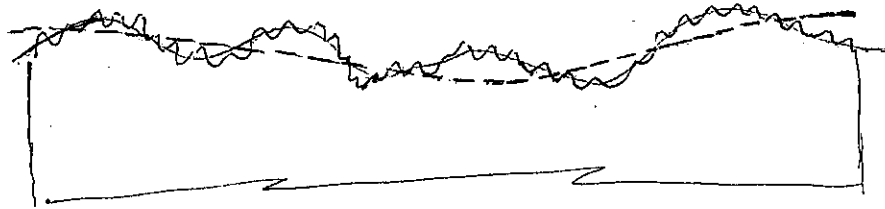
Cuando a una superficie la seccionamos por una serie de planos horizontales y verticales, obtenemos una representación cartográfica parecida a la de la figura



Las rugosidades superficiales pueden a su vez diferenciarse en tres grupos:

- a.- Ondulaciones de gran longitud, causadas por las vibraciones de los utiles de trabajo durante el proceso de conformación.
- b.- Macrorugosidades, formadas por fluctuaciones de la superficie, de mucho menor longitud que las ondulaciones anteriores.

c.- Microrugosidades, también llamadas asperezas, ca-  
racteriza por una " colina" seguida de un valle.  
Como es lógico, los tres tipos de rugosidades se su-  
man, dando lugar a la topografía de la superficie, co-  
mo se ve en la figura.



- Dado que, como veremos más adelante, el rozamiento y el desgaste dependen fundamentalmente del área real de contacto entre las superficies, y estas, a su vez, dependen de las distribuciones, tamaños y formas de las asperezas, es importante definir estas con el mayor rigor posible. Naturalmente, ello solo puede hacerse en terminos estadísticos, apoyados en mediciones realizadas con aparatos adecuados, que no hace al caso ver aquí.
- Los parámetros más usados para medir el estado de las superficies pueden resumirse en los siguientes:

a.- Perfil único  $y = f(x)$

- 1.- Valor medio ( Centre Line Average C.L.A.) ( $Z_1$ )
- 2.- Valor cuadrático medio ( Root Mean Square R.M.S.) ( $Z_2$ )
- 3.- Autocorrelación ( $Z_3$ )
- 4.- Espectro de densidad de potencia ( $Z_4$ )
- 5.- Valor de oblicuidad ( Skewness) ( $Z_5$ )
- 6.- Kurtosis ( $Z_6$ )

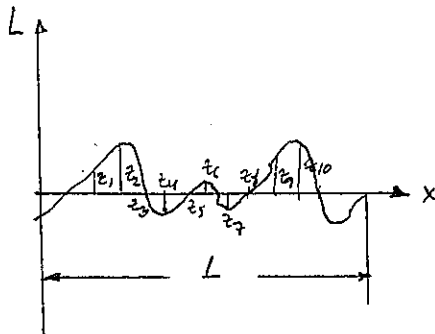


b.- Comparación entre dos perfiles ( de la misma pieza, lógicamente)

7.- Correlación cruzada.

8.- Espectro de densidad de potencia cruzada.

1.- Valor medio.



$$C.L.A. = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L |Z_i|$$

( L= longitud del perfil)

$$C.L.A. = Z_1 = \frac{1}{L} \int_0^L |f(x)| dx$$

( La línea central se toma de manera que la suma de las áreas por la parte superior sea igual que la inferior)

( Como se ve, no informa sobre formas, tamaños y pendientes de las asperezas).

2.- Valor cuadrático medio.

$$R.M.S. = Z_2 = \left[ \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (Z_i)^2 \right]^{1/2}$$

$$Z_2 = \left[ \frac{1}{L} \int_0^L f^2(x) dx \right]^{1/2}$$

(también caben las mismas observaciones que el caso anterior)

3.- Autocorrelación

$$Z_3 = \frac{1}{L} \int_0^L f(x) f(x + \Delta) dx$$

siendo  $\Delta$  el intervalo de " dilatación", de valor constante.  
 ( para  $\Delta = 0$  ,  $Z_3 \equiv Z_2$  )

4.- Espectro de densidad de potencia.

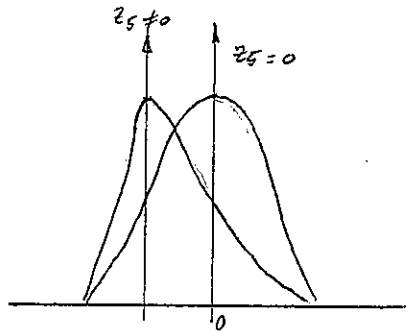
$$Z_4 = S( w ) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Z_3 e^{-iwt} dt$$

siendo  $S(w)$  la transformada de Fourier de  $Z_3$  y  $w$  la frecuencia

5.- Oblicuidad.

$$Z_5 = \frac{1}{\sigma^3} \int_{-\infty}^{\infty} |f(x)|^3 dx$$

siendo  $\sigma$  la desviación típica

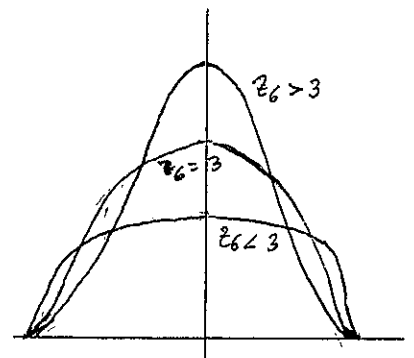


(da idea de la asimetría de la distribución)

6.- Kurtosis.

$$Z_6 = \frac{1}{\sigma^4} \int_{-\infty}^{\infty} |f(x)|^4 dx$$

( da idea de lo " achatado" o "puntiagudo" de la distribución)



7.- Correlación cruzada.

$$y_1 = f_1(x)$$

$$y_2 = f_2(x)$$

$$Z_7 = \frac{1}{L} \int_0^L f_1(x) f_2(x + \Delta) dx$$

8.- Densidad espectral cruzada.

$$y_1 = f_1(x)$$

$$y_2 = f_2(x)$$

$$Z_8 = F(w) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Z_4 e^{-iwt} dt$$

NOTA: También se emplean, moderadamente:

$$Z_9 = \left[ \frac{1}{L} \int_0^L \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 dx \right]^{1/2}$$

$$Z_{10} = \left[ \frac{1}{L} \int_0^L \left( \frac{d^2y}{dx^2} \right)^2 dx \right]^{1/2}$$

-  $Z_9$  mide la rapidez de elevación en la pendiente de las asperezas.

-  $Z_{10}$  mide el grado de deformación de los picos de las asperezas.

$$Z_{11} = \frac{\sum (\Delta x_i)_{\text{positivos}} - \sum (\Delta x_i)_{\text{negativos}}}{L}$$

Representa el porcentaje de distancias a lo largo del perfil donde las pendientes de las asperezas son positivas, sobre aquellas donde las pendientes son negativas. ( Por ejemplo, la textura del pavimento de una carretera, en las proximidades de una señal de STOP, debido a las frenadas de los vehiculos,

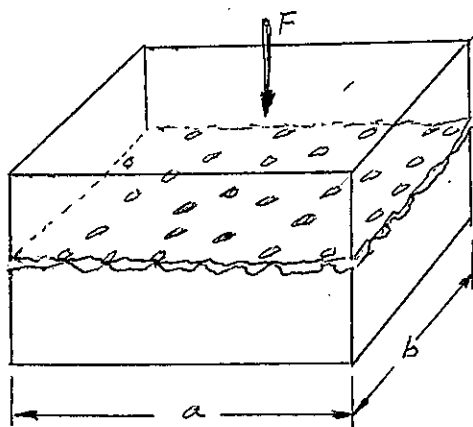
mientras un valor positivo de  $Z_{11}$ , debido a la asimetría de las rugosidades).

#### 4.- ANÁLISIS DEL PROCESO DE CONTACTO ESTÁTICO ENTRE ELEMENTOS DE MÁQUINAS CON SUPERFICIES " REALES " .

##### 4.1.- AREAS REAL Y APARENTE.

Una vez vista la topografía real de las superficies de los elementos de máquinas, caben hacer varias observaciones respecto = del contacto entre ellas:

- 1º.- Dado que el contacto siempre se establecerá entre las asperezas de ambos miembros ( al menos, en tres de ellas, inicialmente), el área real de contacto siempre será menor que el area teorica de contacto ( área aparente)



Si  $A_i$  es el área media de cada una de las asperezas en contacto, (n)

$$A_r = \sum_{i=1}^n A_i$$

El área aparente será:

$$A_o = a \cdot b$$

y siempre ocurrirá que

$$A_r \leq A_o$$

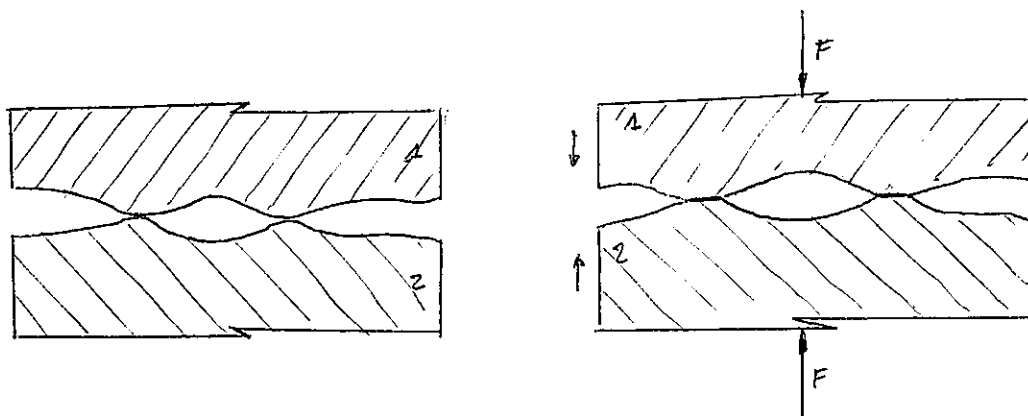
Obviamente, el área real de contacto es proporcional al número de asperezas en contacto.

- 2º.- El proceso de contacto comienza tocándose, al menos, tres asperezas, por sus puntas.

En este caso, la presión que se alcanza entre ellas será:

$$p = \frac{F}{\sum A_i}$$

Como es lógico, por pequeña que sea la carga  $F$ , la  $p$  será muy elevada, alcanzándose rápidamente el límite de fluencia  $S_F$ . En este momento, las asperezas se deformarán plásticamente, aumentando ligeramente sus respectivas áreas de contacto.



Durante este proceso de deformación plástica, los cuerpos 1 y 2 se acercarán ligeramente, lo que será causa de que entren en contacto las puntas de más asperezas. Por ello, ocurre que no se siguen incrementando las áreas de las impurezas en contacto, ya que los incrementos de la carga  $F$  son absorbidos por la aparición de nuevos contactos.

Puede afirmarse, en consecuencia, que el área de contacto entre asperezas solo depende del tamaño de estas (topografía de la superficie) y no de la carga aplicada.

39.- Evidentemente, debe haber una relación directa entre la carga aplicada y el área real de contacto.

En efecto, podemos adelantar que

$$A_r \approx K \cdot F$$

es decir, existe una relación lineal entre la carga aplicada y el área real de contacto.

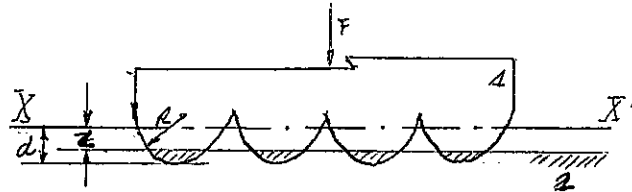
Según Archard

$$A_r = K \left( \frac{F}{E} \right)^c \quad \text{siendo} \quad 4/5 < c < 44/45$$

Ya se habrá observado que esta evidencia experimental introduce una pequeña diferencia respecto a los cálculos efectuados con la teoría de Hertz, para los cuales el área de contacto (recuérdese que se trataba de superficies ideales) era

$$A_o = A_r = K \cdot F^{2/3}$$

Incluso, si nosotros suponemos que una superficie rugosa está formada por una serie de asperezas semiesféricas idénticas, e igualmente espaciadas, y que no existe ninguna interacción entre ellas durante el proceso de deformación, entonces, al presionarse la contra una superficie plana perfectamente lisa (ideal) puede obtenerse la relación entre la carga aplicada y el área real de contacto.



Si  $z$  es la altura de las asperezas respecto al plano de referencia  $xx'$  y  $d$  es la separación entre la superficie 2 y dicho plano, la deformación vendrá dada por

$$z - d$$

Cada aspereza se deforma lo mismo, y cada una soporta una carga  $F_i$ .

Si hay  $n$  asperezas por unidad de área, la carga por unidad de =

Área será  $n F_i$ .

Para cada aspereza, la teoría de Hertz ( contacto esfera-plano) nos da:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3 F_i}{4} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) R}$$

siendo  $R$  el radio de la aspereza y  $a$  el radio de la sección de contacto.

Llamando

$$\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} = \frac{1}{E'}$$

$$a^3 = \frac{3 F_i}{4} R \frac{1}{E'} \implies F_i = \frac{4}{3} E' \frac{a^3}{R}$$

Como

$$A_i = \pi a^2, \text{ queda al sustituir:}$$

$$F_i = \frac{4}{3} \frac{E'}{R} \left( \frac{A_i}{\pi} \right)^{3/2}$$

Por unidad de área se tendrá:

$$F = \frac{4}{3} \frac{E'}{R} \frac{1}{\pi^{3/2}} (n A_i)^{3/2}$$

$$F = \frac{4}{3} \frac{E'}{R \cdot \pi^{3/2} \cdot n^{1/2}} A_r^{3/2} \implies$$

$$F = K' \cdot A_r^{3/2}$$



Esta relación de  $F$  con  $A_r^{3/2}$  supone dos limitaciones: Una, que las asperezas se reparten en forma homogénea por toda la superficie, y que además, son todas idénticas. Otra, que el contacto entre asperezas es de tipo elástico.

Como sabemos, ambos supuestos son erróneos.

La primera de ellas significa que si se admite una distribución normal (tipo Gauss) en las alturas de las asperezas (y por tanto, no todas las esferas ideales anteriores, idénticas) entonces

$$\phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_d^{\infty} e^{-\frac{1}{2}z^2} \cdot dz$$

representa el número de asperezas de radio superior a  $d$ , y que por tanto pueden entrar en contacto con el plano 2.

Entonces, si  $n$  es el número de asperezas por unidad de área, el número total de asperezas que por unidad de área entrarán en contacto serán:

$$= n \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_d^{\infty} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz$$

Pues bien, teniendo en cuenta este hecho, las formulas de Hertz = quedan reducidas a una relación lineal entre la carga normal aplicada y el área real de contacto

$$F = K' \cdot A_r$$

En cuanto a admitir que todas las deformaciones de las asperezas son de tipo plástico, nos lleva directamente a una expresión lineal entre  $F$  y  $A_r$ .

En efecto, si suponemos que la deformación plástica tiene lugar solo en dirección vertical, y que ella no afecta a las asperezas vecinas ( el área de contacto permanece inalterable), si  $p$  es la presión alcanzada ( lógicamente superior a  $S_F$  ) se tendrá que la carga soportada por cada aspereza será:

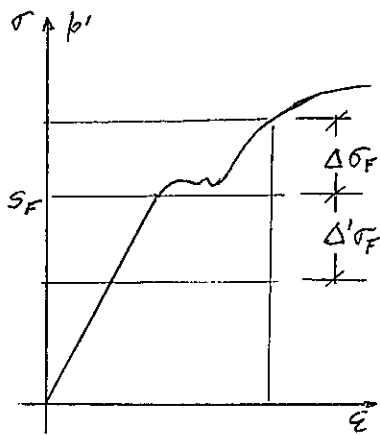
$$F_i = p A_i$$

Si hay  $n$  asperezas en contacto, por unidad de área, la carga total ( por unidad de área) será

$$F = n p A_i = p A_r$$

(Igualmente ocurrirá que  $F = K' A_r$  si se supone una distribución estadística de las asperezas).

Finalmente, el caso más real será aquel en que parte de los contactos sean de tipo plástico, y parte de tipo elástico.



La carga total  $F$  será repartida sobre algunas asperezas deformadas plásticamente ( pasado el límite de fluencia) y otras aún dentro del período elástico.

Entonces, podrá ponerse:

$$F = ( S_F + \Delta\sigma_F ) \sum_{i=1}^n A_i + ( S_F - \Delta'\sigma_F ) \sum_{i=1}^n A_i$$

siendo  $n$  el número de asperezas en contacto plástico y  $(m-n)$  el número de asperezas en contacto elástico.

Si se admite que en cualquier distribución estadística de aspere-

zas, el número de ellas que a un cierto nivel de tensión por encima del límite elástico es aproximadamente igual a aquellas que están al mismo nivel, pero por debajo del límite elástico (valores absolutos de niveles), es decir,

$$\Delta\sigma_F \sum_{i=1}^n A_i = \Delta\sigma_F \sum_{i=n}^m A_i$$

entonces quedará:

$$F = S_F \sum_{i=1}^n A_i + S_F \sum_{i=n}^m A_i$$

$$F = S_F \sum_{i=1}^m A_i = S_F \cdot A_r$$

en definitiva:

$$F = K \cdot A_r$$

En resumen, del análisis del contacto entre dos sólidos con superficies reales, se extraen las siguientes importantísimas conclusiones, de cara al posterior estudio del rozamiento:

- a.- El área real de contacto  $A_r$  es proporcional a la carga normal aplicada  $F$ , con independencia del tipo de deformación que ocurra en las asperezas.
- b.- El área de los microcontactos (entre asperezas) permanece constante, e independiente del valor de la carga aplicada.
- c.- Los contactos elásticos y/o plásticos entre asperezas tienen lugar con independencia de la carga aplicada  $F$ .

NOTA: A pesar de todo lo dicho, las fórmulas de Hertz siguen siendo válidas en el dominio de las grandes cargas, en las cuales  $A_r$  y  $A_o$  se aproximan bastante.

#### 4.2. FISICOQUIMICA DEL CONTACTO. FUERZAS DE ADHESION.

En el proceso de deformación plástica de las asperezas que acabamos de ver, es lógico suponer que debido a las altas presiones que se alcanzan, se consigue una unión muy íntima entre los dos metales en contacto ( salvando la existencia de impurezas, que más tarde veremos su importancia)

Este contacto íntimo permite que las fuerzas moleculares interactúen a través de esta superficie originándose vinculos interfaciales que dan lugar a una unión por adhesión. Esta se caracteriza porque los diferentes tipos de fuerzas moleculares pueden actuar a través de la unión, tales como: Fuerzas de Van der Waals ( campos electromagnéticos fluctuantes entre ambos cuerpos, que se manifiestan sobre una distancia bastante mayor que el diámetro atómico), fuerzas electrostáticas ( campos electrostáticos , manifestados en distancias mayores que el diametro del atomo de metal), fuerzas de enlace metálico ( debidas al intercambio de electrones de la capa superficial, entre ambos metales en contacto), enlaces covalentes ( fuerzas debidas a la compartición de electrones entre los atomos vecinos de ambos cuerpos)

Todas estas fuerzas pueden actuar conjunta o separadamente, y pueden dar lugar a una unión entre las dos asperezas tan solida como la del propio metal base. ( tal ocurre, por ejemplo, con dos piezas de oro puestas en contacto, y sometidas a una carga normal F). Cuando dos metales se aproximan, entrando sus asperezas en íntimo contacto, las primeras fuerzas que se dejan sentir son las de "larga distancia", tales como las de Van der Waals y las electrostáticas. Posteriormente, cuando la aproximación es del mismo orden que la magnitud de los diámetros atómicos, empiezan a manifestarse las fuerzas de " corta distancia", debidas a los enlaces metálicos o

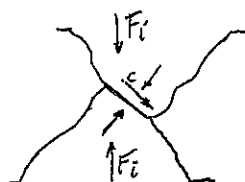
covalentes.

Estas últimas son las que llevan a uniones tan resistentes como = las del propio metal. ( ya que en definitiva, las uniones interatómicas, en el seno de un metal, son del mismo tipo)

NOTA: Todas estas fuerzas actúan, tanto en materiales similares, como diferentes. En este último caso, la resistencia de la unión puede incluso ser mayor que la del metal base más débil.

Las fuerzas de adhesión entre asperezas en contacto pueden verse disminuidas por dos causas.

En primer lugar, como es lógico, por la presencia de la = capa contaminante y en segundo lugar por la carencia de ductilidad entre las asperezas en contacto, lo cual conduce a su rotura por efecto de la tensión tangencial C.

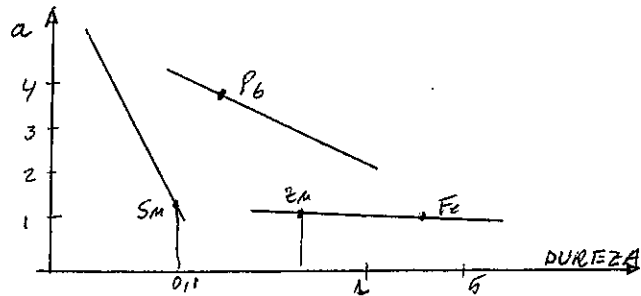


Experimentalmente, la fuerza de adhesión se mide por la fuerza  $F_A$  que se necesita para separar las superficies.

Así se obtiene un coeficiente de adhesión "a", de valor

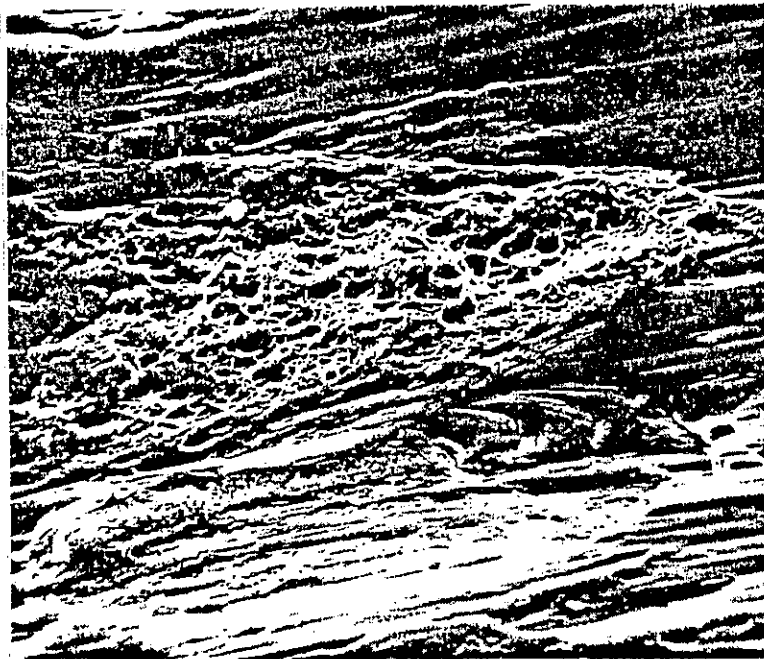
$$a = \frac{F_A}{F_c}$$

En la figura se muestra la correlación entre los coeficientes de adhesión para diferentes materiales, y la dureza Vickers del metal base



Los resultados de los ensayos indican que el coeficiente de adhesión decrece cuando se incrementa la dureza ( e igualmente, cuando aumenta el módulo de elasticidad), y que depende de los diferentes tipos de estructura cristalina.

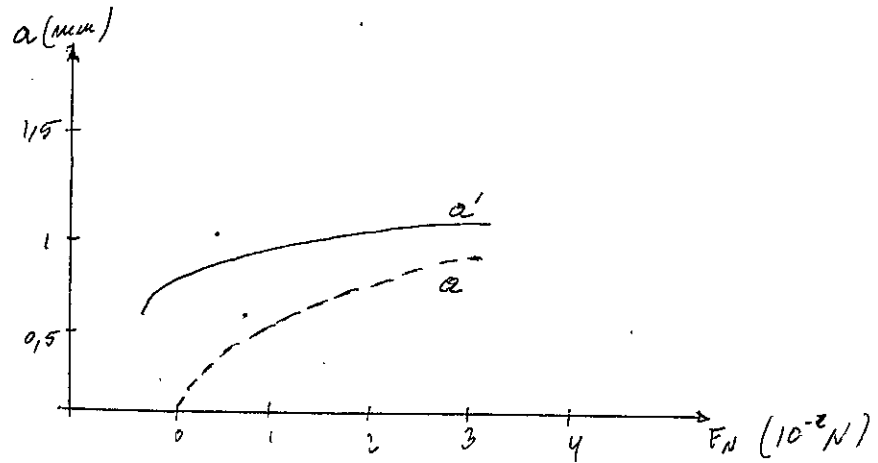
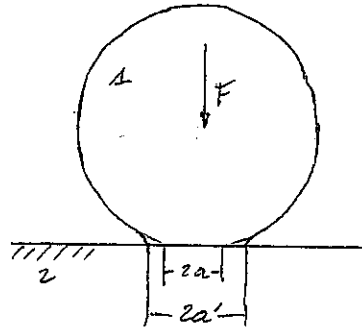
Como se ve en la figura adjunta, la apariencia típica de una rotura de una unión de los mismos metales ( en este caso, cobre-cobre) tiene la apariencia de una fractura dúctil.



En todo caso, ha de tenerse presente que el coeficiente "a" no es una característica de cada material, sino del sistema formado por los dos materiales en contacto (excepto en el caso de que ambos sean idénticos), de las impurezas y estado superficial, etc.

Finalmente, es interesante hacer notar que la superficie

de contacto entre una esfera y un plano, ambos perfectamente lisos, debería ser mayor por causa de las fuerzas de adhesión, como se ve en la figura.





#### 4.3.- ENERGIA DISIPADA EN EL FENOMENO DE CONTACTO ESTATICO.

Aunque a primera vista puede parecer que el contacto estático entre dos cuerpos ( sin deslizamiento) no disipa energía, ahora estamos en condiciones de comprender que ello no es así, y que el contacto entre dos sólidos, sometidos a una carga puramente radial, es un proceso de cierta irreversibilidad, donde algo de energía se pierde.

En efecto, en el proceso de contacto mecánico hay que considerar:

- 1º.- Microdeslizamientos interfaciales en la zona de contacto, = resultado de las diferentes propiedades elásticas ( diferentes E), motivadas por los diferentes microalargamientos debidos a las tensiones de Hertz.
- 2º.-Supuesto que los contactos adhesivos bloqueen estos microdesplazamientos, es evidente que en el proceso de carga-descarga algo de energía se pierde, debido a la histéresis elástica.
- 3º.- En caso de contactos intermitentes ( variaciones de la carga normal F ), se producen no solo los microdeslizamientos mencionados anteriormente, sino también unas " ondas elásticas" que se propagan en el seno de los materiales, y que causan también una cierta perdida de energía.
- 4º.- Las microsoldaduras formadas por la adhesión implican también un cierto proceso irreversible, que conlleva una cierta disipación de energía.
- 5º.- Finalmente, asociado a la deformación plástica de las asperezas existe también una importante disipación de energía.

- Por todas estas razones, puede asegurarse que el simple contac-

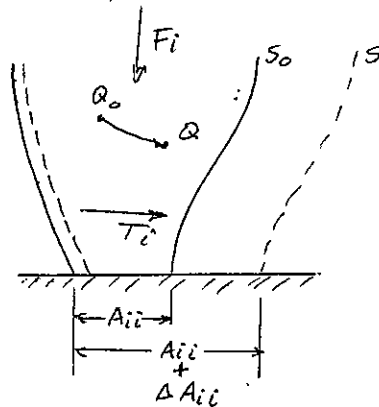
to entre dos sólidos ( repetitivo o no ), bajo la acción de una =  
carga normal  $F$ , conlleva una cierta pérdida de energía, de forma =  
que el proceso de contacto mecánico no puede considerarse, en absol  
luto, reversible.

4.4.- CASO DE EXISTIR CARGAS TANGENCIALES, PERO SIN QUE OCURRA DESLIZAMIENTO, CRECIMIENTO DE LAS MICROSOLDADURAS.

Teniendo presente todo lo hasta ahora expuesto, en un contacto de este tipo se producen cuatro fenómenos diferentes:

1º.- Debido a las deformaciones elásticas producidas por las tensiones de Hertz, debidas a las fuerzas F y T, se producen unos microdeslizamientos en una zona más o menos amplia del área de contacto aparente, según se vio en los puntos

2º.- En cada una de las asperezas que se encuentran deformadas plásticamente, por la acción de la carga normal F, se produce un fenómeno conocido por " crecimiento de la unión", y que no es más que un aumento del área real de cada una de las microsoldaduras.



En la figura se ve una de las asperezas, en contacto con otra, totalmente plana. El área inicial es  $A_{ii}$ , bajo la acción de la carga  $F_i$ . Al aplicar la carga  $T_i$ , el área pasa a valer  $A_{ii} + \Delta A_{ii}$ .

Un punto tal como el  $Q_0$  pasa a la posición  $Q_1$ .

La cara lateral  $S_0$  pasa a ser  $S$ .

La explicación del hecho ( es una evidencia experimental) reside en la aceptación de un criterio similar al de Von Misses para la rotura de la unión

$$p_i^2 + \alpha^2 t_i^2 = p_{i0}^2 \quad (1)$$

siendo  $\alpha$  un coeficiente de valor 10,  $p_{i0}$  la presión co-

correspondiente al límite de fluencia de la aspereza  $i$  ( $S_F = p_{i0}$ )  
 (En realidad, cualquier criterio debería aceptarse, pues la realidad es que la microsoldadura, sometida a la presión  $p_i$ , no se rompe, al aplicarle  $t_i$ .)

En base a tal criterio, la aspereza, deformada plásticamente bajo la acción de la carga  $F_i$ , que da lugar a la presión  $p_i$ , al verse sometida a la carga  $T_i$ , que produce la tensión  $t_i$ , se alarga un poco. Debido a ello, la presión  $p_i$  disminuye (por aumentar el área  $A_i$ ), manteniéndose el conjunto  $p_i, t_i$  dentro de los límites de no fallo impuestos por la ecuación anterior.

Inicialmente

$$p_i = \frac{F_i}{A_{ii}} \quad ( p_i = S_F + \Delta \sigma_F )$$

$$p_{i0} = \frac{F_i}{A_{ii}}$$

Después de aplicar  $t_i$

$$p_i' = \frac{F_i}{A_{if}'}$$

$$p_{i0} = p_{i0}'$$

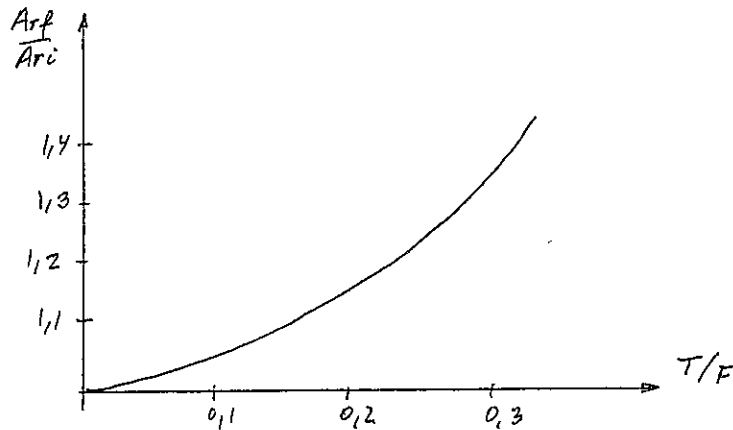
$$t_i' = \frac{T_i}{A_{if}'}$$

Sumando todas las asperezas, y sustituyendo en la ecuación (1)

$$\left( \frac{F}{A_{rf}} \right)^2 + C \left( \frac{T}{A_{rf}} \right)^2 = \left( \frac{F}{A_{ri}} \right)^2$$

de donde

$$\frac{A_{rf}}{A_{ri}} = \left( 1 + C \frac{T^2}{F^2} \right)^{1/2}$$



Como puede verse, existe un considerable aumento del área de contacto debido a la acción combinada de F y T.

Se ha comprobado que el área de una aspereza puede incrementarse = hasta 9 veces, antes de la fractura.

En muchos casos, el área real  $A_r$  puede llegar incluso a igualar el tamaño del área aparente  $A_o$ . ( En este caso, si no existe capa = contaminante, se necesitaría una T muy grande para producir el deslizamiento, es decir, se produce el fenómeno de "agarrotamiento" o "enclavamiento" )

30.- En los cuerpos sobre los que actua una carga normal F, y luego se aplica otra tangencial T, sin que se produzca el deslizamiento, se produce también otro fenómeno conocido como " dispersión de los contaminantes"

En efecto, los microdeslizamientos elásticos por un lado, el crecimiento de las uniones por otro, y la rotura de algunas de las uniones establecidas con la capa contaminante por medio, llevan a una dispersión y rotura de esta capa, con los efectos que son fáciles de preveer, entre los que destacan la posibilidad de aparición de nuevas microsoldaduras ( al permitir la ausencia de la capa contaminante que las fuerzas de corto alcance - enlaces metalicos y covalentes- actuen libremente).

Se ha comprobado que la combinación de fuerzas normales y tangenciales produce un aumento de la fuerza de adhesión de más de 10 veces, en muchos casos.

42.- Finalmente, se ha comprobado también que cuando se aplica una fuerza tangencial  $T$  en un contacto estático, se produce un pequeño desplazamiento relativo entre los cuerpos en contacto, en la dirección de  $T$ , en forma "instantánea" ( una especie de "salto" ), de aproximadamente  $0.1 - 1 \mu m$ .

Tales microdesplazamientos, en todo el conjunto de los cuerpos, son a veces reversibles, y otras no.

5.- ANÁLISIS DEL PROCESO DE FRICCIÓN ENTRE ELEMENTOS DE MAQUINAS.

5.1.- ESTUDIO DEL ROZAMIENTO DE DESLIZAMIENTO.

5.1.1.- GENERALIDADES.

Como todos sabemos, si sobre dos cuerpos sobre los que actúa una carga normal  $F$  se aplica una fuerza tangencial  $T$ , que excede de un cierto valor, se produce un deslizamiento macroscópico relativo de uno respecto del otro.

En estas condiciones, las leyes macroscópicas observadas experimentalmente (Amontons y Coulomb) son las siguientes:

1ª.- La fuerza debida a la fricción, o fuerza de rozamiento, siempre tiene dirección opuesta a la fuerza tangencial aplicada  $T$ .

2ª.- La fuerza de rozamiento es proporcional a la fuerza tangencial normal existente

$$F_r = \mu \cdot F$$

Esta relación define el coeficiente de rozamiento

$$\mu = F_r / F$$

3ª.- La fuerza de rozamiento es independiente del área de contacto aparente.

Por otro lado, del estudio a nivel microscópico sobre el comportamiento de sólidos reales en contacto, se ha deducido.

1º.- Dos sólidos en contacto, con un área aparente  $A_0$ , solo se tocan en un número discreto de asperezas, es decir, con un número discreto de microcontactos.

2º.- La suma de las áreas de los microcontactos dan lugar

al área real  $A_r$ , que es la que verdaderamente sopor-  
ta la carga F.

39.- La deformación de las asperezas que entran en contacto  
puede ser de tipo plástico o de tipo elástico.  
En ambos casos, el área de las mismas es proporcional  
a la fuerza normal

$$A_i = K F_i \quad \implies \quad A_r = K F$$

En el caso específico de deformación plástica,

$$A_r = \frac{1}{S_F} F$$

40.- En los microcontactos se producen uniones adhesivas o  
microsoldadas, debidas a fuerzas de largo alcance (e-  
lectrostáticas y electromagnéticas) y otras de corto  
alcance ( enlace metalico o covalente). Tales fuerzas  
dependen, en cierta medida, de la existencia de la ca  
pa contaminante.

Como es evidente, la fricción ocurre a través de las interacciones  
entre asperezas, de manera que la fuerza de fricción macroscópica  
es la suma de las fuerzas de fricción microscópicas producidas en  
los microcontactos.

La energía disipada, a nivel macroscópico, es la suma de las ener-  
gías disipadas en cada microcontacto.

En resumen, el proceso de fricción no es más que la consecuencia  
de:

19.- Deformación elástica de las asperezas.

20.- Deformación plástica de las asperezas.



3º.- Encastramiento ( fenómeno de arada, en que una aspereza del material más duro cava un surco, en la superficie del más blando)

4º.- Rotura de las uniones adhesivas o microsoldaduras (o cortadura del material que forma la aspereza en otros puntos de la misma, más debiles)

Estos cuatro procesos pueden clasificarse en dos grupos:

1º.- Procesos de deformación ( 1º, 2º y 3º anteriores)

2º.- Procesos de adhesión ( el 4º anterior)

A continuación, vamos a profundizar un poco más en cada uno de ellos.

NOTA: En todos estos procesos, pero específicamente en el de adhesión, no podemos olvidar los efectos de la capa contaminante, los efectos dinámicos, y el factor tiempo o velocidad de deslizamiento.

Todos ellos serán considerados más adelante.

5.1.2.- CALCULO DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO A LA FRICCION CONTRIBUCION DE LA ADHESION, Y DE LA DEFORMACION DE ASPEREZAS.

De lo dicho anteriormente se desprende que la fuerza de fricción puede desglosarse en dos componentes: Una debida a la deformación, y otra a la adhesión

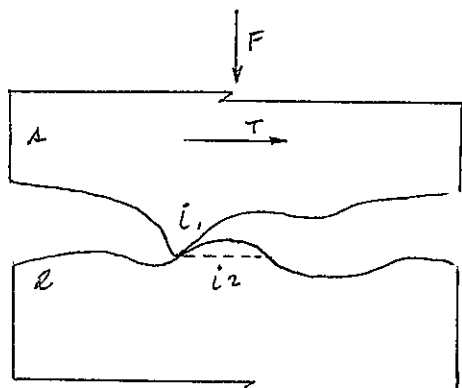
$$F_r = F_r(\text{defor}) + F_r(\text{adh})$$

Dividiendo ambas por la carga normal  $F$ , obtendremos el coeficiente de rozamiento como suma de dos terminos:

$$\mu = \mu_{\text{defor}} + \mu_{\text{adh}}$$

A continuación vamos a cuantificar, aunque solo sea en unos modelos muy simples, el valor de estos coeficientes:

a.- Coeficiente de rozamiento debido a la deformación.



Dejando aparte los fenómenos de deformación plástica o elástica que intervienen en la formación de las microsoldaduras, es evidente que, el fenómeno de deformación más importante que interviene en generar la fuerza de rozamiento es el debido al en-

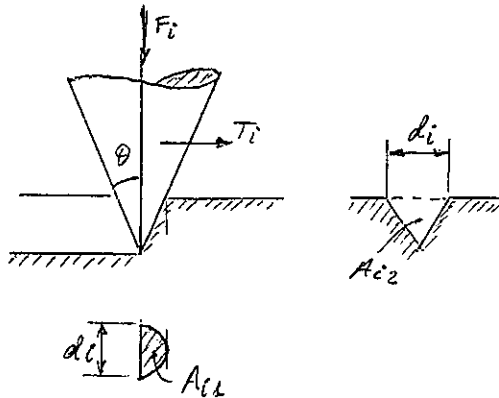
castramiento.

En efecto, en la figura se observa claramente que al moverse 1 sobre 2, sobre todo si 1 es más duro, la aspereza  $i_1$  tropieza con  $i_2$ , y la consecuencia será la rotura de esta segunda ( fenómeno de des

gaste) o el cavado de un surco a través de ella.

Precisamente este segundo fenómeno es el que vamos a tratar de evaluar, en modelos de asperezas simples.

En primer lugar vamos a suponer que la aspereza del material más duro tiene forma cónica, como se ve en la figura



El área  $A_{i1}$  vale:

$$A_{i1} = \frac{1}{8} \pi d_i^2$$

El área  $A_{i2}$  vale:

$$A_{i2} = \frac{1}{4} d_i^2 \cotag \theta$$

Suponiendo que el material más blando fluye plásticamente, y que la presión de fluencia es  $p^* = S_F$ , podemos poner:

$$F_i = A_{i1} S_F \quad \text{y} \quad T_i = A_{i2} S_F$$

Si hay  $n$  microcontactos de este tipo:

$$F = A_{r1} S_F \quad \text{y} \quad T = A_{r2} S_F$$

El coeficiente de rozamiento será:

$$\mu = \frac{T}{F} = \frac{A_{r2}}{A_{r1}} = \frac{2}{\pi} \cotag \theta$$

para  $\theta = 60^\circ \Rightarrow \mu = 0.32$  ; para  $\theta = 30^\circ \Rightarrow \mu = 1.1$

- En el caso de que la aspereza más dura tenga forma esférica, se

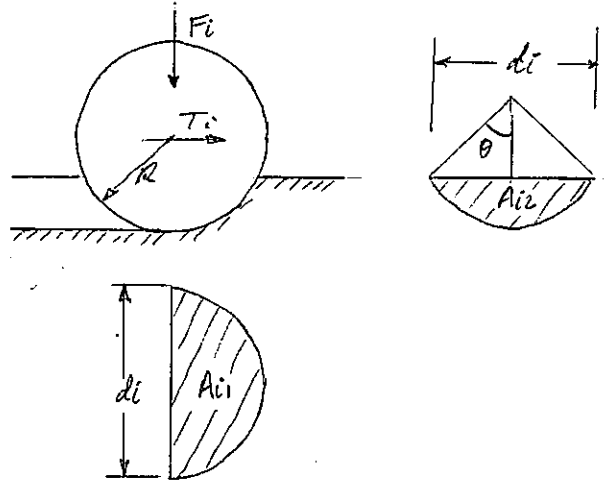
tendrá:

$$A_{i1} = \frac{1}{8} \pi d_i^2$$

$$A_{i2} = \frac{1}{2} R^2 (2\theta - \text{sen}2\theta)$$

Como

$$F_i = A_{i1} S_F \quad \text{y} \quad T_i = A_{i2} S_F$$



, para las n asperezas iguales

$$F = A_{r1} S_F \quad \text{y} \quad T = A_{r2} S_F$$

Con lo que el coeficiente de rozamiento vale:

$$\begin{aligned} \mu_{(\text{defor})} &= \frac{T}{F} = \frac{A_{r2}}{A_{r1}} = \frac{4 R^2}{\pi d^2} (2\theta - \text{sen} 2\theta) \\ &= \frac{1}{\pi} \frac{2\theta - \text{sen} 2\theta}{\text{sen}^2 \theta} \end{aligned}$$

para valores de  $\theta$  pequeños,  $\mu = \frac{4\theta}{3}$

para  $d = R$  y  $\theta = 30^\circ \Rightarrow \mu = 0.23$  ; para  $d = 2R$  ,  $\theta = 90^\circ \Rightarrow \mu = 1$

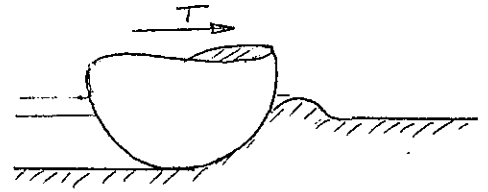
NOTA: En la practica, estos valores de  $\mu$  son bastante diferentes, por dos motivos.

En primer lugar, porque las asperezas no tienen estas formas ideales.

En segundo lugar, porque en la practica el material del surco se acumula y "levanta", frente a la aspereza, como se ve

en la figura.

(fenómeno que da lugar a un aumento en el valor de  $\mu$  )



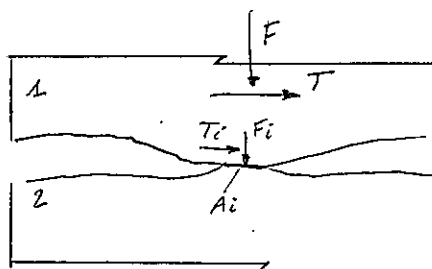
NOTA: Otro aspecto que también habrá que tener en cuenta al valorar este razonamiento de encastramiento es el debido a la posible adhesión entre la aspereza dura y el material blando.

Ello será abordado en el proximo punto, y en todo caso significa un aumento en el valor de  $\mu$  , dado por el coeficiente  $K_p$  siguiente

Material	Coeficiente $K_p$
Tungsteno	1.55
Acero	1.35 - 1.70
Hierro	1.9
Cobre	1.55
Estaño	2.40

NOTA: En general, como luego veremos, la fuerza de rozamiento, debido a la deformación es menor que la debida a la adherencia.

b.- Coeficiente de rozamiento debido a la adhesión.



-Suponiendo que la aspereza  $i$  de 1 se ha adherido a la correspondiente de 2, debido a la fuerza  $F_i$  que le produjo una deformación plástica, entonces

$$F_i = A_i p^{\#} = A_i S_F$$

Si llamamos  $\tau$  a la tensión cortante que produce la carga  $T_i$  sobre la aspereza

$$T_i = A_i \tau$$

En el límite de rotura de la microsoldadura, llamando  $S$  a la tensión cortante ( de la microsoldadura)

$$T_i = A_i \cdot S$$

Para  $n$  microsoldaduras:

$$F = A_r \cdot S_F \quad \text{y} \quad T = A_r \cdot S$$

Con ello, el coeficiente de rozamiento será :

$$\mu_{(adh)} = \frac{T}{F} = \frac{S}{S_F}$$

siendo  $S_F > S$  los valores correspondientes al material más débil y a la microsoldadura, respectivamente.

En el caso de no haber contaminantes,  $S = C_F$  del material más blando. Como para muchos materiales,  $C_F/S_F \approx 5$ , con lo cual

$$\mu_{(adh)} = 0.2$$

Este valor es muy bajo, frente a los que se obtienen en la práctica, que son próximos o superiores a 1

- Esta discrepancia ( prescindiendo del componente de deformación  $\mu_{(defor)}$  ), se debe a tres fenómenos: El crecimiento de la unión, ya visto en el punto , el endurecimiento de la unión, y la adhesión en el encastramiento.

- El crecimiento de la unión lleva a considerar la desi-

igualdad entre las áreas del numerador y denominador de la expresión que da  $\mu$ .

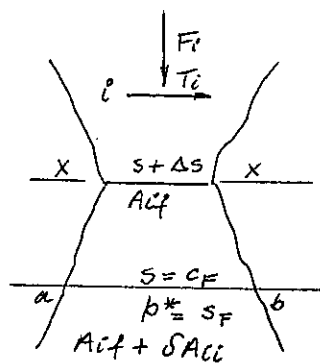
$$\mu_{(adh)} = \frac{A_{rf} \cdot S}{A_{ri} \cdot S_F} = K_1 \frac{S}{S_F}$$

( Los valores de  $K_1$  pueden verse en el grafico del punto )

- El endurecimiento de la unión, es un fenómeno debido a = que la tensión de rotura de la microsoldadura es a veces más alta que la de las propias asperezas que une.

Ello permite que la rotura de la unión se establezca en un plano = que no es precisamente el de la microsoldadura.

En la figura se representan dos posibles planos de rotura, el x-y, en la propia microsoldadura, y el a-b, sobre una de las asperezas ( lógicamente, la del material más blando)



$$A_{if} = A_{ic} + \Delta A_{ic}$$

$$A_{if} + \Delta A_{if} = A_{ic} + \Delta A_{ic} + \Delta A_{if}$$

$$p = s_F + \Delta \sigma_F$$

El endurecimiento de la unión se debe al hecho de ser la = presión de contacto  $p$  superior al límite de fluencia = del material

Ello lleva a un aumento consecuente de la tensión cor-

tante, que pasa a ser

$$\sigma = s + \Delta s$$

Si la sección inicial en x-x era  $A_{ii}$ , y la sección por a-b era  $A_{ii} + \delta A_{ii}$ , el crecimiento de la unión lleva a los valores se-

ñalados en la figura.

Teniendo ello en cuenta, el criterio de rotura puede expresarse por:

$$C_F (A_{if} + \delta A_{ii}) \leq (S + \Delta S) (A_{if})$$

La rotura ocurrirá por a-b cuando el primer miembro de la inecuación sea menor que el segundo, y a lo largo de x-x en caso contrario. La igualdad indica la misma posibilidad de rotura.

Escribiendo

$$F_i = A_{ii} (p^{\#} + \Delta p^{\#}) = A_{ii} (S_F + \Delta \sigma_F)$$

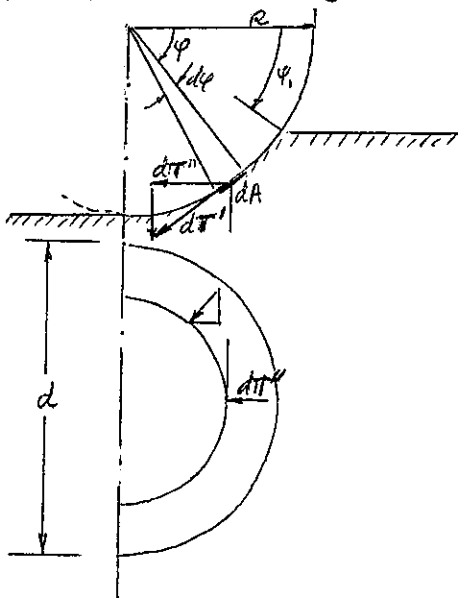
$$T_i = (A_{if} + \Delta A_{if} + \delta A_{ii}) C_F = (A_{if} + \delta A_{ii}) C_F$$

podemos poner:

$$\mu_{(adh)} = \frac{\sum T_i}{\sum F_i} \leq \frac{C_F}{S_F} \left[ 1 + \left( \frac{\sum \Delta A_{ii}}{\sum A_{ii}} \right) \right]$$

expresión que muestra un incremento en el coeficiente de rozamiento  $\mu_{(adh)}$ , frente al valor inicial  $\mu_{(adh)} = C_F / S_F$ .

- La adhesión en el encastramiento vamos a analizarla para el caso sencillo de la aspereza en forma de esfera, tal como = la mostrada en la figura.



De la figura se obtiene:

$$dA = R \cdot d\varphi \cdot \frac{2\pi R \cdot \cos \varphi}{2}$$

$$dA = \pi R^2 \cos \varphi \cdot d\varphi$$

Si  $\tau$  es la tensión cortan



te real en la interfase, la fuerza de adhesión elemental será

$$dT' = c \, dA = c \cdot \pi \cdot R^2 \cos \varphi \cdot d\varphi$$

La componente horizontal será

$$dT'' = dT' \sin \varphi = c \pi R^2 \cos \varphi \sin \varphi \, d\varphi$$

La fuerza total  $T$ , que se opone al movimiento, será

$$T = \int \frac{2}{\pi} \cdot dT'' = R^2 c \int_{\varphi_1}^{\pi/2} \sin 2 \varphi \, d\varphi = \frac{1}{2} R^2 c (1 + \cos 2 \varphi_1)$$

Como, por otra parte,  $F = S_F \cdot A_1 = S_F \cdot \frac{\pi d^2}{8}$ , queda (cuando  $c = C_F$ )

$$\begin{aligned} \mu_{(adh)} &= \frac{C_F}{S_F} \frac{\frac{1}{2} R^2 (1 + \cos 2 \varphi_1)}{\frac{\pi d^2}{8}} = \\ &= \frac{2}{\pi} \frac{C_F}{S_F} \end{aligned}$$

c.- Resumen final.

Como resumen de todo lo dicho, puede decirse:

1º.- El coeficiente de rozamiento es la suma de los terminos

$$\mu = \mu_{(adh)} + \mu_{(defor)}$$

2º.- El  $\mu$  de deformación vale, en una teoria simplista,

$C_F/S_F$ , en ausencia de capa contaminante. Este valor se ve modificado por el crecimiento de la unión, por el endure-

cimiento de la unión, y por la adhesión en el encastramiento. En el caso de existir capa contaminante,  $\mu = S/S_F$ , y generalmente,  $S < C_F$  del material blando.

39.- El  $\mu$  de deformación es función de la geometría de las asperezas, y generalmente es mucho menor que el anterior.

NOTA: Según hemos visto, para asperezas esféricas duras, sobre cuerpo blando,

$$\mu = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{C_F}{S_F} + \frac{1}{\pi} \cdot \frac{2\theta - \text{sen } 2\theta}{\text{sen}^2 \theta}$$

5.1.3.- ENERGIA DISIPADA EN EL DESLIZAMIENTO.

- Como sabemos, la energía consumida en un proceso de deslizamiento es igual a

$$E = F_r V_d \quad \left\{ \begin{array}{l} F_r = \text{fuerza de rozamiento} \\ V_d = \text{velocidad de deslizamiento} \end{array} \right.$$

- Esta energía absorbida en el rozamiento se invierte en:

- producir las deformaciones elásticas ( las cuales, debido al fenómeno de histéresis, no permiten una recuperación integral de la energía absorbida)
- Producir deformaciones plásticas, las cuales funcionan como almacen de energía.
- Producir la adhesión.
- Producir ondas energeticas en el interior del material, tras los choques, etc., en las asperezas, todas ellas amortiguadas también por la histéresis elástica del material
- Producir la rotura de las uniones, tanto en las microsoldaduras como en otras zonas de las asperezas
- Producir el arrastre de la capa contaminante.

- A su vez, parte de esta energía queda almacenada en el interior de los cuerpos en contacto ( en forma de dislocaciones cristalinas), en una cantidad muy pequeña ( menos del 1% del total) y el resto se disipa en forma de:

- Emisión de fonos , ruidos producidos por la vibración de algunas asperezas deformadas elásticamente

- Emisión de fotones, en forma de luz ( visible o no)
- Emisión de electrones.
- Elevación de la temperatura, que es lo que realmente disipa la mayor cantidad de energía.

Parte del calor generado puede quedar dentro de los cuerpos ( elevando su temperatura) y parte puede salir de ellos por convección , conducción y radiación.

Llamando  $\dot{Q}_d$  al calor producido en el deslizamiento en la unidad de tiempo

$$\dot{Q}_d = \frac{F \cdot V}{J} = \frac{\mu \cdot F \cdot V}{J} \quad ( J = \text{equivalente mecánico del calor} )$$

y llamando  $\dot{Q}_c$  el calor conducido fuera del sistema en la unidad de tiempo

$$\dot{Q}_c = \bar{K} \cdot \frac{\Delta T}{L} \cdot A$$

$$= \bar{K} \cdot \Delta T \cdot L$$

$A = \text{área de contacto } A_r$   
 $\bar{K} = \frac{K_1 + K_2}{2} = \text{conductividad térmica media}$   
 $\Delta T = \text{aumento de temperatura}$   
 $L = \text{longitud generalizada.}$

Lógicamente, la relación entre ambas magnitudes debe ser, en un proceso estacionario, una cantidad constante

$$\frac{\dot{Q}_d}{\dot{Q}_c} = N \implies \frac{\mu \cdot F \cdot V}{\bar{K} \cdot \Delta T \cdot L} = N = \text{cte}$$

de donde se deduce que:

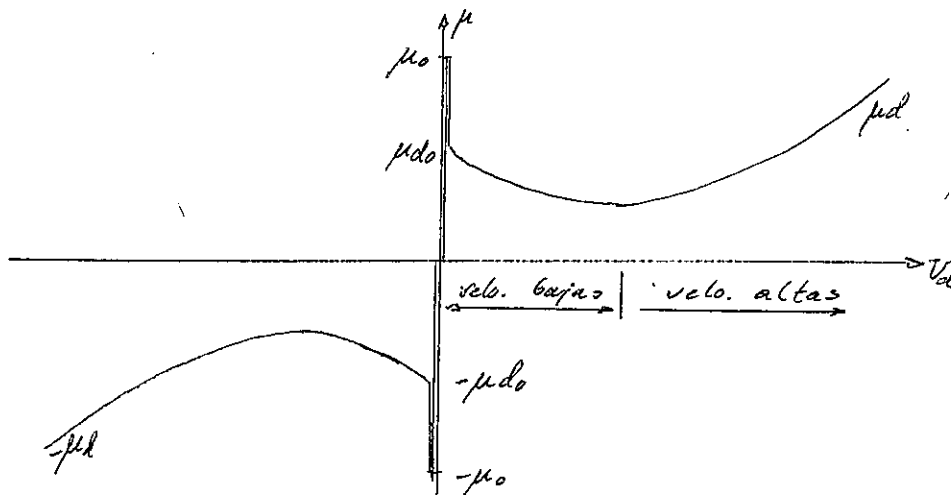
$$\Delta T = N \left( \frac{\mu \cdot F \cdot V}{K \cdot L} \right)$$

NOTA: El punto de fusión de uno o ambos metales en contacto tiene una importancia fundamental.

En efecto, las altas temperaturas generadas en las asperezas en contacto pueden fundir uno de los metales, creando una pequeña película de metal fundido, que incluso puede actuar como lubricante.

5.1.4.- EFFECTOS EN LA FRICCIÓN DE LA VELOCIDAD DE DESLIZAMIENTO.

- Si se lleva a una gráfica el valor de  $\mu = T/F$  en ordenadas, y la velocidad de deslizamiento  $V_d$  en abscisas se obtiene una curva como la mostrada en la figura.



En ella se observa como el valor del coeficiente de rozamiento estático  $\mu_0$  es mucho más alto que el dinámico, al inicio del movimiento  $\mu_{do}$ . Además, en el paso de  $V_d = 0$ , a  $V_d \neq 0$ , se produce un salto brusco en el valor de  $\mu$ , que pasa de  $\mu_0$  a  $\mu_{do}$ , siendo siempre  $\mu_0 > \mu_{do}$ .

A medida que aumenta la velocidad, se produce una disminución del coeficiente de rozamiento. A partir de velocidades medias, empieza de nuevo a crecer este coeficiente.

Analíticamente, la siguiente expresión responde con bastante aproximación a este comportamiento

$$\mu_d = (a + b V_d) e^{-c V_d} + d$$

donde los coeficientes a, b, c y d se tienen en la tabla adjunta

Materials	Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Frictional constants			
		a	b	c	d
Cast iron-copper	{ 0.19	0.006	0.114	0.94	0.226
	{ 2.20	0.004	0.110	0.97	0.216
Cast iron-cast iron	{ 0.83	0.022	0.054	0.55	0.125
	{ 3.03	0.022	0.074	0.59	0.110
Fibre-steel	{ 0.124	0.052	0.148	0.86	0.251
	{ 0.324	0.051	0.157	0.99	0.243

- Los motivos de este comportamiento son fáciles de entender si se tiene en cuenta que el principal causante del rozamiento, la adhesión, es un fenómeno que depende de fuerzas de atracción electromagnéticas ( largo alcance) como químicas (enlaces metálicos y covalentes, de pequeño alcance ), siendo estas últimas las más importantes.

Lógicamente, estas " reacciones químicas" tendrán unas determinadas constantes de equilibrio que harán que la extensión de la reacción ( extensión e intensidad de las microsoldaduras), dentro del área real de contacto, tengan un tiempo concreto para su realización. El factor tiempo alcanza, según esto, una importancia capital.

- Desde este punto de vista, se explica perfectamente:

1º.- El aumento de  $\mu_0$  con el tiempo que dure el reposo.

2º.- La variación de  $\mu_d$  con la velocidad, ya que al aumentar la velocidad de deslizamiento disminuye el tiempo de contacto entre las asperezas, la reacción es menor, y la adhesión es más debil ( microsoldaduras más debiles).

Sin embargo, al mismo tiempo se produce un fenómeno contrario, que ya analizamos: el barrido de la capa =

contaminante que aumenta la extensión de las posibles micro-soldaduras.

A velocidades altas, los efectos térmicos y otros (micro--fracturas, histéresis, etc.) hacen que la temperatura se e-leve fuertemente en los contactos entre las asperezas, lo =cual favorece la realización de las reacciones químicas que provocan la adhesión.

Por ello, entre el fenómeno de barrido de la capa contaminanute ( más fuerte mientras mayor sea la velocidad) y el aumen-to de la rapidez de reacción con el aumento de temperatura , el coeficiente de rozamiento  $\mu_d$  va incrementando de nuevo su valor.

39.- El salto brusco de  $\mu$  desde  $\mu_o$  a  $\mu_{do}$  se explica por la ro-tura " instantanea" de gran número de soldaduras, formadas en el período de reposo ( y que el posterior fenómeno de encas-tramiento y formación de nuevas soldaduras no puede compen-sar)



5.2.- ESTUDIO DEL ROZAMIENTO A LA RODADURA.

5.2.1.- GENERALIDADES.

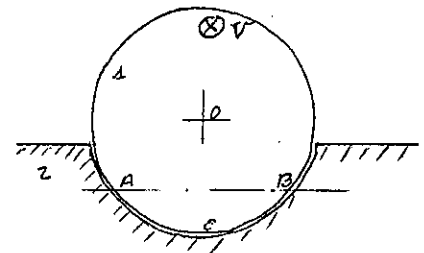
- De antiguo se conoce que la fricción de rodadura es en general mucho menor que la fricción al deslizamiento.

Comparandola con esta última, es lógico pensar que las razones que para ella eran válidas ( adhesión ,rotura, encastramiento,etc.) no son de aplicación al caso de la rodadura.

En efecto, las causas principales que contribuyen a generar la resistencia a la rodadura son:

a.- Microdeslizamientos macroscopicos, debido a razones elásticas que fueron estudiados en el punto

b.- Microdeslizamientos macroscopicos tipo Heathcote, debidos al tipo de contacto entre elemento rodante y camino de rodadura. Son de tipo geometrico, y se deben a contactos fuera del radio teórico = de rodadura.



En la figura se obser-

va que al rodar la bola sobre el camino de rodadura, en dirección " entrando en el papel", si la línea de rodadura es AB, el punto C tendrá una velocidad diferente en 1 que en 2, es decir, deslizará.

Se ha observado en numerosos experimentos que tanto los deslizamientos debidos a la elasticidad de los materiales, como los debidos a la geometría, contribuyen muy poco a la resistencia a la rodadura.

c.- Histeresis elástica, producida por los continuos pa-

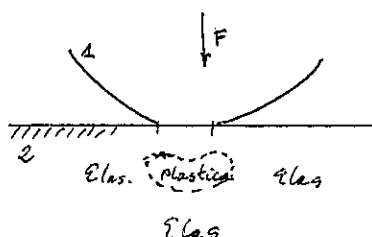
tos de los puntos del material, justo debajo del punto de contacto. ( como se vio en la teoría de Hertz), por fenómenos de deformación elástica.

Precisamente, la histéresis elástica producida en estos fenómenos es la que contribuye, principalmente, a la resistencia a la rodadura.

d. Deformación plástica, producida en puntos bajo la superficie, = donde se alcanzan las mayores tensiones.

( según se vio en la teoría de Hertz, cuando la presión vale

$$p = 3 S_F$$

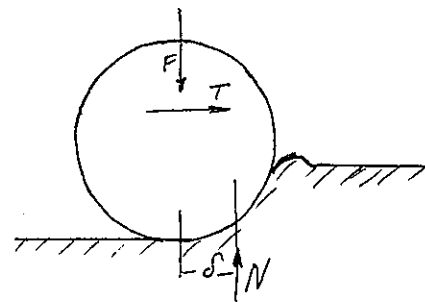


se produce una deformación plástica en el interior de uno de los elementos rodantes, el más debil).

Este proceso también contribuye, en gran parte, a perder energía, y provocar, por tanto, la resistencia a la rodadura.

En el caso de existir cargas tangenciales, esta deformación plástica, como vimos en la teoría de Hertz, se adelanta ligeramente al punto teórico de contacto.

En el caso de un elemento rodante duro, sobre otro más blando, la deformación puede llegar a alcanzar valores como los expresados en el dibujo, de forma que cierta cantidad de material " se acumula" en la parte frontal de la rodadura.



En este caso se ve claro que la resistencia a la rodadura se-

rá un par de valor  $\delta N$ , siendo N la reacción normal en el área = de contacto.

NOTA: Cuando actúan tensiones repetidas, producidas por elementos rodantes en movimiento cíclico ( cojinetes de rodadura, por ejemplo) , el fenómeno de deformación plástica y elástica se modifica profundamente.

En efecto, durante el primer ciclo de carga, el material se comprime plásticamente en una zona del interior del material, por debajo de la superficie de contacto. Ello da lugar a la aparición de tensiones residuales debajo de la superficie.

En la siguiente rodadura ( siguiente ciclo de carga) el material está sujeto a una combinación de las tensiones debidas al nuevo contacto, y a las residuales que ya existían. En consecuencia, se verá sometido a tensiones inferiores al límite elástico. Este fenómeno se conoce en inglés por "Shakedown" , y la máxima tensión para que él ocurra viene dada por

$$p = 4 \cdot S_F$$

En cilindros rodantes, cuando la presión de contacto es superior a este límite se observa un nuevo tipo de deformación = plástica, que consiste en el cizallamiento de la superficie de los cilindros, en la parte delantera del punto de contacto. Esta deformación es acumulativa, de manera que cada vez que el cilindro pase por ese punto de contacto, se producirá una nueva deformación, acumulada a la anterior.

En resumen, el límite de Shakedown es un valor fundamental = en la rodadura. Cuando las presiones de contacto, calculadas por la teoría de Hertz, son inferiores a este límite, el ma

terial " se endurece" en sucesivos ciclos de carga.

En caso contrario el material se deforma progresivamente, hasta su rotura.

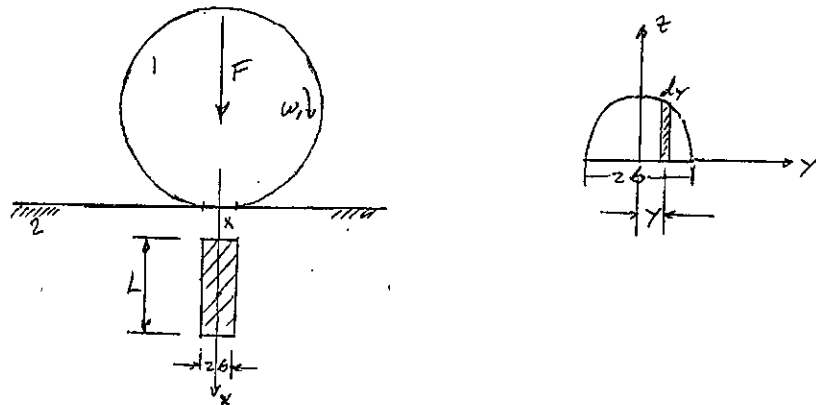
e.- Finalmente, la última causa que produce la resistencia a la rodadura es el fenómeno de adherencia. Sin embargo, dadas las condiciones en que se produce el fenómeno de rodadura ( el contacto entre las dos superficies se establece con movimiento normal a las superficies, y no tangencial a ellas, como era el caso de deslizamiento ), no se produce la dispersión de la capa contaminante, por lo que solo las fuerzas de largo alcance ( electrostáticas y electromagnéticas), mucho más debiles, se dejan sentir plenamente. A pesar de ello, es de suponer que si se producen algunas microsoldaduras, en la zona de " reposo relativo", y algunas más en la zona de deslizamiento relativo. En todo caso, la componente de la resistencia a la rodadura, debido a la adhesión, es siempre muy pequeña comparada con las debidas a la histéresis y deformación plástica.

NOTA: Al contrario que la resistencia al deslizamiento, la resistencia a la rodadura puede admitirse que es independiente de la velocidad.

5.2.2.- CALCULO DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA A LA RODADURA.

5.2.2.1.- CASO DE CILINDRO SOBRE PLANO.

Supongamos un cilindro de radio R, sometido a una carga F, y a un par puro M ( de manera que rueda sin deslizamiento), rodando sobre un plano. Si  $E_1$  y  $E_2$  son los módulos elásticos respectivos, y  $\nu_1$  y  $\nu_2$  los de Poisson, la teoría de Hertz da el valor del ancho del área deformada y la distribución de las presiones de contacto.



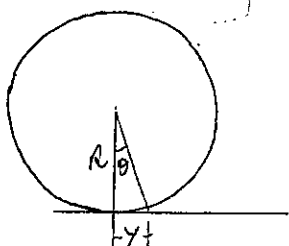
$$p = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot b \cdot L} \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}}$$

$$b = \sqrt{\frac{4 \cdot F \cdot R}{\pi \cdot L} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)}$$

Tomando momentos respecto del eje x-x, de las presiones de contacto a la derecha del mismo.

$$M = \int_0^b p \cdot L \cdot y \cdot dy = \int_0^b \frac{2 F}{\pi b L} \left( 1 - \frac{y^2}{b^2} \right)^{1/2} \cdot L \cdot y \cdot dy = \frac{2 \cdot F \cdot b}{3 \cdot \pi}$$

El trabajo producido por este momento, al rodar el cilindro una = distancia y, será:



$$l_b = M e = M \cdot \frac{y}{R}$$

$$l_b = \frac{2 \cdot F \cdot b}{3 \cdot \pi} \cdot \frac{y}{R}$$

Como ya se explicó, el fenómeno de histéresis elástica, y el fenómeno de deformación plástica, impiden que el trabajo absorbido en el lado de la compresión sea repuesto íntegramente en el lado de la tracción.

Esta pérdida puede ser definida por un coeficiente  $\epsilon$ , que representa el trabajo disipado durante la rodadura del cilindro la distancia  $y$ .

Si  $T$  es la fuerza tangencial derivada del momento torsor, se cumplirá

$$T \cdot y = \epsilon \cdot l_b$$

$$T \cdot y = \epsilon \cdot l_b = \epsilon \cdot \frac{2 \cdot F \cdot b \cdot y}{3 \cdot \pi \cdot R}$$

Definiendo el coeficiente de rozamiento a la rodadura como

$$\lambda = T/F,$$

tendremos:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \epsilon \cdot b}{3 \cdot \pi \cdot R} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\epsilon}{\pi \cdot R} \sqrt{\frac{4 \cdot F \cdot R}{\pi \cdot L} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)}$$

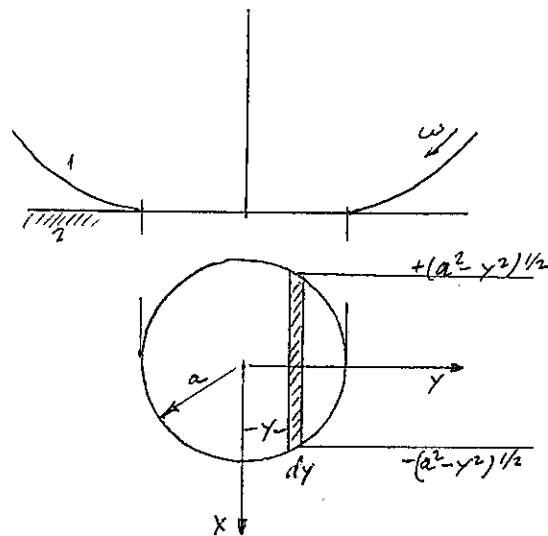
que como se ve, es un coeficiente que depende de la carga normal  $F$ , de la geometría del elemento rodante ( $R, L$ ) y de la naturaleza de los cuerpos en contacto ( $E_1, E_2, \nu_1, \nu_2$ )

NOTA: El factor de histéresis  $\epsilon$  no es el mismo que el obtenido en el ensayo de tracción. Debido a los complicados procesos

de tensión-deformación que tienen lugar bajo la superficie de la zona de contacto, el valor de  $\epsilon$  es unas tres veces superior al = obtenido en el ensayo de tracción simple.

El factor  $\epsilon$  puede suponerse constante, aunque para grandes tensiones puede variar ligeramente.

5.2.2.2.- CASO DE ESFERA SOBRE PLANO.



Según sabemos:

$$p = \frac{3 \cdot F}{2 \cdot \pi \cdot a^2} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{a^2}}$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot F}{4} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \cdot R}$$

Considerando una franja de ancho  $dy$ , y longitud la mostrada en la figura, la fuerza  $dN$  sobre toda ella será (debida al reparto de presiones  $p$ )

$$dN = \left[ \frac{3 \cdot F}{2 \cdot \pi \cdot a^2} \int_{-\sqrt{a^2 - y^2}}^{+\sqrt{a^2 - y^2}} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{a^2}} dx \right] dy =$$

$$= \frac{3 \cdot F}{4 \cdot a^3} (a^2 - y^2) dy$$



El momento resultante respecto de x-x será:

$$M = \int_0^a y \, dN = \frac{3F}{4a^3} \int_0^a (a^2 - y^2) y \, dy = \frac{3Fa}{16}$$

El trabajo efectuado por este momento, al rodar la esfera una distancia  $y$ , será

$$\tau = M \cdot \theta = M \frac{y}{R} = \frac{3 \cdot F \cdot a}{16} \cdot \frac{y}{R}$$

Introduciendo el factor de histéresis  $\epsilon$ , y la fuerza tangencial  $T$  debida a  $M$ , se tendrá, igual que antes

$$T \cdot y = \epsilon \cdot \tau$$

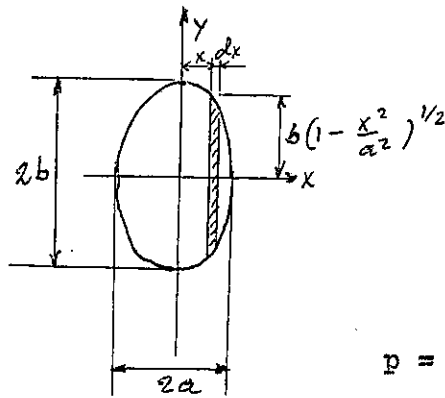
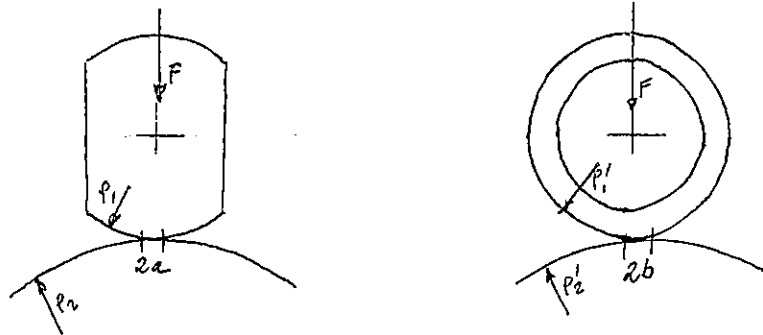
$$T \cdot y = \epsilon \cdot \frac{3 \cdot F \cdot a \cdot y}{16 \cdot R}$$

de donde se obtiene el valor del coeficiente de rozamiento

$$\lambda = \frac{T}{F} = \frac{3 \cdot \epsilon \cdot a}{16 \cdot R} = \frac{3 \cdot \epsilon}{16 \cdot R} \sqrt[3]{\frac{3 \cdot F}{4} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) R}$$

(pueden hacerse las mismas observaciones de antes)

5.2.2.3.- CONTACTO ELIPTICO GENERAL.



$$p = \frac{3 \cdot F}{2 \pi a \cdot b} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}$$

$$b = n \sqrt[3]{\frac{3 \cdot F}{2} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \frac{1}{A + B}}$$

$$a = m \sqrt[3]{\frac{3 \cdot F}{4} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \frac{1}{A + B}}$$

$$\frac{1}{A + B} = \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_1'} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_2'}$$

$$dN = \left[ \frac{3 \cdot F}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot b} \int_{-b}^{+b} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \left( 1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} \right)^{1/2} dy \right] dx$$

$$M = \int_0^a x \cdot dN = \int_0^a dN \cdot x \cdot dx = \frac{3 \cdot F \cdot a}{16} \implies \begin{cases} \epsilon = \frac{M \cdot x}{\rho_1'} = \frac{3 \cdot F \cdot a \cdot x}{16 \cdot \rho_1'} \\ \lambda = \frac{T}{F} = \frac{3 \cdot \epsilon \cdot a}{16 \cdot \rho_1'} \end{cases}$$

## 6.- ESTUDIO DEL DESGASTE EN LOS ELEMENTOS DE MAQUINA EN CONTACTO.

### 6.1.- GENERALIDADES.

- Se define el desgaste como la pérdida progresiva de materia en la superficie de un cuerpo producida por acciones mecánicas asociadas al movimiento relativo con otro cuerpo.
- Para caracterizar correctamente el fenómeno de desgaste se precisan definir las siguientes características:

- Tipo de movimiento relativo ( deslizamiento, rodadura, impacto, y oscilación)
- Los elementos interactuantes ( pueden ser solamente dos, en el contacto seco, o tres, en el contacto fluido, o con partículas libres interpuestas)
- El mecanismo dominante de desgaste, distinguiendo entre
  - Desgaste adhesivo
  - Desgaste abrasivo
  - Desgaste corrosivo
  - Desgaste por fatiga
  - Desgaste por erosión, cavitación, fretting, chispas, etc.

Aunque a continuación estudiaremos cada uno de ellos por separado, puede afirmarse que tal cosa no ocurre nunca, y lo normal es la actuación conjunta de varios de estos mecanismos.

- Valores de parámetros de cargas y movimientos: carga normal y tangencial, velocidad relativa, áreas aparentes en contacto, etc.
- Propiedades del material relativas al desgaste.


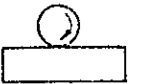

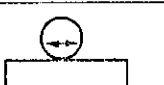
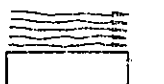
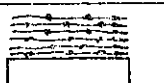
- Apariencia de las superficies en contacto, las cuales pueden ser una clara muestra del tipo de desgaste que se está produciendo, y de las cuales se muestran algunos ejemplos en las figuras.
- Finalmente, también es importante tener una idea de la tasa de = desgaste, o " nivel de desgaste", pudiendo hablarse en este punto de " desgaste suave" y " desgaste severo". En el primero, el proceso de desgaste ocurre solamente en las capas más exteriores de la superficie ( capa Bielby y contaminante), permaneciendo las superficies relativamente lisas, y protegidas por la capa de óxido generada en el rozamiento.

La pérdida de material consiste en pequeñas partículas menores que algunas **nm (nanomicrometros)**

En el desgaste severo, el contacto es metálico, las superficies son profundamente afectadas, y las partículas metálicas arrancadas son del orden de **100  $\mu$ m ( micromilímetros)**

(Evidentemente la distinción entre suave y severo es, en principio, una simple diferencia de tamaños)

En la siguiente tabla se recogen todos estos conceptos.

Interacting elements	Type of relative motion	Wear mechanisms	mainly stress interactions		stress + material interactions	
			surface fatigue	abrasion	adhesion	tribo-chemical
solid/solid (metals, polymers, minerals, etc.) without or with lubricants		sliding	sliding wear			
		rolling	rolling wear			
		impact	impact wear			
		oscillation	fretting wear			
solid/liquid		flow	cavitation wear			
solid/fluid + particles		flow	fluid erosion			

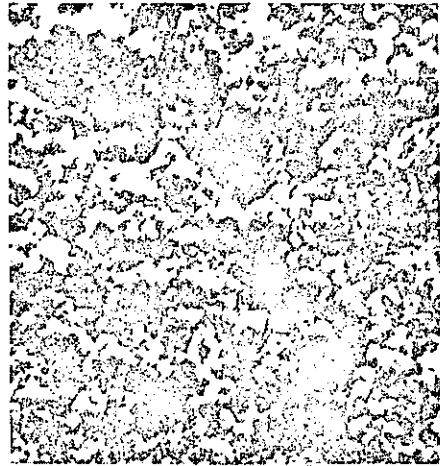
Las siguientes figuras señalan el aspecto de las superficies según el mecanismo predominante de desgaste.

- Desgaste adhesivo, caracterizado por protuberancias cónicas, escamas y hoyos.

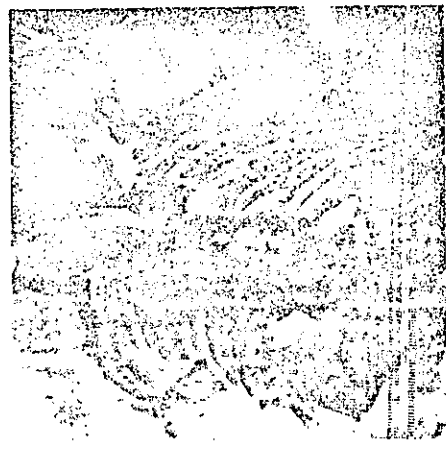


100 μm

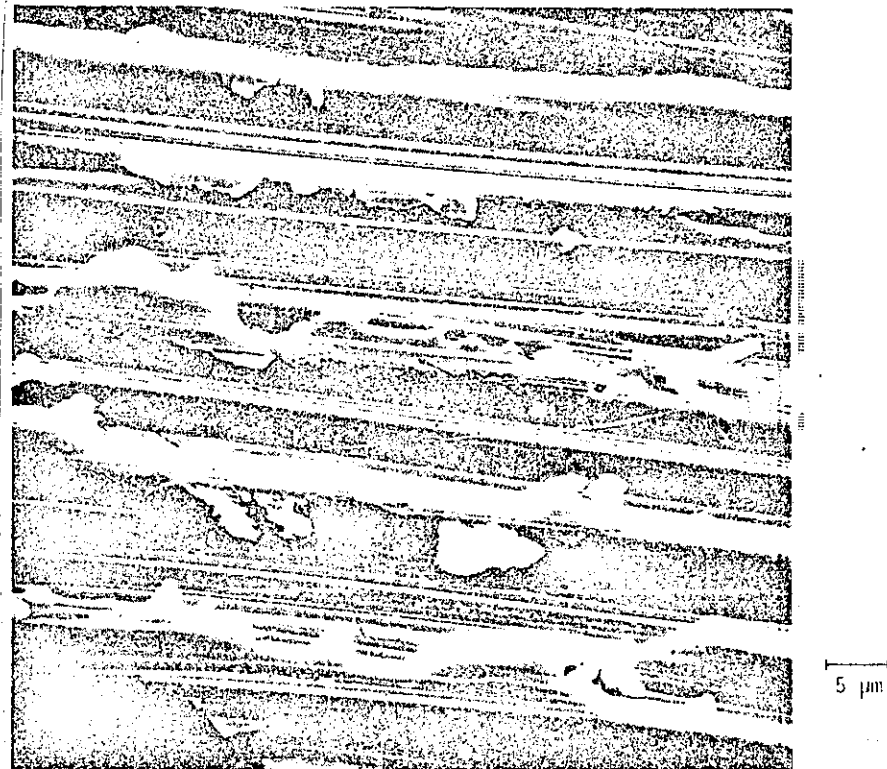
- Desgaste corrosivo, caracterizado por la presencia de productos de reacción ( película y partículas de óxido)



- Desgaste por fatiga superficial, caracterizado por rayaduras, surcos, y estrias.



- Desgaste por abrasión, caracterizado por rayaduras, surcos y estrias.



- En el caso de rozamiento de deslizamiento, se han comprobado algunas reglas que son válidas a nivel macroscópico, para el desgaste de los metales ( sin considerar el mecanismo de desgaste = que lo produce)

1ª.- La tasa de desgaste  $\omega$  ( volumen V de material removido por unidad de deslizamiento L) es proporcional a la carga normal F :

$$\omega = \frac{V}{L} \approx F$$

2ª.- La tasa de desgaste  $\omega$  es independiente del área de = contacto aparente.

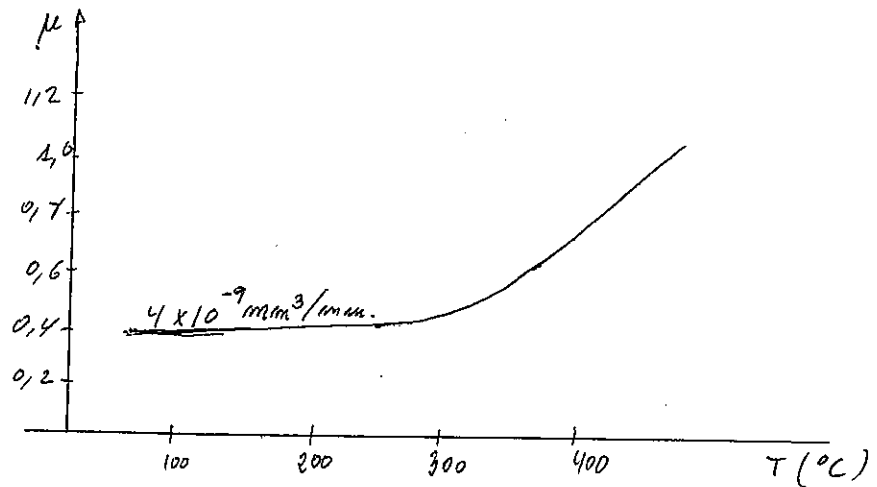
- Aparte de estas dos sencillas reglas, comprobadas experimentalmente, es lógico pensar que debe haber alguna relación entre el

desgaste y el coeficiente de rozamiento.

Experimentalmente se ha comprobado una cierta relación, pero dentro de límites muy amplios, como indica la tabla adjunta:

Materiales	$\mu$	Désgaste ( $\frac{\text{cm}^3}{\text{cm } 10^{-12}}$ )
Acero suave - Acero suave	0.62	157 000
Acero - Bronce	0.24	24 000
Acero - Estelita	0.60	320
Acero - Polietileno	0.63	30
Carburo tungteno-idem	0.35	2

- Finalmente, también se ha observado una variación importante del desgaste con la temperatura, según se ve en la gráfica adjunta = para el cobalto, en vacío ( sin aire contaminante)





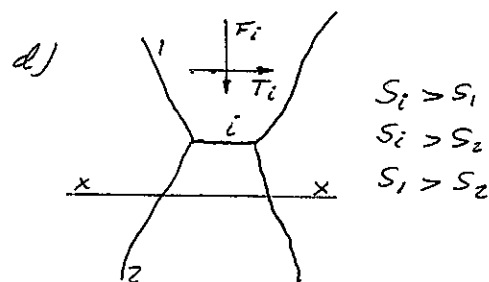
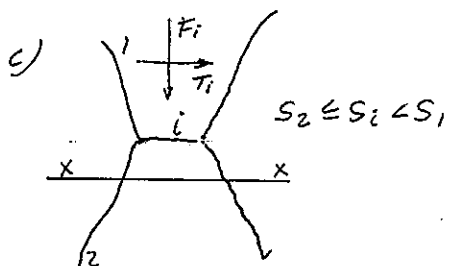
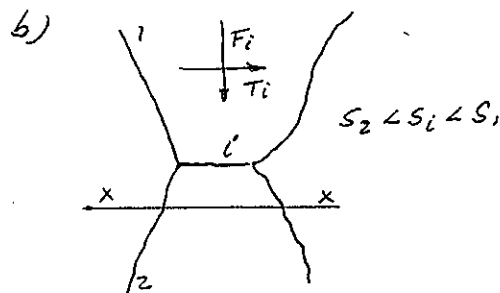
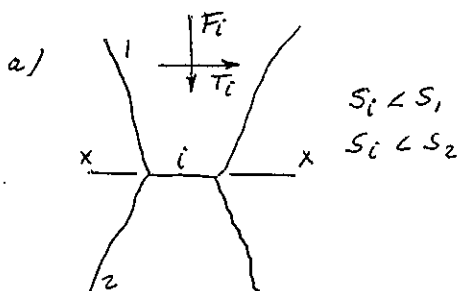
6.2.- ESTUDIO DE LOS MECANISMOS DE DESGASTE.

6.2.1.- DESGASTE ADHESIVO.

El desgaste adhesivo caracterizado como ya dijimos por escamas adheridas " del otro material" , y las consiguientes fracturas en " capas o conchas" del que las pierde, tiene un mecanismo = de producción ligado intimamente al fenómeno de adhesión que hemos estudiado ( a la formación de las microsoldaduras)

Admitida la formación continua de estas microsoldaduras (aumentadas por la renovación de la capa contaminante, una vez iniciado el deslizamiento), el desgaste solo puede tener lugar cuando la rotura se establece en el seno de una de las asperezas, y no por la unión microsoldada.

En las figuras se ven los cuatro casos que al respecto pueden darse:



En el caso a), la interfase ( microsoldadura) es más debil a cortadura ( $S_i$ ) que cualquiera de las dos asperezas en contacto (de = tensiones de cortadura respectivas  $S_1$  y  $S_2$  ). En este caso, es la microsoldadura la que se rompe, y no se produce desgaste por esta

causa.

En el caso b) la interfase es más resistente que la aspereza del material 2, y a su vez, menor que la del 1. En consecuencia, la rotura se establece por el plano de cortadura xx, y parte del material del cuerpo 2 queda adherido al cuerpo 1. El material de 2 se desgasta.

En el caso c), la interfase es ocasionalmente más fuerte que el material 2, y a su vez, menor que la del 1. En consecuencia habrá una transferencia del cuerpo blando hacia el cuerpo duro, y ocasionalmente, fragmentos del metal duro pueden ser rotos, quedando libres ( una vez que se rompa, posteriormente, la microsoldadura, o el material más blando).

En el caso d) la interfase es siempre más resistente que cualquiera de las asperezas de ambos cuerpos. Como consecuencia, ambas superficies pueden deteriorarse ( desgastarse)

NOTA: Un aspecto que conviene considerar ahora se refiere al propio concepto de desgaste.

En efecto, tal como se entiende desgaste, este significa la pérdida efectiva de materia por uno ( o ambos) de los cuerpos en contacto, aún cuando tal material "perdido" quede adherido a las paredes " del otro".

En este sentido, desgaste va más bien ligado al concepto de " deterioro superficial".

Naturalmente, los mecanismos de desgaste nunca operan solos, y por consiguiente, es de suponer que un material adherido a otro, con conchas, escamas, etc., queda a merced de mecanismos de desgaste de tipo abrasivo, y otros.

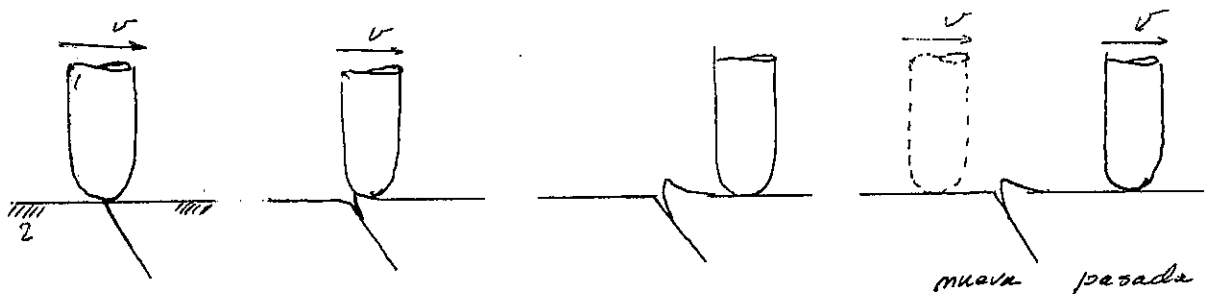
NOTA: Ahora puede entenderse la relación entre desgaste y rozamiento.

En efecto, cualquiera que sea la forma de rotura, en los contactos adhesivos, "todas" conducen a originar la resistencia al deslizamiento.

Sin embargo, "no todas" conducen a producir desgaste.

Otra de las justificaciones del desgaste adhesivo, relativo a la formación de escamas, se refiere a la aparición de fracturas en la dirección de las máximas tensiones cortantes, cuando una aspereza dura entra en contacto con una superficie lisa.

En primer lugar, las tensiones de Hertz producen la grieta. Posteriormente, la microsoldadura entre aspereza y superficie lisa, levantan la punta de la grieta. En posteriores pasadas, un desgaste de tipo abrasivo tiene lugar, rompiendo, definitivamente, la escama formada.



NOTA: Vease la teoría de desgaste por fatiga, que aclara mejor algunos de estos terminos.

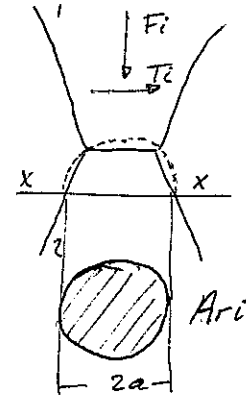
- A continuación vamos a tratar de cuantificar, de alguna manera, las leyes del desgaste adhesivo.

Supongamos que el contacto entre ambos cuerpos se produce entre n asperezas de área  $A_{ri}$ , en la sección de rotura, todas igua-

les ( de radio  $a$ ).

El área de contacto será  $\pi \cdot a^2$ ,  
y la carga que cada una soporta es:

$$F_i = p_o \cdot \pi \cdot a^2 = S_F \cdot \pi \cdot a^2$$



Supongamos, además, que el volumen desprendido de una de las superficies, en cada aspereza, es una semiesfera de radio  $a$  ( como se ve en la figura). El volumen de la misma es  $\frac{2}{3} \cdot \pi \cdot a^3$ .

Como la longitud de deslizamiento, para cada aspereza, es  $2a$ , el volumen desgastado por unidad de deslizamiento será:

$$W_i = \frac{\frac{2}{3} \cdot \pi \cdot a^3}{2 \cdot a} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot a^2$$

Para las  $n$  asperezas en contacto,

$$W = \frac{n}{3} \cdot \pi \cdot a^2$$

Como por otra parte  $F = n \cdot S_F \cdot \pi \cdot a^2$ , sustituyendo queda:

$$W = \frac{F}{3 \cdot S_F}$$

En esta ecuación se supone que todas las asperezas en contacto se rompen. Suponiendo que ello no es así, sino que solo lo hacen una fracción  $K$  de las mismas, queda finalmente

$$W = K \cdot \frac{F}{3 \cdot S_F}$$

Como se ve, esta ecuación concuerda con las leyes experimentales del desgaste:

19.- La tasa de desgaste es proporcional a la carga normal.

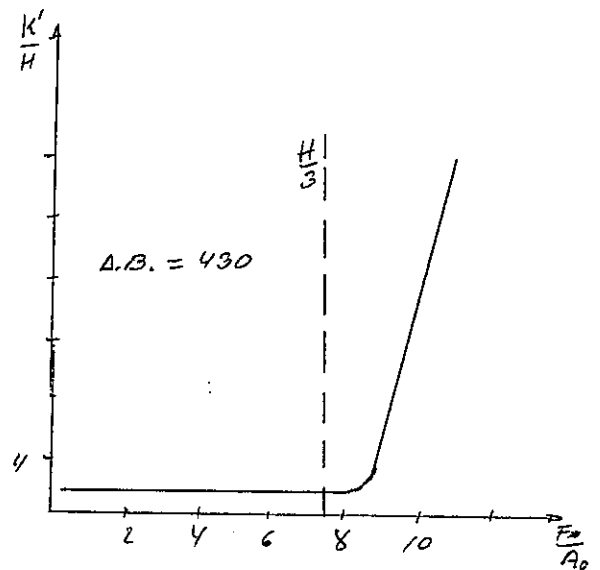
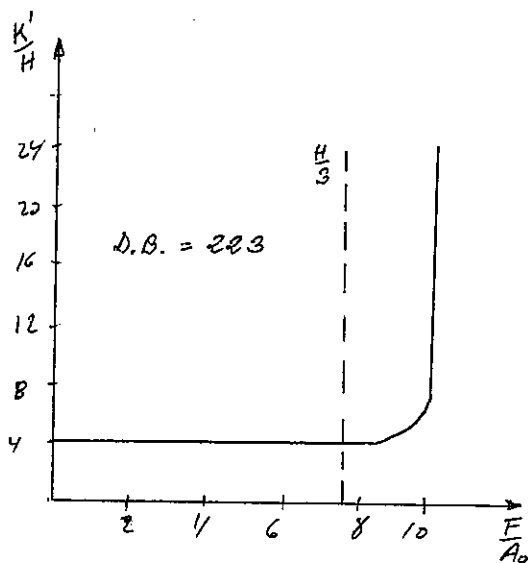
20.- La tasa de desgaste es inversamente proporcional a la dureza ( o a  $S_F$  ) del material más blando.

$$W = K' \frac{F}{H} \quad ; \quad H = \text{dureza del material más blando.}$$

NOTA: Se han desarrollado expresiones similares para incluir el efecto de la capa contaminante, llegandose a los mismos valores.

- A pesar de lo dicho, la fórmula anterior solo es válida dentro de los límites del llamado "desgaste suave", es decir, con cargas no muy elevadas.

En efecto, representando en unos ejes coordenados  $K'/H$  frente a  $F/A_0$  ( presión aparente ), para aceros de distinta dureza  $H$ , se obtienen las gráficas de la figura.

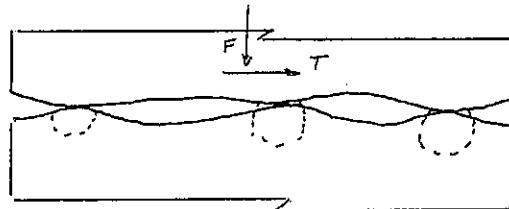


Como se observa, para presiones bajas ( inferiores al valor de  $H/3$  la dureza del material más blando), el coeficiente  $K'$  ( que muestra el número de partículas desprendidas, o sea, el desgaste) se mantiene practicamente constante.

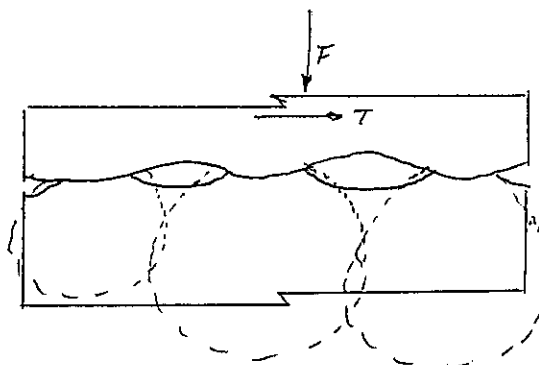
Sin embargo, tan pronto se eleva la carga de manera que la presión aparente sea superior a  $H/3$ , el valor de  $K'$  aumenta rapidamente, produciendose un desgaste brusco.

La explicación de este hecho puede ser que a presiones muy altas, el área real y el área aparente son practicamente iguales, con lo que se deja de cumplir que  $A_r \approx K F$ . Por otro lado, la aproximación entre las áreas real y aparente hace que las partículas desprendidas no puedan " escapar" de entre ambas superficies, produciendose un rápido efecto abrasivo, que obviamente, es autoacelerado.

Finalmente, también se presenta como causa la interacción entre las zonas plasticas producidas en los contactos de las asperezas vecinas. En el desgaste suave, no existe interacción entre las zonas plasticas, como se ve en la figura.



Cuando la carga  $F$  se incrementa, las zonas plasticas interaccionan, y toda la superficie se vuelve plástica, ocurriendo el desgaste severo.



### 6.2.2.- DESGASTE ABRASIVO.

Este tipo de desgaste es el más importante en el caso de los metales, representando el 50% del desgaste total.

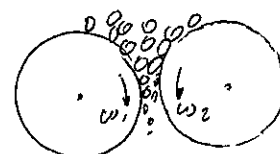
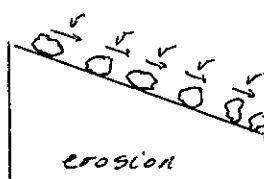
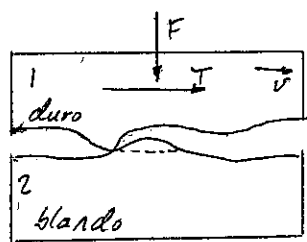
Consiste en el arranque de partículas en el material más blando, producida por las asperezas del material más duro.

Se trata, por consiguiente de un fenómeno puramente mecánico ( al contrario que el desgaste adhesivo, que tiene unos fundamentos = químicos).

Para que el desgaste abrasivo tenga lugar se precisan dos condiciones: que una de las superficies sea más dura que la otra, y = que ambas sean rugosas.

En el desgaste abrasivo hay que distinguir dos tipos:

" Abrasión de dos cuerpos" y " Abrasión de tres cuerpos", ambas representadas en las figuras siguientes.



( dos cuerpos )

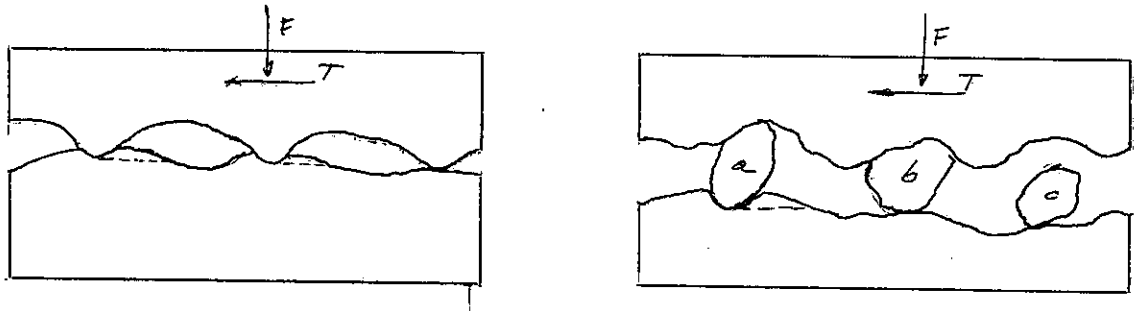
( tres cuerpos )

En ambas quedan incluidos también los dos modos de abrasión, según sea por contacto directo entre las asperezas de ambos cuerpos, o por medio del rozamiento entre estos y las partículas sueltas.

( Este último caso está directamente relacionado con el fenómeno de la erosión, que lo estudiaremos separadamente).

En resumen, puede considerarse que existen dos mecanismos de desgaste por abrasión ( prescindiendo de la erosión).

- Desgaste abrasivo por arranque de material.
- Desgaste abrasivo por trituración de partículas sueltas.



El primero de los tipos puede decirse que no tiene mucha importancia a nivel industrial, debido a la perfección de las técnicas de acabado superficial de los elementos de máquina.

Naturalmente, su importancia es fundamental, en el propio proceso de acabado, para la definición de las propias herramientas para esmerilar, pulir, etc. ( En este caso, puede observarse como el fenómeno de abrasión - desgaste- pierde su connotación " negativa" , para convertirse en un fenómeno " deseable" ).

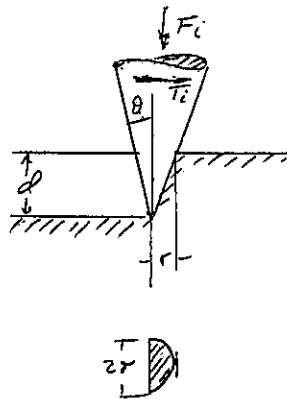
Sin embargo, el desgaste abrasivo por trituración de partículas sueltas tiene gran importancia industrial, siendo la causa más frecuente de desgastes ( no solo partículas del propio metal, si no también partículas de polvo, suciedad, etc, a menudo con fuertes efectos abrasivos).

(Por ejemplo, una partícula de 1 micra de diámetro es aproximadamente igual a la décima parte del espesor normal de la capa de aceite en una lubricación hidrodinámica, o del mismo orden que la película de aceite en una lubricación elastohidrodinámica, o 100 veces el espesor de la película de aceite en la lubricación límite, o 10 veces el valor cuadrático medio de un mecanizado fino).



No todas las partículas libres contribuyen por igual a la abrasión. Por ejemplo, cuando las partículas sueltas se encuentran en los casos b) y c) de la figura, es evidente que su contribución a la abrasión es nula.

Para cuantificar, de alguna manera, el desgaste abrasivo, vamos a considerar el volumen de material blando, arrancado por una aspereza del material duro, en forma de cono, como se ve en la figura.



Al desplazarse una distancia unidad, la aspereza ==  
desplaza un volumen de ma-  
terial dado por

$$W_i = r \cdot d$$

Como

$$r = d \cdot \cotag \theta$$

$$W_i = r^2 \cdot \cotag \theta$$

La fuerza  $F_i$  será soportada por el material blando, siendo

$$F_i = \frac{\pi \cdot r^2}{2} \cdot p_0 = \frac{\pi \cdot r^2}{2} \cdot S_F$$

Para las  $n$  asperezas, se tendrá ( por unidad de distancia recorrida)

$$W = n \cdot r^2 \cdot \cotag \theta$$

$$F = \frac{n \cdot \pi \cdot r^2}{2} \cdot S_F$$

En base a ello, el volumen total desgastado por unidad de deslizamiento será:

$$W = \frac{2 \cdot F \cdot \cot \alpha}{\pi \cdot S_F} \implies W = K_a \frac{F}{S_F}$$

que como vemos, es una ecuación que responde exactamente a las leyes generales del desgaste, y de la misma forma que la obtenida para desgaste adhesivo.

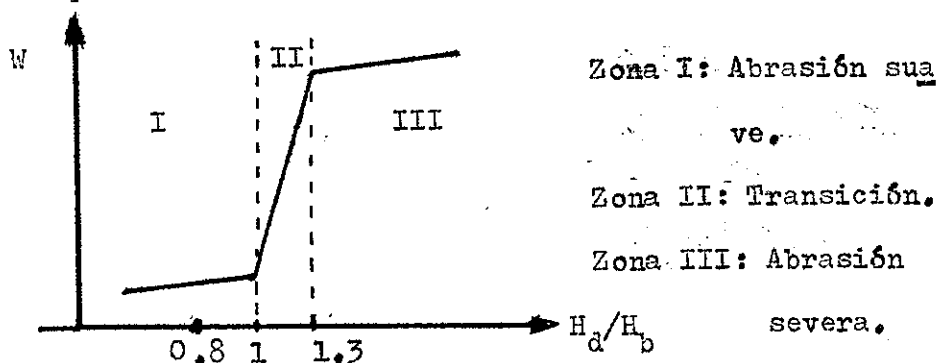
$$W = K'_a \cdot \frac{F}{H} \quad ; \quad H = \text{dureza del más blando.}$$

NOTA: En el caso de desgaste abrasivo producido por partículas sueltas, del tipo a) de la figura anterior, se llegaría a una expresión exactamente igual.

Solo que en ellas, el valor de la constante  $K'_a$  sería más bajo, pues no todas ellas actúan produciendo el fenómeno de "surcada".

Dado que se ha comprobado experimentalmente que el parámetro más importante para valorar el contacto abrasivo no es la carga normal  $F$ , sino la dureza relativa de los materiales en contacto, se han realizado numerosos trabajos, comparando la relación entre las durezas de ambos  $H_d/H_b$  ( $H_d$  = dureza del más duro, que funciona como abrasivo;  $H_b$  dureza del más blando) con el desgaste producido (lógicamente, en el más blando), para iguales valores de la presión aparente ( $F/A_0$ )

Las gráficas que se obtienen tienen la forma que se ve en la figura



Se ha observado que cuando  $H_d/H_b < 1$ , el desgaste es suave. Cuando  $H_d/H_b = 1$ , se está en una zona de transición, donde el desgaste = puede ser suave o severo. Cuando  $H_d/H_b > 1.3$ , el desgaste es siempre severo.

En el desgaste abrasivo, la capa contaminante tiene una == considerable importancia.

En la zona de abrasión suave, la capa contaminante es practicamente la única " desgastada".

Se produce un residuo fino, procedente de la trituración de la capa de oxido, el cual pulimenta las superficies metálicas, sin "desgastarlas".

Cuando se produce abrasión severa, los residuos contienen, no solo particulas de oxido de la capa contaminante, sino además particulas metalicas. Las superficies se encuentran rugosas, y el desgaste progresa rápidamente.

### 6.2.3.- DESGASTE POR FATIGA SUPERFICIAL.

En el desgaste producido por el fenómeno de fatiga hay que distinguir entre el contacto con rodadura, y el contacto con deslizamiento.

En el contacto con rodadura, la presión que se alcanza en la zona de contacto ( esté o no interpuesta una capa de lubricante) es elevada, viniendo dada por las expresiones de Hertz. Como se sabe, la máxima tensión de compresión se tiene en la superficie, mientras que la máxima tensión cortante se tiene a alguna distancia de la superficie, en el interior de cada uno de los elementos en contacto.

En la medida que progresa la rodadura, la dirección de esta tensión cortante ( y el módulo) va cambiando, con lo cual aparece el fenómeno de fatiga.

En el desgaste por fatiga en elementos rodantes se caracteriza por la formación de grandes fragmentos de material, que " saltan" de la superficie, pero siempre " despues de un cierto número de revoluciones".

Antes de ese número crítico de revoluciones, aparentemente no se detecta ninguna pérdida de material ( lo cual contrasta profundamente con el desgaste abrasivo y adhesivo, en elementos deslizantes, que siempre es progresivo, desde el primer momento).

Como consecuencia de esto, el conocer la velocidad del desgaste ( o tasa de desgaste) en un contacto con rodadura no presente ningún interés, y si el número de ciclos ( o tiempo, a una determinada velocidad) que el material puede vivir sin deteriorarse.

Numerosos experimentos efectuados con cojinetes de rodamientos demuestran que la vida N ( definida como el número de revoluciones alcanzado por al menos el 90% de elementos similares, en un análisis

sis estadístico de los fallos) es inversamente proporcional al cubo de la carga aplicada

$$N F^3 = \text{cte.}$$

En el contacto con deslizamiento, el fenómeno de desgaste por fatiga opera de otro modo.

En efecto, es fácil imaginar que el contacto entre muchas de las asperezas no se resuelve en una rotura de las mismas, ni en el trazado de un surco, sino solamente en una deformación, tanto plástica como elástica.

Como es lógico, después de un número crítico de tales contactos, una aspereza puede fallar por fatiga, produciendo un fragmento "suelto".

Para muchos investigadores, este fenómeno es la causa más importante de desgaste, entendido éste como pérdida de material de ambas superficies, con formación de partículas libres.

Se ha llegado a pensar, incluso, que el desgaste por corrosión y por fatiga son las únicas causas del desgaste suave.

Por otro lado, al hablar de desgaste adhesivo se introdujo un factor K, definido como la parte de las asperezas en contacto que realmente se rompen. Evidentemente, esta teoría puede explicar la transferencia de partículas de un material a otro, pero no la pérdida real de partículas, la forma de quedar estas libres (En particular, la teoría de desgaste adhesivo no puede explicar la pérdida de partículas por el material más duro).

Todos estos aspectos quedan, sin embargo, perfectamente explicados por el mecanismo de fatiga.

El factor K se interpreta como el número de partículas producidas cuando una aspereza ha experimentado el suficiente número de

contactos y deformaciones para producir su rotura por fatiga.

De paso, ello explica también la pérdida de partículas por el material más duro.

Por supuesto, el mecanismo de desgaste por fatiga no excluye las transferencias de materia de unas superficies a otras, según se expuso en la teoría de desgaste adhesivo.

#### 6.2.4.- DESGASTE CORROSIVO.

Cuando el frotamiento tiene lugar en un ambiente corrosivo ( gaseoso o líquido) , se establecen reacciones de oxidación en las superficies, formandose los correspondientes óxidos.

Estos óxidos tienen por lo general una pobre adherencia con la superficie, por lo que cualquier frotamiento los desprende fácilmente. El proceso se repite, entonces, para nuevas capas de material. En consecuencia, el desgaste corrosivo requiere dos factores: la existencia de corrosión y la existencia de frotamiento.

Como se sabe, la velocidad de creación de capa de óxido en un acero decrece exponencialmente con el tiempo, y a menos que esta capa sea removida por frotamiento, la reacción de oxidación rápidamente se hace despreciable.

La corrosión, junto con el desgaste abrasivo, son las causas más importantes del desgaste de los elementos de máquinas. Y lo peor de todo es que por lo común los óxidos de hierro ( en el caso de los aceros) son fuertemente abrasivos, por lo cual el fenómeno de desgaste corrosivo trae aparejado otro de desgaste abrasivo.

También, las grietas producidas por los contactos a elevadas presiones son aceleradas por el progreso del fenómeno de oxidación hacia el interior de las mismas.

Finalmente, también puede mencionarse el fenómeno de corrosión que se produce en los metales debido a las tensiones internas originadas en la fase de conformación del elemento, cuando éste se introduce en un medio corrosivo.

6.2.5.- OTROS TIPOS DE DESGASTE: FRETTING, EROSION, CAVITACION, CHISPAS ELECTRICAS, ETC.

Fretting.-

El fenómeno de desgaste conocido por fretting responde a = una combinación de los mecanismos ya vistos, pero es interesante = tener una visión clara de él.

El fretting ocurre cuando movimientos vibratorios de muy baja amplitud tienen lugar entre superficies metálicas cargadas, en contacto.

(El fretting se descubrió como un desgaste, en forma de polvo fino de material corroído, entre las cabezas de los tornillos y las piezas que unían, situados en máquinas donde se producía un cierto nivel de vibración.)

Basicamente el fretting es un desgaste adhesivo, en el que la carga normal produce la adhesión entre las asperezas, y la vibración causa su ruptura.

Este fenómeno se combina con el de corrosión, produciéndose un fino polvo ( en el caso de acero) conocido por " cocoa".

En este caso, el desgaste inicial se debe a la corrosión. Entonces, las partículas de óxido actúan como abrasivo, y debido al cierre hermetico de las superficies ( que no se deslizan macroscopicamente) no pueden salir de entre ellas. Posteriores movimientos oscilatorios causan un nuevo desgaste abrasivo, con lo que las superficies de metal pueden ser de nuevo atacadas por el óxido, etc.

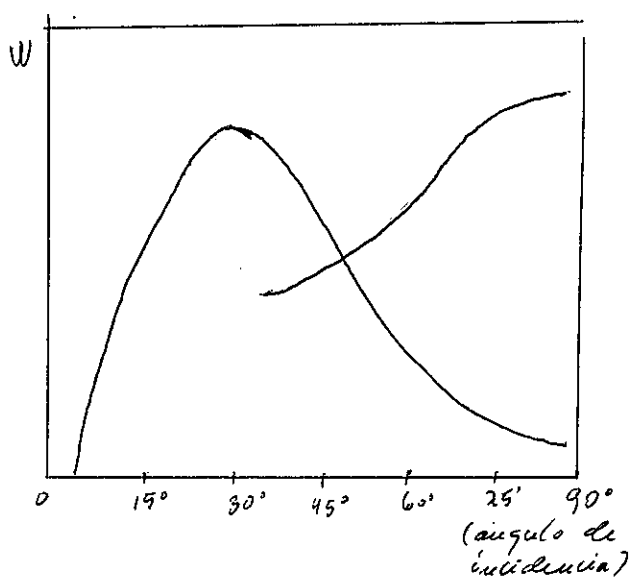
Erosión.-

El termino erosión se refiere al desgaste experimentado = por la superficie de un sólido cuando otro sólido ( en forma de = partículas finas) o un líquido, choca contra él.



Aunque hasta hace poco el desgaste por erosión no era muy tenido en cuenta, el desarrollo de mecanismos operando a gran velocidad, y el empleo de materiales de alta relación tensión-densidad (aluminio, magnesio, etc) han llevado a que este mecanismo de desgaste sea considerado y estudiado con más detalle.

En el caso de erosión por partículas sólidas se ha observado que la tasa de desgaste depende del ángulo de incidencia de las partículas sobre la superficie, y que este desgaste presente gráficas diferentes para materiales ductiles y frágiles.



En materiales ductiles se supone que el mecanismo de desgaste, hasta los 30°, es similar a la abrasión.

Con ángulos cercanos a los 90° se supone que el mecanismo de desgaste es la fatiga.

En materiales frágiles se forman grietas, las cuales se van ligando unas con otras, hasta que se desprenden partículas de material.

En ambos casos, se ha comprobado que el desgaste es proporcional a la energía cinética de las partículas incidentes, o sea, al cuadrado de su velocidad.

En el caso de erosión por partículas líquidas, el mecanismo solo opera por encima de velocidades del orden de 1 000 m/seg, y en estas condiciones, las altas presiones experimentadas exceden de la tensión de fluencia de muchos materiales.

Entonces, la deformación plástica o la fractura pueden resultar

para algunos impactos, de manera que su continua repetición pueden originar un " picado" y el consiguiente " desgaste erosivo".

Desgaste por cavitación.-

Cuando un sólido y un fluido se encuentran en movimiento relativo, pueden formarse burbujas en el seno del fluido, las cuales se destruyen contra la superficie del sólido, causando un brusco choque del liquido contra él.

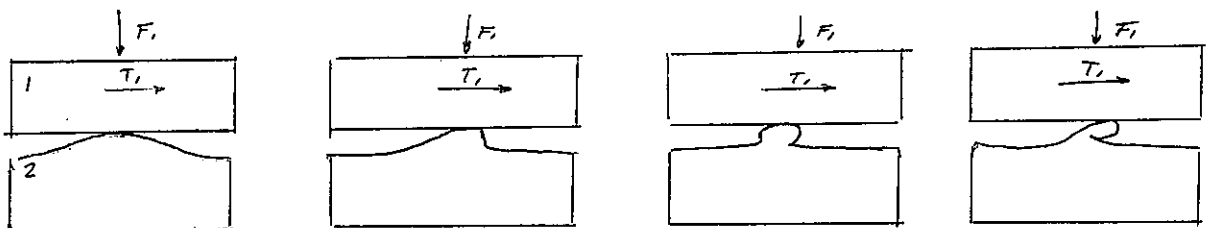
Este fenómeno ocurre en las helices de los barcos y en los alabes de las bombas centrífugas.

Desgaste por chispas.-

Cuando salta una chispa electrica entre dos superficies metálicas se produce un desprendimiento de material, como ocurre en los contactos electricos. Si además, tales contactos conllevan un frotamiento ( como es el caso de los contactores de palanca, etc.), el desgaste puede ser considerable.

Desgaste por formación de rollos.-

En materiales muy elásticos, cuando entre ellos existe un alto coeficiente de rozamiento, pueden formarse arrollamientos superficiales de los mismos, con la consiguiente rotura posterior



### 6.3.- TAMAÑO DE LAS PARTICULAS DESGASTADAS.

Aunque este es un punto que no ha sido tratado al hablar de los mecanismos de desgaste, puede tener cierto interés saber de que factores depende el tamaño de las partículas desprendidas.

En general, puede atacarse el problema con cierto rigor partiendo de un balance energético entre ambos cuerpos en contacto, antes y después de la pérdida de partículas.

Rabinowicz sugería que si una partícula se formaba, la energía elástica almacenada en el cuerpo antes de su pérdida debería ser mayor que la que tendría la nueva superficie, creada después.

Para cuantificar esto, supone una partícula semiesférica de radio  $r$ , y cuyo volumen será

$$\frac{2}{3} \cdot \pi \cdot r^3$$

Como la energía por unidad de volumen, considerando un cuerpo elástico, vale  $\frac{1}{2} s_F^2/E$ , la energía elástica de todo el volumen será:

$$\frac{2}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \frac{s_F^2}{2 \cdot E}$$

La energía de la nueva superficie creada, suponiendo que la semiesfera se rompe a lo largo de su plano diametral, será:

$$2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \gamma$$

donde  $\gamma$  es la energía superficial por unidad de área.

Entonces, ha de ocurrir que:

$$\frac{2}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \frac{s_F^2}{2 \cdot E} > 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \gamma$$

$$r > \frac{6 \cdot E \cdot \gamma}{S_F^2}$$

Como en los metales,

$$S_F = H/3 \quad (H = \text{dureza})$$

$$r > \frac{54 \cdot E \cdot \gamma}{H^2}$$

para partículas de otra forma puede admitirse

$$r > \frac{K \cdot E \cdot \gamma}{H^2} \quad \text{siendo } K \approx 54$$

Autores posteriores admiten que este valor de  $r$  es correcto como "valor máximo obtenible", aún cuando es probable que cuando se sumen al proceso otras formas de energía (energía cinética, etc.), este valor puede ser aún más alto.

#### 6.4.- FACTORES QUE AFECTAN AL DESGASTE.

- Tal como se ha ido mencionando en todo lo expuesto sobre el desgaste, existen muchos factores que afectan a la intensidad del mismo, los cuales podríamos recopilar en 4 grandes grupos:

- Efectos de la capa contaminante.
- Efectos de la temperatura.
- Efectos de la carga,
- Efectos de la compatibilidad.

##### Efectos de la capa contaminante:

Dado que el desgaste es un fenómeno superficial, es obvio señalar que la importancia de la capa extrema es fundamental. Como es lógico, cuando mayor sea el área real de contacto, y cuanto mayor el número de microsoldaduras, más fuerte será el desgaste. Por ello, en ausencia de capa contaminante (lubricación en vacío), con cargas no muy elevadas, el desgaste de los metales puede llegar a ser catastrófico, dada la dureza de las microsoldaduras formadas.

Por contrario, las capas contaminantes, especialmente óxidos y lubricantes, reducen fuertemente el desgaste, al impedir que se formen muchas de las microsoldaduras, o que las formadas resulten más débiles. Naturalmente, el fenómeno es muy diferente según se trate de desgaste suave o severo, como ya se ha estudiado.

En cuanto a la capa lubricante, también puede limitar la formación de microsoldaduras, aunque su efecto más importante es impedir la rápida formación de la capa de óxido.

El efecto de inhibición de las microsoldaduras es mucho más poderoso en el caso de lubricantes sólidos.

Finalmente, también pueden considerarse capas contaminantes que

disminuyen el desgaste aquellas películas de rodio, cromo, etc, que con tal fin se depositan en la superficie de un elemento de máquina.

Efectos de la temperatura:

La influencia de la temperatura alcanzada entre dos superficies rozantes puede ser:

- La de alterar las propiedades fisicoquímicas de los propios materiales.
- La de alterar la formación de la capa contaminante.
- La de alterar las propiedades del lubricante.

En general, la dureza de los metales disminuye con la temperatura. En consecuencia, el desgaste aumenta, al aumentar la temperatura. ( a temperaturas superiores a 850º ningún metal resiste el desgaste, y se deben emplear en las superficies deslizantes materiales = cerámicos).

Efectos de la carga:

Como el incremento de la carga causa un incremento de la fuerza de rozamiento, y con ella de la temperatura, los efectos serán los mismos que los mencionados anteriormente.

Además, al aumentar la carga puede pasarse de un desgaste suave a otro severo. ( si  $p = \frac{F}{A_0} > \frac{H}{3}$  )

Efectos de la compatibilidad:

Dados los diferentes mecanismos de desgaste, es lógico pensar que existan materiales con más o menos propensión al desgaste, cuando son puestos en contacto. Este es un punto que se ha comprobado está relacionado con la solubilidad mutua

6.5.- MEDIDA DEL DESGASTE.

- El desgaste puede medirse por cualquiera de los conceptos siguientes ( en cada uno de los cuerpos en contacto)

- Pérdidas de peso.
- Cambios de volumen.
- Cambios en una dimensión dada.

• En base a estos parámetros, se definen los siguientes valores = del desgaste:

- Tasa lineal de desgaste:

$$K_i = \frac{\text{espesor de la capa desgastada}}{\text{longitud deslizada}} = \frac{h}{L}$$

- Tasa de desgaste volumetrico:

$$K_v = \frac{\text{volumen de material desgastado}}{\text{distancia deslizada x área aparente}} = \frac{\Delta v}{L \cdot A_{ap}}$$

- Razón energetica de desgaste:

$$K_e = \frac{\text{volumen de material desgastado}}{\text{trabajo de rozamiento}} = \frac{\Delta v}{F \cdot L}$$

- tasa gravimetrica de desgaste:

$$K_w = \frac{\text{peso del material desgastado}}{\text{distancia deslizada x área aparente}} = \frac{\Delta w}{L \cdot A_{ap}}$$

• Abrasionabilidad

$$\gamma = \frac{\text{volumen abrasionado}}{\text{trabajo de fricción}} = \frac{\Delta v}{F \cdot L} = \frac{\Delta v}{f \cdot F \cdot L} = \frac{\Delta v / F \cdot L}{f}$$

siendo  $A' = \frac{\Delta v}{F \cdot L}$  el factor de abrasión.

• Coeficiente de resistencia a la abrasión:

$$\beta = \frac{1}{\gamma} = \frac{f}{A'}$$

- En la práctica todos estos coeficientes resultan algo teóricos, y difíciles de medir en condiciones reales de funcionamiento. Por tal motivo suelen depositarse a los miembros en deslizamiento con puntos de material radioactivo, midiendo luego su "traza" en el aceite lubricante, la cual, obviamente, será proporcional al desgaste sufrido.



Bibliografia:

- Principles of Tribology  
J. Halling.
- Tribology  
H. Czichos
- Principles and applications  
of Tribology  
D. F. Moore