

100  
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESTUDIO TRIBOLOGICO DE MATERIALES,  
EL CASO DEL ZINALCO

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A N :  
RICARDO NEVAREZ VEGA  
LUIS FLAVIO ROMERO PEREZ

DIRECTORES DE TESIS: ING. JAVIER JIMENEZ GARCIA  
M.C. ARTURO BARBA PINGARRON



MEXICO, D. F.

1992

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## INDICE

INTRODUCCION.	1
I.- FRICCION Y DESGASTE.	4
I.1.- La hipótesis de la fricción seca.	9
I.2.- Relación entre el coeficiente de fricción y el factor de desgaste de los materiales.	13
II.- CLASIFICACION DE LOS PROCESOS DE DESGASTE.	23
II.1.- Tribosistemas.	23
II.2.- Mecanismos de desgaste	27
II.3.- Desgaste por adhesión.	28
II.4.- Desgaste por abrasión.	32
II.5.- Desgaste por fatiga superficial.	38
II.6.- Desgaste por fritting.	41
II.7.- Desgaste por oxidación o desgaste Triboquímico.	42
II.8.- Desgaste por delaminación.	45
II.9.- Desgaste térmico.	46
II.10.- Desgaste por descamación (Spalling)	47
II.11.- Desgaste por Pitting.	47
III.-SUPERFICIES EN CONTACTO.	49
III.1.- Naturaleza de las superficies sólidas.	51
III.2.- Textura superficial.	54
III.3.- Mecanismos básicos de la Tribología.	59
III.3.1.- Enlaces en estado sólido.	61
III.3.2.- Estructura cristalina.	66
III.3.3.- Defectos superficiales.	74
III.4.- Interacción superficial con el ambiente.	78
III.4.1.- Fisiabsorción.	78
III.4.2.- Quimiabsorción.	80
III.4.3.- Formación de compuestos.	80
III.5.- Efectos microestructurales sobre la fricción y el desgaste.	81

III.5.1.- Efecto de la microestructura sobre la fricción.	83
III.5.2.- Efectos de la microestructura sobre el desgaste.	91
III.6.- Contacto Mecánico.	87
III.6.1.- Deformación elástica.	101
III.6.2.- Deformación plástica.	110
III.7.- Temperatura Superficial.	114
IV.- DESGASTE POR DESLIZAMIENTO.	120
IV.1.- Adhesión.	124
IV.2.- Fatiga superficial.	134
IV.3.- Reacción triboquímica.	138
V.- METODOS PARA EVALUAR LAS PROPIEDADES FRICCIONALES DE LOS MATERIALES.	145
V.1.- Metodología de diseño.	145
V.2.- Pruebas geométricas típicas.	150
V.2.1.- Fricción deslizante y pruebas de desgaste.	153
V.3.- Pruebas de Abrasión.	158
V.4.- Pruebas de fatiga en contacto por rolado.	161
VI.- ZINALCO.	169
VI.1.- Propiedades Mecánicas.	172
VII.- DESARROLLO EXPERIMENTAL.	174
VII.1.- Memoria de cálculo.	179
VIII.- PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS.	189
VIII.1.- Gráficas obtenidas.	202
IX.- CONCLUSIONES.	258
X.- BIBLIOGRAFIA.	261

## INTRODUCCION

El estudio de la fricción, desgaste y lubricación son fenómenos trascendentales debido a la interacción que existe entre los elementos mecánicos, ya que reducen la eficiencia de las máquinas, con consumos de energía mayor, incrementando el costo de producción.

Del 80% al 85% de las piezas en las máquinas, deben cambiarse a causa de la disminución de tamaño de la superficies (desgaste) debido al contacto deslizante a los cuales están sometidas durante el trabajo. Por ésta razón, se ha de poner gran atención al acabado superficial, propiedades físicas, estructura de la superficie exterior y las condiciones que puedan cambiar las propiedades iniciales; pues la disminución de las pérdidas en el orden de 1% significa el ahorro de millones de pesos, y por resultado un ahorro de energía.

El presente trabajo abarca temas de lubricación, fricción y desgaste. Para englobar estos temas se introdujo una palabra científica derivada de la palabra griega TRIBOS que significa frotamiento o roze, esto data aproximadamente del año 1966. Por la importancia y la dependencia de los temas mencionados, nació la Tribología como una ciencia capaz de analizar problemas que involucren lubricación, fricción y desgaste. Por tanto Tribología se define como la ciencia y práctica que estudia la interacción de superficies en movimiento relativo. Ya que ésta es una ciencia actual no se ha desarrollado en su totalidad, pero debido a la necesidad de ahorrar energía, el hombre ha iniciado una investigación científica y tecnológica con el fin de explicar los diferentes fenómenos que provocan el desgaste y disminuir lo máximo posible éste problema.

El presente trabajo pretende determinar el factor de desgaste y la razón de desgaste de la aleación Zinalco<sup>MR</sup> y obtener gráficas representativas de su comportamiento al desgaste (por medio de la razón de desgaste y de su pérdida de peso). El análisis se efectuó en probetas obtenidas por el proceso de fundición y con un contenido de

cobre igual al 2%.

Existen muchos métodos para determinar el desgaste de un material. El proceso estudiado corresponde al desgaste por deslizamiento y cumple con las características especiales de funcionamiento, desarrollo, repetibilidad, cálculo y obtención de gráficas y resultados. Esto debido a que se utilizó una máquina especial para estudios de Tribología modelo CYGNUS II DISC PINS, de origen inglés, en la cual se simuló un proceso de deslizamiento en seco; el desarrollo recomendado por científicos de gran reconocimiento en esta área así como implementos tales como una balanza analítica de alta eficiencia, es decir, el éxito de estas pruebas se basa en la correcta aplicación de propiedades macrogeométricas, microgeométricas y del medio ambiente, y no debemos descuidar ninguna de estas áreas. Actualmente en procesos de manufactura y en metalurgia mecánica se utiliza un coeficiente de fricción para determinados cálculos sin especificar muchas veces estas propiedades y los resultados obtenidos tienen un rango de confiabilidad muy bajo, sin embargo en un proceso de fabricación el cálculo de fricción y desgaste de los metales se debe hacer idealizando estos procesos en un método tribológico para que los resultados sean más confiables.

En un vehículo automotor se ha demostrado que la disminución del factor de arrastre influye en la eficiencia de un motor, y que es más barato introducirse en el área aerodinámica; lo mismo ocurre con la tribología pues el costo de investigar nuevos materiales con coeficientes de fricción y factores de desgaste menores es relativamente más barato que estudiar la eficiencia de un motor por dinámica de fluidos, transferencia de calor o por análisis químico.

La simulación de los procesos de desgaste se deben hacer lo más cercano posible a la realidad, pues una de las aplicaciones de la tribología es precisamente observar el comportamiento de un material en condiciones de trabajo y poder analizarlo en el escritorio y no en la práctica como muchas veces se realiza.

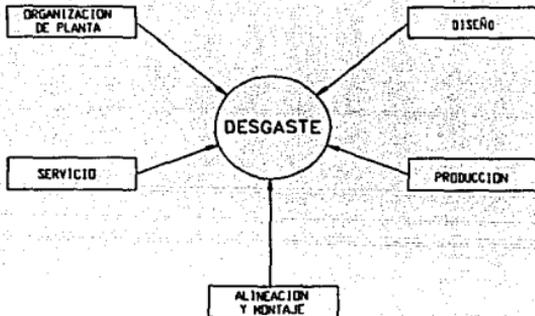
Se desarrollo la simulación del proceso de desgaste por deslizamiento para el Zinalco<sup>MR</sup>, pero debido a que no se tiene base de comparación, se realizó la prueba en materiales convencionales así como en aleaciones especiales, tales como el duraluminio y el bronce Salmenac 773 (bronce SAE 660) usados comunmente en aplicaciones antifricción y de desgaste.

## I. FRICCIÓN Y DESGASTE

La fricción y el desgaste no son propiedades intrínsecas de los materiales pero son características de los sistemas de ingeniería (tribosistemas). Fricción es la resistencia al movimiento y aumenta cuando el área real de contacto es mayor; y desgaste se define como la pérdida progresiva de material en la superficie de contacto ocurriendo como un resultado del movimiento relativo de dos superficies, en otras palabras es la pérdida progresiva de material de la superficie de un cuerpo sólido debido a la acción mecánica, al contacto y al movimiento contrario de sólidos.

El estudio del desgaste es muy importante debido a que en la interacción de elementos mecánicos existe este fenómeno que reduce la eficiencia de las máquinas provocando cambios dimensionales o daños superficiales que a su vez causan problemas secundarios tales como vibración o mal funcionamiento.

Las pérdidas económicas debido al desgaste se pueden reducir generalmente por una organización, diseño propio, producción, montaje y servicio óptimo de la planta. El control económico del desgaste puede comenzar con el proceso correcto de fabricación para obtener un producto, incluye la elección del equipo y lugar de instalación, así como la estandarización del cuidado de cada elemento que es susceptible al desgaste. Un diseñador puede en definitiva reducir el desgaste de elementos mecánicos optimizando la transferencia de masa y movimiento, o solamente moderando el esfuerzo y usando apropiadamente los materiales y lubricantes como función de la carga, temperatura y medio ambiente; intervienen otros factores tales como el acabado superficial, los tratamientos térmicos, etc. Es decir, todo en absoluto interviene para que los elementos tribológicos sufran fricción y desgaste, incluyendo la microestructura del material ya que pueden intervenir defectos cristalográficos, vacancias, dislocaciones, tamaño de grano, etc.



**Figura I.1.- Factores que influyen en la estructura del desgaste.**

El fenómeno del desgaste se puede investigar por medios microscópicos y por herramientas superficiales. Pero primero se tiene que determinar en un sistema tribológico y en los elementos de máquinas cuál es el mecanismo de desgaste que influye, reducirlo y si es posible eliminarlo.

Los mecanismos de desgaste que se han estudiado y que demuestran la pérdida de material son los siguientes: adhesión, abrasión, corrosión, fatiga superficial, erosión, fretting, cavitación y delaminación. Esta clasificación la dió a conocer el científico Ravinovicz en 1965 (1) y de ella se hablará en el tema II.

En algunos elementos de máquinas, pequeñas cantidades de desgaste son detrimetales, es decir, que el desgaste se produce por partículas desprendidas de los materiales en contacto, lo que a su vez contribuye al mal funcionamiento de los componentes individuales.

La utilidad del microscopio en el estudio del desgaste se a demostrado continuamente con información que han dado a conocer diferentes centros de investigación y diversos científicos que se interesan en el ahorro de energía consumida en sistemas tribológicos.

En conclusión podemos decir que el desgaste se produce por la fricción y a decir verdad son propiedades intrínsecas dependientes una de la otra. En los procesos de trabajo de los metales en el cuál existe contacto directo de la herramienta y la pieza de trabajo existe fricción. La existencia de la fricción en los procesos de deformación es un factor importante y a veces influye para bien o para mal según el diseño, las cargas requeridas, el calor producido, etc.

Las leyes clásicas de la fricción son formuladas por Amontons y Coulomb (2) las cuáles dicen que el coeficiente de fricción entre superficies planas, limpias y secas es independiente de la carga aplicada, la velocidad y el área de contacto. Bajo condiciones moderadas éstas leyes son siempre aplicables, sin embargo en el proceso del trabajo de los metales, la interfase entre la herramienta y la pieza de trabajo es a menudo sujeta a muy altas presiones y temperaturas. Bajo éstas condiciones las leyes clásicas de la fricción no son aplicadas.

Se han desarrollado varias teorías para explicar el fenómeno de la fricción y todas ellas conducen a lo mismo; una influencia negativa en los elementos de máquinas, por ejemplo: se evalúa que cerca del 30% a 50% de toda la energía producida en el mundo se gasta para vencer la resistencia de la fricción; en coches y camiones cerca del 30% al 35% de la potencia del motor está consumida por la fricción. La disminución de éstas pérdidas en cada 1% significa el ahorro de millones de pesos.

Para disminuir ésta influencia negativa de la fricción en maquinaria se debe aplicar los materiales adecuados, maquinado

correcto de las superficies en contacto y la lubricación (que no se tratará en este trabajo). Las medidas de fricción son la fuerza y el momento de fricción. La resistencia de fricción está determinada por el coeficiente de fricción. Generalmente, según el teorema de Coulomb (1781), existen dos formas de fricción, que son:

- 1.-Fricción estática.
- 2.-Fricción cinética.

La primera determina fricción existente durante inmovilidad, y la segunda cuando hay movimiento relativo de un elemento sobre otro. El propio Coulomb (1) demostró también que la fricción estática es mayor a la cinética y que prácticamente la fricción cinética es independiente de la velocidad. Esto se muestra en la figura I.2.

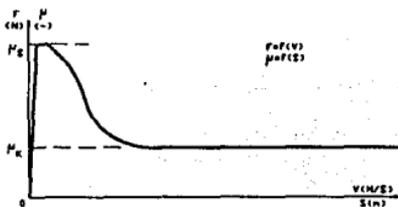


Figura I.2.- Dependencia de la fuerza de fricción  $F$  de la velocidad de desplazamiento  $v$ .

La figura anterior también muestra la dependencia entre el coeficiente de fricción  $\mu$  y el desplazamiento  $s$ . En este caso  $\mu_s$  es el coeficiente estático de fricción y  $\mu_k$  es el coeficiente cinético de fricción. Unos valores de  $\mu_s$  y  $\mu_k$  para varios materiales colaboradores se muestran en la figura I.3.

PAREJA DE MATERIALES UNIDOS	FRICCIÓN CINÉTICA	FRICCIÓN ESTÁTICA
	$\mu_k$	$\mu_s$
Acero-fundición	0.18	0.30
Acero-acero	0.10	0.17
Acero-latón	0.15	0.19
Fundición-fundición	0.16	0.18
Acero-hierro fundido	0.15	0.32
Acero-cobre	0.10	0.22
Acero-grafito	0.08	0.12
Cobre-grafito	0.10	0.14
Acero-pollestireno	0.11	0.20
Acero-poliamido	0.05	0.10
Acero-teflón	0.04	0.09
Acero-Nylon	0.08	0.12
Acero-vidrio	0.08	0.19
Acero-ágata	0.19	0.38
Acero-rubi	0.11	0.13
Acero-fibra	0.12	0.14

Figura I.3.- Valores de los coeficientes de fricción estáticos y cinéticos.

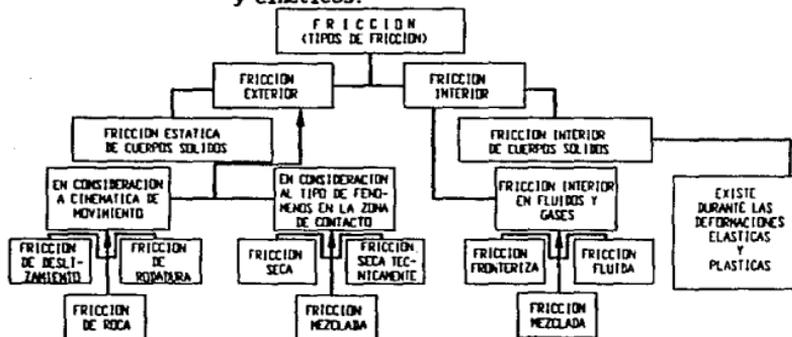


Figura I.4.- Tipos generales de fricción que aparecen en maquinaria.

De la figura I.3 se aprecia que  $\mu_s$  es mayor cerca del 17% al 140% de  $\mu_k$ . En la figura I.4 se ve una distribución de fricción en forma muy general pero también muy útil.

## II.1. LAS HIPOTESIS DE LA FRICCIÓN SECA.

todavía no existe una teoría completa y total de la fricción seca que pueda explicar todos los fenómenos que aparecen durante este proceso. Existen tres grupos de éstas teorías pero ninguno contiene una dependencia que determinaría el coeficiente de fricción  $\mu$  en cualquiera de las condiciones de contacto, cada una explica parcialmente los procesos de fricción y son útiles para algunos cálculos en ciertas condiciones de contacto:

- I.-Hipótesis mecánicas
- II.-Hipótesis moleculares.
- III.-Hipótesis mecánicas-moleculares.

Dentro del primer grupo se encuentran las siguientes:

- 1.-Hipótesis de Amontons:  $F = \mu N$
- 2.-Hipótesis de Coulomb:  $F = A + \mu N$
- 3.-Hipótesis de Bowden:  $\mu = \lambda c / P$

Donde: F = Fuerza de fricción.

N = Carga normal.

$\mu$  = Coeficiente de fricción.

A = Área del contacto entre moléculas de ambas superficies

$\lambda c$  = Resistencia al corte de acoplamientos metálicos de rugosidades de ambas superficies.

P = Presión o resistencia del metal con menos dureza (del orden del límite de plasticidad).

La hipótesis de Coulomb se basa en que el frotamiento es debido a una interpenetración de las asperezas de las superficies de contacto

Por lo tanto cuanto más irregular es la superficie mayor es el frotamiento y cuando más pulida esta la superficie menor es el frotamiento, ésta explicación se generaliza para superficies relativamente irregulares pues cuando existen dos superficies rectificadas con exactitud se presenta la adhesión que se explica por las teorías moleculares. En consecuencia, la adhesión molecular contribuye a crear el frotamiento entre dos superficies deslizantes. En el caso de separaciones muy pequeñas, las fuerzas moleculares intervienen para dar lugar a una fuerte adhesión (y en algunos casos soldadura) entre superficies limpias y presentar una resistencia al deslizamiento. La relación se expresa cualitativamente mediante una gráfica que , de modo general, relaciona el acabado superficial con el frotamiento. Esta gráfica se presenta en la figura I.5.(2).



Figura I.5.- Relación cualitativa entre la irregularidad superficial y el coeficiente de frotamiento.

La ecuación presentada por la hipótesis de Amontons se aplica hasta ahora en los cálculos de ingeniería pero las hipótesis moleculares tienen más importancia en elementos rectificadas con exactitud, éstas son las siguientes.

1.-Hipótesis de Tomlinson:  $\mu = (k \cdot E) / (n \cdot P \cdot x)$

2.-Hipótesis de Dieriajin:  $F = \mu(N + N_0)$

Donde: K = No. de parejas moleculares en contacto directo durante el desplazamiento.

E = Energía de rompimiento de las parejas moleculares.

n = Numero total de parejas moleculares en contacto.

P = Fuerza de repulsión entre moléculas, en cada pareja molecular.

x = Camino de desplazamiento.

$N_0$  = Carga normal equivalente a las fuerzas de atracción molecular.

La forma más sencilla es la de Dieriajin, el problema es como determinar la fuerza equivalente  $N_0$  que puede ser del orden de N en cargas normales pequeñas, y proporcional en cargas mayores al contacto real, entonces:

$$N_0 = P_0 \cdot A_r$$

Donde:  $P_0 = [N/mm^2]$  Es la fuerza de atracción molecular.

$A_r = [mm^2]$  Es el área real de contacto.

La primera teoría molecular se explica por la teoría de la atracción molecular de Tomlinson o Frotamiento cohesivo. Aquí Tomlinson supuso que el frotamiento seco es el resultado de la intervención molecular entre las superficies en contacto y relacionó el coeficiente de frotamiento seco con las propiedades elásticas de los materiales. Esta relación se basó partiendo del análisis de Hertz para la anchura del área de contacto de los cuerpos elásticos en función de la carga. La teoría determina que entre las moléculas actúan fuerzas de atracción y repulsión. Esta teoría reconoce que el campo de atracción molecular se extiende probablemente a lo largo de una distancia equivalente a varios diámetros, a partir del centro de la molécula y, que también existe una fuerza de repulsión que actúa

en forma más restringida. A esto se debe que dos cuerpos choquen, vibren y se deslicen produciendo una pérdida de energía que se transmite en frotamiento y por eso algunas moléculas se desplazan de su posición de equilibrio produciendo calor.

Esta teoría defiende también que el coeficiente de fricción  $f$  debería relacionarse con las constantes de los materiales.

$$\text{Por lo tanto: } f = 1.07 \cdot 10^{-4} (\theta_1 + \theta_{11})^{2/3}$$

$$\text{donde: } \theta = (3E + 4G) / [G(3E + G)]$$

$E$  = Módulo de Young.

$G$  = Módulo de cizallamiento.

Basándose sobre las hipótesis mecánicas y moleculares el profesor Kragelski formó su propia hipótesis de fricción llamada hipótesis molecular-mecánica, que es:

$$\mu = \alpha (Ar/N) + \beta \quad \text{y} \quad F = \alpha Ar + \beta N$$

$$\text{tomando } (\mu = F/N)$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son coeficientes que dependen de las propiedades moleculares y mecánicas de los materiales en contacto,  $\alpha$  [ $N/mm^2$ ] y  $\beta$  [-]. De éstos se han desarrollado tablas y ecuaciones aproximadas que tienen importancia en la ciencia pero también en investigaciones y ramas muy modernas de la industria de la maquinaria (vehículos extraterrestres, hidráulica muy elevada, robots mecánicos, etc.). Lo ideal sería que algunos de éstos modelos generalice el frotamiento en seco o frotamiento al vacío, ya que en la realidad se le llama frotamiento en seco a la que ocurre comunmente en maquinaria sin engrasar, ya que no se pueden eliminar las capas atómicas de aire.

## 1.2.-RELACION ENTRE EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN Y EL FACTOR DE DESGASTE DE LOS MATERIALES.

Se puede relacionar el coeficiente de fricción y el factor de desgaste de los diferentes metales en el caso de desgaste por deslizamiento por un análisis matemático muy aproximado. Este análisis se basa en la teoría de la delaminación del desgaste; el campo de deformación plástica determinada empíricamente cerca de la superficie al comienzo de la delaminación de la capa de desgaste y toma en cuenta el efecto del ablandamiento cíclico. Esto se ha argumentado en el caso de la energía pues han concordado los valores experimentales con los teóricos.

Uno de los problemas más importantes en los modelos es que la energía que se requiere para que exista desgaste es muy pequeña, por ejemplo el modelo de Archad (4) predice un requerimiento de energía en un orden de magnitud dos o tres veces más pequeña que el trabajo externo realizado. Este camino se explicó muy bien por las proposiciones de la teoría de la adhesión (ver capítulo II.3) ya que hay partículas de desgaste que se transfieren de una superficie a otra antes de ser soltadas. Esto ocurre para ciertos metales, por ejemplo; oro, cobre, etc. En los aceros esta transferencia es muy limitada. Además, no hay casos evidentes de que solamente una de mil partículas de desgaste que se crean sea desprendida.

La energía disipada por la tracción en una superficie deslizante no puede tomarse en cuenta cuando los simples cizallamientos o cortes de las asperezas simulan un mecanismo de desgaste. Esto aparenta que las leyes de la termodinámica son violadas porque bajo condiciones de deslizamiento en seco el comportamiento de la fricción y el desgaste de los metales es causado por el mismo grupo de fuerzas actuantes en la superficie. Una teoría adecuada del desgaste no puede consistir solamente en el comportamiento de la fricción de los metales y las observaciones experimentales del fenómeno del desgaste, sino también satisfacer los requerimientos termodinámicos.

Debido a las características mencionadas podemos indicar que el comportamiento de la fricción y el desgaste podría ser calculado tomando en cuenta las propiedades básicas de los metales y la característica de la microestructura.

En el análisis del caso no lubricado la primera etapa de desgaste de la superficie consiste de una deformación plástica de asperezas, posteriormente el traslado de las asperezas deformadas por un proceso de fatiga.

Cuando el proceso de desgaste alcanza las condiciones del estado estable, la profundidad de la zona deformada plásticamente alcanza un valor constante para unas determinadas condiciones de deslizamiento. La deformación plástica equivalente en un metal cuando se tienen condiciones de estado estable varía de metal a metal según las condiciones de carga. En las medidas experimentales hechas por Augustsson (4) usando la técnica de Dautzenberg y Zaat se aprecia que el gradiente de deformación plástica en acero puede aproximarse por una combinación de una función empírica lineal y exponencial.

La deformación plástica equivalente  $c^P$  en acero endurecido AISI 1020 el cual sufrió un proceso de desgaste por delaminación fue aproximadamente determinado como:

$$c^P = c_0 - \alpha x = 16.5 - 2.2x$$
$$c^P = c_1 x^{-\beta} = 44x^{-1.26}$$

$$\text{para } 0 \leq x \leq x_c$$
$$\text{para } x > x_c$$

Donde  $x$  es la perpendicular a la superficie como se ve en la figura I.6.

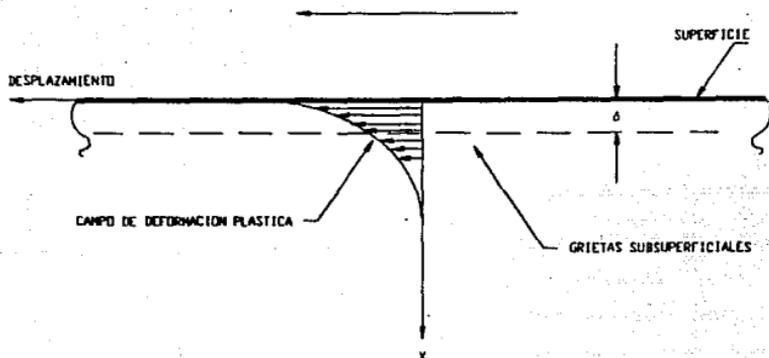


Figura I.8.- Representación esquemática de la sección transversal de una superficie desgastada y con deformación plástica.

La profundidad a la cuál ambas funciones tienen que ser evaluadas es la siguiente, cabe mencionar que da la misma pendiente.

$$x_c = [ (\beta c_1) / \alpha ]^{1/(1+\beta)} = [ (1.28^{*44}) / 2.2 ]^{1/2.2}$$

$$= 4.17(\text{mm}) \quad (I.1)$$

La deformación plástica es acumulada en varios ciclos, cada ciclo corresponde al paso de una aspereza. Si  $N_r$  como un ciclo de carga es requerido para que ocurra la delaminación, entonces:

$$c^P = \sum_{i=1}^{N_r} \Delta c_i^P \quad (I.3)$$

Donde  $\Delta c_i^P$  es la deformación plástica generada durante cada ciclo.

Un método de energía será usado para relacionar el trabajo plástico realizado para deformar el metal y la carga externa realizada por la tracción superficial. En un orden que es capaz de determinar el trabajo plástico o de deformación plástica realizada en una deformación permanente  $\epsilon^P$ , el trabajo realizado por ciclo puede sumarse sobre el total de la carga aplicada como:

$$W^P = bl \sum_{i=1}^{N_f} \int_0^{c_i} \int_0^{c_i} \sigma d(c_i) dx \quad (1.4)$$

Donde:  $b$  = es el ancho promedio de la capa de desgaste.

$l$  = es la longitud promedio de la capa de desgaste

$\sigma$  = es el esfuerzo equivalente.

$c_i$  = es la deformación total equivalente que sufre el material.

$N_f$  = es el número total de ciclos que el material sufre durante el tiempo de delaminación.

$\sigma$  y  $c_i$  son funciones de la profundidad  $x$ .

La deformación total equivalente  $c_i$  no es lo mismo que la deformación permanente generada  $\Delta \epsilon_i^P$  por ciclo.

No existe una solución disponible para  $c_i$  y  $\Delta \epsilon_i^P$ . Un problema similar se ha investigado por Merwin y Johnson (4) para un contacto con rodadura por considerar sólo el efecto del esfuerzo normal. Este problema se debe resolver por otro camino y a lo que llegó Merwin y Johnson fué que el material por debajo de la capa superficial, es decir, subsuperficial puede deformarse plásticamente y acumular energía cuando el valor crítico de la carga normal se excede. Esto indica que en cualquier momento el esfuerzo cortante  $\tau_{xy}$  excede el flujo del esfuerzo cortante del metal y la deformación plástica se acumula, esto se basa en que un material se expande elásticamente hasta el esfuerzo residual y satisfacer las condiciones en el límite. Las posibilidades de que el material sufra un flujo plástico secundario sobre la descarga no fue considerado. Un método más exacto para analizar la deformación del metal podría ser la utilización del método de elemento finito.

Otra razón para explicar la acumulación de la deformación plástica en la región subsuperficial puede ser el comportamiento peculiar de los metales bajo ciertas condiciones de carga cíclica. Cuando un metal se sujeta a este tipo de carga sufre ablandamientos y endurecimientos como se aprecia en la figura 1.7 (a) y 1.7 (b).

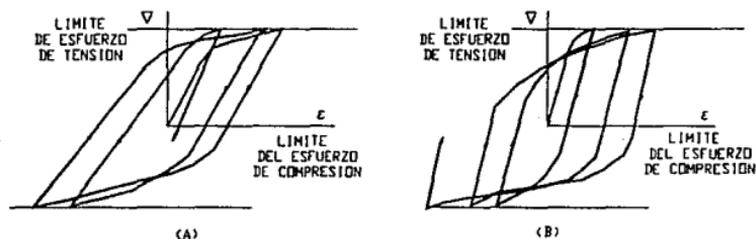


Figura 1.7 (a).- diagrama esfuerzo deformación para el control de esfuerzo y la dependencia ciclica del endurecimiento.

Figura 1.7 (b).- diagrama esfuerzo deformación para el control de esfuerzo y la dependencia ciclica del ablandamiento.

En el trabajo en frío, los materiales sufren usualmente un ciclo de ablandamiento seguido de un recocido. En cada ciclo de carga hay una deformación permanente residual  $\Delta\epsilon_1^P$  el cuál es mucho más pequeño que la amplitud máxima de deformación  $\epsilon_1$  de cada ciclo, como se ilustra en la figura 1.8. Para cada ablandamiento ciclico  $\Delta\epsilon_1^P$  aumenta con la repetición de la carga, mientras éste disminuye con cada ciclo de endurecimiento del material.

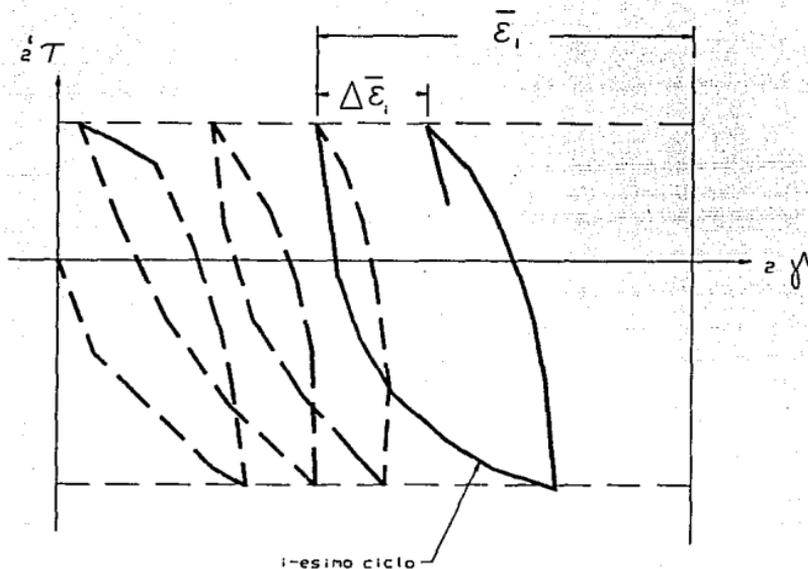


Figura I.8.-Trayectoria de la carga cíclica de un metal en un diagrama esfuerzo deformación; el ciclo i-ésimo se ve por la línea continua.

El comportamiento de los materiales cerca de la superficie no es igual cuando nos ubicamos lejos de ella, es decir, conforme nos alejamos de la superficie van cambiando las condiciones del esfuerzo de tensión y compresión; una carga concentrada cerca de la superficie experimenta un esfuerzo de tensión-compresión mientras que abajo de la superficie sólo se experimenta una carga de compresión y una descarga. Esto puede ser además un flujo plástico secundario arriba de la descarga debido al esfuerzo residual. Una posible trayectoria está dada en la figura I.8 la cual está dibujada en términos de la resultante del esfuerzo cortante máximo  $\tau$  y el esfuerzo cortante resultante  $\gamma$ . Se puede apreciar que  $\sigma$  y  $c$  siempre permanecen positivos por definición y que el valor absoluto de  $\tau$  y  $\gamma$  son aproximadamente igual a  $\sigma/2$  y  $c/2$  respectivamente.

Como una primera aproximación al problema se puede asumir que:

$$\sigma = \sigma_0 = \text{constante} \quad (1.5)$$

Sustituyendo la ecuación (1.5) en la ecuación (1.4) tenemos:

$$W^P = (bl) \sum_{i=1}^{Nr} \int_0^{\infty} \int_0^{c_i} \sigma_0 d(c_i) dx$$

$$W^P = (bl) \sum_{i=1}^{Nr} \int_0^{\infty} \sigma_0 c_i dx \quad (1.6)$$

Definiendo la deformación total equivalente  $c_i$  y la deformación plástica neta por ciclo  $\Delta c_i^P$  en función del radio  $m_i$ .

$$m_i = c_i / \Delta c_i^P \quad (1.7)$$

Y como primera aproximación para  $m_i$  podemos hacerla igual a una constante =  $m$ . Independiente de  $x$ . Sustituyendo (1.7) en (1.6).

$$W_P = m \sigma_0 (bl) \sum_{i=1}^{Nr} \int_0^{\infty} \Delta c_i^P dx \quad (1.8)$$

Usando la ecuación (1.3) en la ecuación (1.8) tenemos:

$$W_P = m \sigma_0 (bl) \int_0^{\infty} c^P dx \quad (1.9)$$

Después del desgaste superficial el espesor  $\delta$  sufre un desgaste por delaminación, entonces el trabajo adicional necesario para la delaminación de la siguiente capa  $\Delta W^P$  es:

$$\begin{aligned} \Delta W^F &= m\sigma_0(b1) \int_0^{\infty} c^F dx - \int_d^{\infty} c^F dx \\ &= m\sigma_0(b1) \int_0^{\delta} c^F dx \end{aligned} \quad (I.10)$$

Si  $\delta < x_c$  la ecuación (I.1) puede ser sustituida por la ecuación (I.10).

$$\begin{aligned} \Delta W^F &= m\sigma_0(b1) \int_0^h (c_0 - \alpha x) dx \\ &= m\sigma_0(b1) c_0 \delta - (\alpha \delta^2 / 2) \end{aligned} \quad (I.11)$$

Si  $\delta > x_c$  la ecuación (I.1) puede sustituir a la ecuación (I.10) como:

$$\begin{aligned} \Delta W^F &= m\sigma_0(b1) \int_0^{x_c} (c_0 - \alpha x) dx + \int_{x_c}^b c_1 x dx \\ &= m\sigma_0(b1) c_0 x_c - \frac{\alpha x_c^2}{2} + \frac{c_1}{1-\beta} \delta^{1-\beta} - x_c^{1-\beta} \end{aligned} \quad (I.12)$$

El trabajo de fricción hecho por un agente externo (por ejemplo una guía o una corredera)  $W^F$  para que exista cambio en la capa desgastada de dimensiones ( $\delta b1$ ) es:

$$W^F = 1/n \int_0^{S_0} F ds = (\mu L S_0) / n \quad (I.13)$$

Donde  $S_0$  es la distancia que se tiene que deslizar un material para que cree  $n$  capas de desgaste,  $\mu$  es el coeficiente de fricción y  $L$  es la carga normal. Algunos de los trabajos hechos son usados para crear una nueva superficie por la nueva delaminación de la capa, pero ésta energía superficial es del orden de magnitud uno o dos veces más pequeña que el trabajo consumido durante la deformación plástica. La ecuación (I.13) sustituida en la ecuación (I.11) o (I.12) nos da:

$$\mu LS_0 = n m \sigma_0 (b) \delta \quad c_0 - (\alpha \delta / 2) \quad \text{si } \delta < X_c \quad (I.14)$$

$$\mu LS_0 = n m \sigma_0 (b) \quad c_0 X_c - \frac{\alpha X_c^2}{2} + \frac{c_1}{1-\beta} \left( \delta^{1-\beta} - X_c^{1-\beta} \right) \quad (I.15)$$

Las ecuaciones (I.14) y (I.15) se pueden escribir como:

$$\mu = m \sigma_0 \quad c_0 - (\alpha \delta / 2) \quad (nb) \delta / (LS_0) \quad \text{si } \delta < X_c \quad (I.16)$$

$$\mu = m \sigma_0 \quad c_0 \frac{X_c}{\delta} - \frac{\alpha X_c^2}{2\delta} + \frac{c_1 \delta^{-\beta}}{1-\beta} \left( 1 - (X_c/\delta)^{1-\beta} \right) \frac{nb \delta}{LS_0} \quad \text{para } \delta > X_c \quad (I.17)$$

donde:  $(nb) \delta = V$  es el volumen del material desgastado. Usando la definición del factor de desgaste  $k$ , el cual es válido durante el estado estable de los procesos de desgaste.

$$K = (V/LS_0) = \text{factor de desgaste} \quad (I.18)$$

La ecuación (I.16) y (I.17) se puede escribir como:

$$\mu/K = m \sigma_0 \quad c_0 - \frac{\alpha \delta}{2} \quad \text{si } \delta < X_c \quad (I.19)$$

$$\mu/K = m\sigma_0 \epsilon_0 \frac{X_0}{\delta} - \frac{\epsilon_0 X_0^2}{2\delta} + \frac{\epsilon_0 \delta^{-\beta}}{1-\beta} \quad 1-(X_0/\delta)^{1-\beta}$$

si  $\delta > X_0$  (I.20)

Se puede ver que  $(\mu/K)$  están en función de las propiedades del material.

## II. CLASIFICACION DE LOS PROCESOS DE DESGASTE.

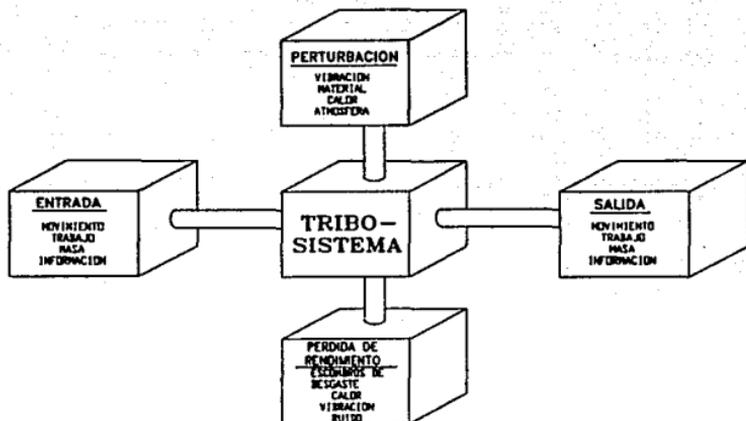
Para poder realizar una clasificación adecuada de los procesos de desgaste tenemos que analizar sistemas que pueden ser usados para identificar los parámetros de interés, estos son los llamados sistemas tribológicos o tribosistemas. Existe un mecanismo diferente de desgaste en cada tribosistema analizado. Este mecanismo de desgaste describe la intensidad y la interacción del material entre los elementos del tribosistema. El tipo de movimiento relativo entre el contacto de los cuerpos puede ser usado, para clasificar los diferentes procesos de desgaste. Existen diferentes técnicas que son aplicadas para ensayos de desgaste. En contraste a otros ensayos mecánicos que no tienen especificaciones generales y que están disponibles para éstos ensayos. Como se puede apreciar la razón por la cual existen gran variedad de técnicas y ensayos, es por la gran diversidad de sistemas de desgaste que ocurren en la práctica.

Existe algo positivo en todo esto, si se realizan técnicas similares en algún lugar, los resultados obtenidos por diferentes personas pueden ser usados para fines comparativos y buscar un camino cualitativo, así se puede ver la importancia por simple apreciación de diferentes técnicas y conocer tan exacto como sea posible las condiciones de cada una de ellas, finalmente se podrá trasladar los resultados de laboratorio a la práctica industrial solamente si los parámetros más importantes del tribosistema en laboratorio y en la práctica son comparados correctamente.

### II.1. TRIBOSISTEMAS.

El análisis del sistema puede usarse para describir un proceso tribológico. El propósito es la transformación y/o transmisión de entradas en salidas las cuáles son usadas tecnológicamente.

En la figura II.1. se aprecia la descripción funcional de un sistema tribológico en general.



**Figura II.1.- Descripción funcional de un sistema tribológico.**

La relación entre el uso de entradas y el uso de salidas puede considerarse como la técnica funcional de un tribosistema. El uso de entradas y salidas se puede clasificar en:

- \*Movimiento.
- \*Trabajo (Mecánico, Hidráulico, Neumático, Químico, etc.)
- \*Materiales o masa.
- \*Información.

Como ejemplo mencionaremos los siguientes:

- 1.-El tribosistema que se puede relacionar con el movimiento es la articulación de un ser humano.
- 2.-Con el trabajo puede ser un equipo y un embrague.

3.-Para relacionar un tribosistema con material o masa podríamos mencionar una trituradora y,

4.-Un ejemplo de información una simple leva y su seguidor.

Para analizar sistemas a partir de un conjunto de elementos mecánicos, o una maquinaria propiamente dicha, se corta por una envolvente a los elementos que están en contacto tribológico. La descripción funcional del tribosistema tiene que ser suplementada por la descripción estructural; la estructura del sistema es determinada por los elementos, sus propiedades y la interacción entre ellos.

En la figura II.2 se observa la simplificación general de un tribosistema.

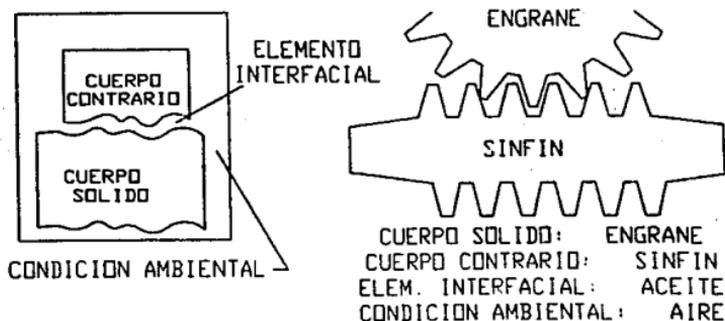


Figura II.2.- Representación esquemática de los elementos de un tribosistema.

Usualmente el sistema consiste en cuatro elementos:

- 1.-Cuerpo sólido.
- 2.-Cuerpo contrario.
- 3.-Elemento interfacial.
- 4.-Medio ambiente.

El cuerpo contrario puede ser un sólido, un líquido, un gas o una combinación de éstos.

La acción de los elementos o la interacción entre ellos puede variar grandemente, en la figura II.3 se ve cinemáticamente diferentes tipos de acciones sobre la superficie de un cuerpo sólido.

Concluyendo lo anterior, con respecto a la cinemática del sistema, los procesos de desgaste pueden ser clasificados como sigue:

- 1.-Deslizamiento.
- 2.-Rodamiento.
- 3.-Oscilación.
- 4.-Impacto.
- 5.-Erosión.

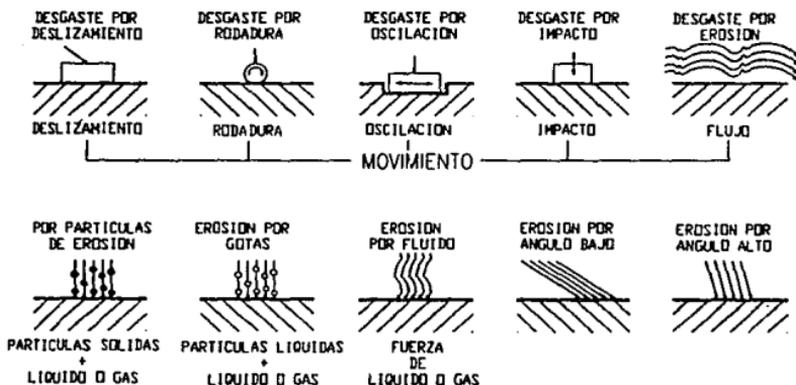


Figura II.3.- Clasificación por modos de desgaste de los procesos de desgaste.

Otra descripción de los procesos de desgaste incluye el estado físico del cuerpo contrario, por ejemplo, sólido o líquido, o el ángulo de acción. Relacionando al elemento interfacial, los procesos de desgaste pueden ser llamados secos o lubricados.

Dependiendo de la estructura del tribosistema, la interacción física y química ocurre entre los elementos que resultan en la separación del material del cuerpo contrario y/o la superficie del cuerpo sólido. La formación de viruta o partículas de desgaste está descrita por los mecanismos de desgaste.

## II.2. MECANISMOS DE DESGASTE.

El desgaste puede ocurrir como la pérdida de material y/o el daño superficial. El número tan grande de términos usados para describir los procesos de desgaste frecuentemente complica la discusión de estos problemas.

Las diferentes clasificaciones de los procesos de desgaste son listados en la siguiente tabla (1).

### CLASIFICACION DE LOS PROCESOS DE DESGASTE POR MECANISMOS DE DESGASTE.

#### 1.-Clasificación de Burwell y Strang:

Desgaste por abrasión, por adhesión, por fretting, por corrosión, por fatiga de la superficie, por erosión y por cavitación.

#### 2.-Clasificación de Jahanair:

Desgaste por adhesión, por abrasión, por fretting, por delaminación, por erosión, por impacto, por fatiga de la superficie, por corrosión, por difusión y por contacto eléctrico.

#### 3.-Clasificación de Godfrey:

Desgaste por adhesión severa y poco severa, por abrasión, por erosión, por fatiga, por delaminación, por corrosión, por

electrocorrosión, por fretting corrosion, por daño de cavitación, por descarga eléctrica y por pulido.

4.-Clasificación de Rice:

Desgaste por adhesión, por abrasión, por fatiga, por corrosión u oxidación y desgaste eléctrico.

5.-Clasificación DIN 50320:

Desgaste por adhesión, por abrasión, por fatiga de la superficie y reacción triboquímica.

6.-Clasificación de Wladyslaw Roman Pawlak (3)

Este autor distingue dos grupos de desgaste; desgaste castestático y desgaste dinámico. En el primer grupo se encuentran el desgaste por adhesión, por oxidación, desgaste térmico y por abrasión; mientras que en el segundo grupo se encuentran el desgaste por descamación (spalling), por pitting, por fatiga del material y por fretting.

### II.3. DESGASTE POR ADHESION.

Aparece en fricción de deslizamiento con pequeñas velocidades relativas (hasta máximo 0.2 m/s) y grandes presiones unitarias sobre las áreas reales de contacto, cuando hay la posibilidad (dependiendo de la distancia entre las superficies) de interacción de fuerzas moleculares. Esas fuerzas provocan los micropuentes y la destrucción del material como se ve en la figura 2.2.4.

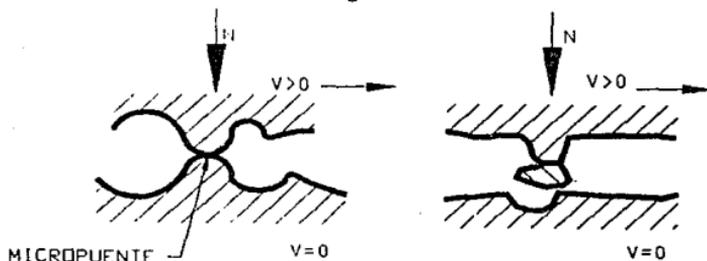


Figura II.4.- Formación del micropuente y destrucción del material durante el desgaste de adhesión.

Algunos ejemplos comunes en los que se presenta el desgaste por adhesión son: una leva y su seguidor, juego de engrane-piñón, contacto íntimo entre el material y herramienta como se da en el caso de extrusión, también se presenta el fenómeno de adhesión en seguidores y seguidores colas de milano, en bujes y en soportes de flecha, etc.

En otras palabras la adhesión se presenta por un deslizamiento relativo entre dos superficies en contacto directo provocando la formación de uniones y posteriormente la ruptura de las mismas, provocando la transferencia del material de una superficie a otra. El daño se incrementa debido al esfuerzo, la velocidad y la temperatura. Esto también lleva a un gran aumento del coeficiente de fricción y el factor de desgaste de los materiales.

La tendencia a la formación de las uniones por adhesión depende de las propiedades físicas y químicas del material, de los materiales en contacto, los modos y los valores de las cargas y de las propiedades físicas de las superficies en contacto. Tales como contaminación o rugosidad. Frecuentemente el contacto entre metales es no metálico, ya que la superficie es cubierta con capas adsorbidas, o capas de óxido en aire. La adhesión de los metales es causado primeramente por un débil enlace de Van der Waals (por ejemplo la fuerza efectiva bajo la distancia de 10 nm). La capa adsorbida y la capa de óxido en el contacto superficial puede ser fracturada directamente debido a la deformación elástica y plástica de las asperezas. La adhesión en este caso es causado por un enlace metálico o covalente, además un enlace iónico es insignificante para los metales. Desde que la fuerza de adhesión depende del área real de contacto ésta es influenciada también por la resistencia de los materiales a la deformación plástica y la estructura cristalina. Sikorski (1) observó un incremento de adhesión que va de los cuerpos hexagonal compacto, los cuerpos cúbicos centrados en el cuerpo (bcc) a los cuerpos cúbicos centrados en la cara (fcc). figura II.5.

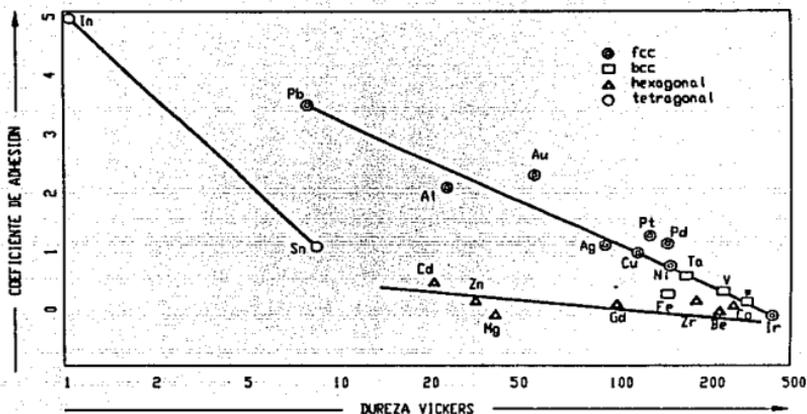


Figura II.5.- Coeficiente de adhesión contra la dureza de los metales (1).

Como coeficiente de adhesión se define como la relación de la fuerza necesaria para romper las uniones adheridas y la fuerza que ejerce la carga normal con la cuál fue iniciada la compresión. De la figura II.5 se puede apreciar que cuando existe un aumento de dureza el coeficiente de adhesión disminuye.

Los modelos presentados por Derjaguin, Sallga, Czichos, Ferrante y Smith (1) describen la influencia de la estructura electrónica de los átomos en la adhesión de las superficies metálicas en contacto con deslizamiento, basándose en el modelo atómico de los átomos en el cuál unos ceden y otros aceptan electrones en su última capa formando así un vínculo de adhesión.

Los mecanismos de adhesión son los siguientes.

- 1.-Teoría del entrelazamiento.
- 2.-Teoría de la difusión.

- 3.-Teoría electrónica.
- 4.-Teoría de la adsorción.
- 5.-Teoría química.

1.-Entrelazamiento mecánico.

Se refiere al enganchamiento de las irregularidades superficiales, por ejemplo, la penetración de un polímero en estado líquido en las microfisuras de una superficie metálica.

2.-Teoría de difusión.

Dice que los átomos o moléculas pueden difundirse a través de la interfase entre dos cuerpos en contacto.

3.-Teoría electrónica.

Propone una transferencia de electrones a través de la interfase de cuerpos en contacto y de diferentes bandas electrónicas. Esta adhesión es causada por efectos de las fuerzas electrostáticas a través de una doble capa eléctrica.

4.-Teoría de adsorción.

Se da por enlaces de tipo secundario como el de Van der Waals, y de hidrógeno.

5.-Teoría química.

Se da en la interfase de cuerpos en contacto por un fuerte enlace químico, también puede ser enlace metálico, iónico o covalente. Estos enlaces son de tipo primario.

Estas teorías dependen de mucho de las características superficiales de los cuerpos en contacto; como la limpieza, la topografía, la carga, la temperatura, condiciones ambientales, microestructura, etc. Los modelos cuantitativos se presentan en el capítulo IV. y los principales grupos se presentan en la figura II.6.

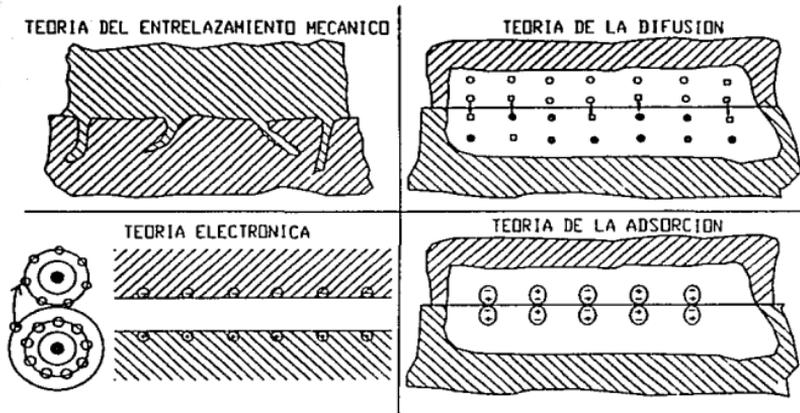


Figura II.6.- Mecanismos de adhesión.

#### II.4. DESGASTE POR ABRASION.

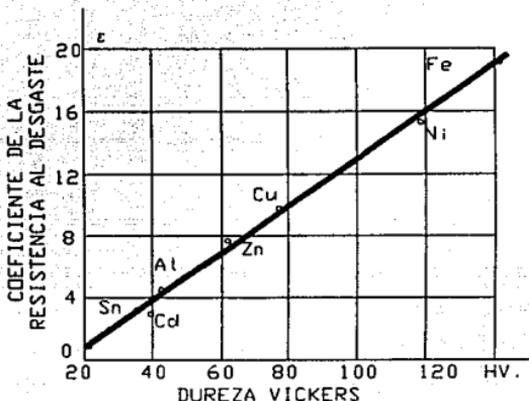
Es característico para la fricción de deslizamiento. El material se destruye intensamente durante la colaboración de dos elementos con una diferencia grande de las durezas superficiales o con asistencia de un medio abrasivo como son: arena, polvo, restos metalicos, productos del desgaste, etc. En éste caso el resultado de la dureza con el número relativo del desgaste de la misma familia de metales es siempre constante:

$$D_{ra} \cdot H = \text{constante}$$

Donde:  $D_{ra}$  = Desgaste relativo del metal.

$H$  = dureza del mismo metal.

Esta independencia se aprecia en la figura II.7 (3).

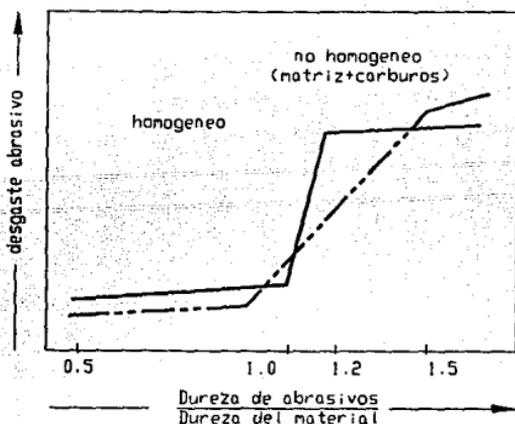


**Figura II.7.- Dependencia de la dureza y la resistencia al desgaste abrasivo de metales de la misma familia.**

El desgaste por abrasión también es causado por la presencia de protuberancias duras en una o en ambas superficies que están en movimiento relativo, por ejemplo; minerales como la sílica, la alúmina u otros minerales de hierro o los fragmentos de desgaste que se endurecen por el mismo trabajo, mientras que las protuberancias pueden ser las asperezas en el maquinado normal y estas pueden actuar como partículas duras si existe una superficie mucho más dura que la superficie contraria.

De acuerdo con Wahl y Wellinger, Uetz y Föhl (1) El desgaste abrasivo puede ser de un alto o de un bajo nivel dependiendo de la relación de la dureza del abrasivo y de la dureza del material que se está desgastando. Para un material homogéneo y no homogéneo se aprecia en la figura II.8 la transición de un nivel bajo a un nivel alto de desgaste.

El aumento de la transición para materiales homogéneos ocurre cuando la dureza de los abrasivos es igual a la dureza del material desgastado. La transición de materiales no homogéneos comienza y termina cuando la dureza de la matriz y la dureza de la fase dura exceden respectivamente la dureza del abrasivo.



**Figura II.8.-** Desgaste abrasivo en función de la relación de la dureza de partículas abrasivas y la dureza del material desgastado.

El desgaste abrasivo se puede clasificar por la interacción de dos cuerpos o tres cuerpos, esto se aprecia en la figura II.9 (1).

En la abrasión de dos cuerpos, las partículas abrasivas se mueven libremente sobre el material, como el deslizamiento de arena que cae por una rampa. En la abrasión de tres cuerpos, las partículas abrasivas actúan como elementos interfaciales entre los cuerpos sólidos en contacto. La abrasión de tres cuerpos es más

pequeña que en la abrasión de dos cuerpos, aproximadamente del orden de uno a dos, ya que en la abrasión de tres cuerpos solamente una pequeña proporción de las partículas abrasivas causan desgaste, debido a la variación del ángulo de ataque.

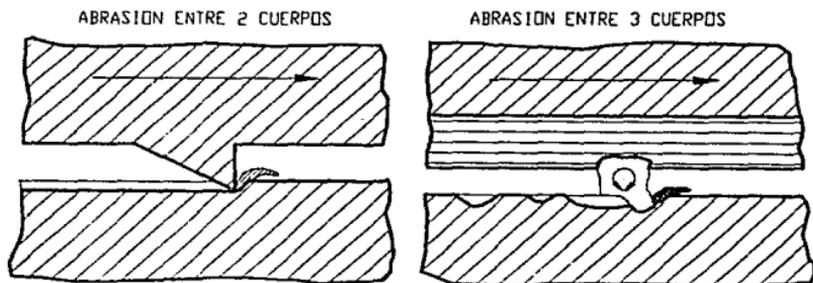
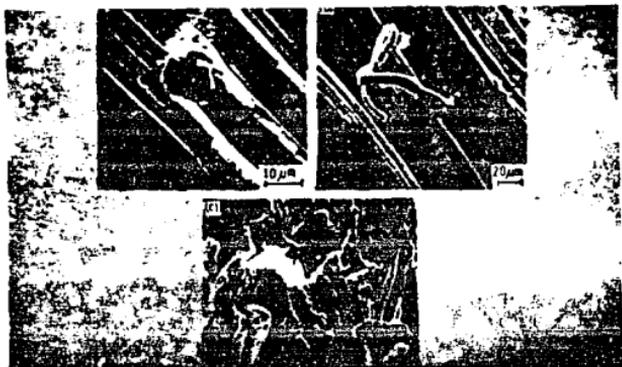
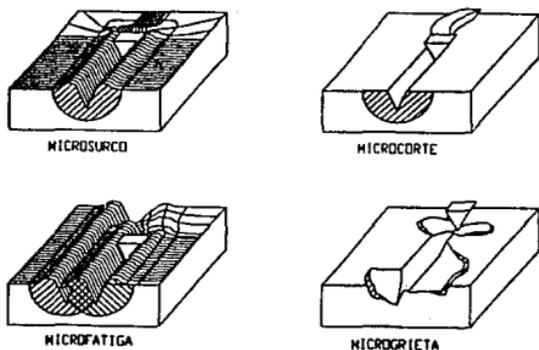


Figura II.9.- Desgaste abrasivo entre dos cuerpos y tres cuerpos.

En la figura II.10 (1) se aprecian claramente los microsurdos, microcortes y microgrietas de una superficie de acero desgastada por minerales abrasivos duros. Los microsurdos se crean debido al paso simple de una partícula abrasiva; los microcortes resultan de la pérdida del material equivalente al volumen del surco o corte producido; las microgrietas ocurren cuando se concentran esfuerzos muy altos impuestos por las partículas abrasivas, particularmente en superficies de materiales frágiles. En este caso las grandes cantidades de escombros producidos por el desgaste son independientes de la superficie debido a la formación y propagación de grietas, estos procesos se observan en la figura II.11 (1).



**Figura II.10.-** Fotografías en un microscópio de barrido electrónico de la interacción entre un material abrasivo y superficie de acero (a)microsurcos, (b)microcortes y (c)microgrietas.



**Figura II.11.-** Interacción física entre superficies de materiales y partículas abrasivas.

Los microsurcos y los microcortes predominan en materiales dúctiles, y el que aparezca una u otra depende del ángulo de ataque de la partículas de desgaste. Entre mayor es el ángulo de ataque, será más factible que aparezca un microcorte. el ángulo de ataque  $\alpha$  tiene un valor crítico  $\alpha_c$  y este valor depende del material y de las condiciones de la prueba. Teóricamente  $\alpha_c$  es el valor de la transición de un microsurco a un microcorte. Esto se explica en la figura II.12 (1).

El mecanismo no permite conocer la deformación elástica y plástica del material, así como la fractura dúctil y el valor de la fatiga, ya que éstos parámetros son importantes para los materiales dúctiles. Las muescas o rayas de los materiales frágiles producidos por las partículas abrasivas pueden ser causa de la formación y la propagación de grietas, estos materiales pueden fluir plásticamente hasta un valor crítico provocando también la propagación de grietas.

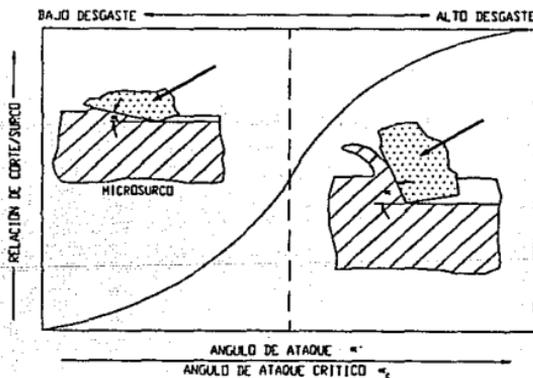


Figura II.12.- Relación de microcorte/microsurco en función de los ángulos de ataque  $\alpha/\alpha_c$

## II.5. DESGASTE POR FATIGA SUPERFICIAL.

Aparece en todos los elementos de máquinas donde hay carga cíclica independiente del tipo de fricción. Se debe entender que el desgaste por fatiga determina la fatiga del material en todo su volumen, esto significa la formación de microgrietas y la eliminación de la pieza en uso. La forma más simple de representación del problema se aprecia en la figura II.13 (3)

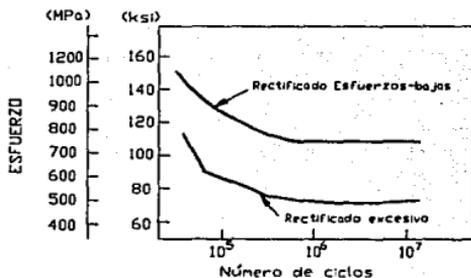


Figura II.13.- Relación del número de ciclos de trabajo contra el esfuerzo máximo.

En realidad la fatiga superficial no sólo produce grietas sino también se caracteriza por la formación de escamas en la superficie del material. El contacto con rodadura y el contacto con deslizamiento de sólidos o el contacto por impacto de sólidos y/o líquidos puede resultar en un esfuerzo superficial cíclico. La fatiga puede localizarse a escala microscópica debido a la repetición del contacto de asperezas en la superficie de sólidos con movimiento relativo.

La fatiga superficial generalmente se presenta en ruedas de ferrocarril, rodamientos o baleros, rodillos de laminadora, flechas, etc. y la falla procede de la secuencia de la deformación elástica y

plástica acompañado de una dureza o ablandamiento por trabajo, lo cual produce la iniciación de grietas y la propagación de las mismas por debajo de la superficie.

Con la formación y la propagación de grietas también se forman picaduras en la superficie del material, las características de estas picaduras se aprecian en la figura 2.2.14 (referencia 01).



Figura II.14.- Picaduras en la superficie de un acero carburizado con dureza de 60 HRC.

Existen dos modelos para representar la fatiga en contacto con rodadura y fueron propuestos para describir la formación de picaduras en una superficie afectada. Una de las grietas es causada por el esfuerzo de tensión y compresión en el área de contacto. El origen de las grietas en la superficie sólida se apoya por la inclusión superficial, muescas de los procesos de producción, muescas debido al pulido de las partículas de desgaste o cualquier cosa que aumente el esfuerzo en la superficie por la disminución de área. Originalmente las grietas se propagan en la superficie en dirección inclinada como se ve en la figura II.15 (1).

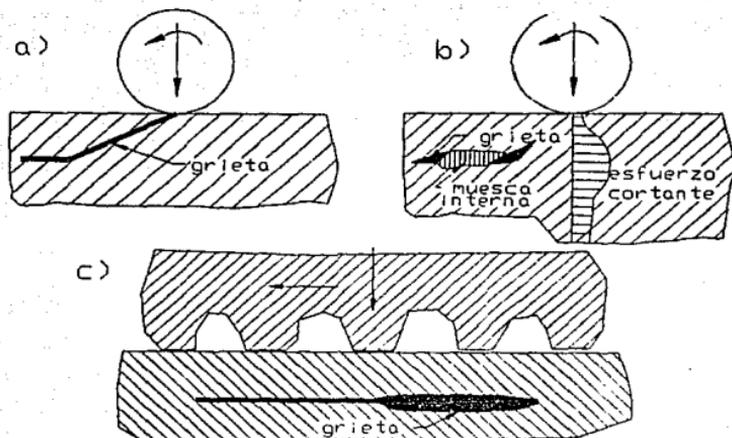


Figura II.15.- Formación y propagación de grietas en la fatiga de un material.

El esfuerzo cortante alcanza su valor máximo abajo de la superficie, lo que provoca la formación de grietas subsuperficiales. Las grietas superficiales se forman por la interacción mecánica o química o la interacción de la superficie sólida en contacto con el medio ambiente o el elemento interfacial.

Otro modelo asume la formación de grietas subsuperficiales (de acuerdo a la figura II.15) debido a que el esfuerzo cortante máximo se incrementó por las muescas internas, por ejemplo, la inclusión de carburos concentra los esfuerzos abajo de la superficie provocando la formación de grietas subsuperficiales. Especialmente cuando existe un contacto con una sobrecarga las grietas se forman en zonas de deformación plástica abajo de la superficie. La propagación de grietas en la superficie sólida provoca la formación de escamas o picaduras.

La fatiga superficial puede ser de mucha importancia si la relacionamos con los mecanismos de adhesión y de abrasión, la

repetición del deslizamiento de asperezas duras a través de una superficie sólida pueden causar grietas y la propagación de éstas hacia abajo de la superficie con mayor concentración de esfuerzos. De acuerdo con el modelo propuesto por Suh y Coworkers (1), que dice que la propagación de grietas subsuperficiales es paralela a la superficie como se ve cinemáticamente en la figura II.15(c). Las partículas de desgaste se generan cuando las grietas subsuperficiales se fracturan a través de la superficie. Generalmente ésta superficie se desintegra por delaminación y es debido a la acción simultánea de la adhesión y/o abrasión y la fatiga superficial. La carga cíclica de la superficie con mayor concentración de esfuerzos resulta de la fricción y de la carga normal en el área de contacto. Las fuerzas de fricción se originan de la adhesión y/o abrasión entre las asperezas y la superficie afectada.

Algunas veces el desgaste por erosión debido al impacto de partículas sólidas o líquidas o el desgaste por impacto son tratados como mecanismos de desgaste independientes. Esto es arbitrario ya que el movimiento de partículas puede explicarse de manera simultánea, por ejemplo la acción anterior donde se involucran desgaste por adhesión, por erosión y por fatiga superficial. La diferencia principal entre el desgaste por erosión y el desgaste por abrasión es el ángulo de ataque de las partículas; en el primero el ángulo de ataque es muy pequeño, mientras que en el segundo va en dirección a la energía cinética que se transmite a la superficie estresada. Esto afecta principalmente la deformación elástica y plástica del los sólidos en contacto con deslizamiento.

## II.6. DESGASTE POR FRETTING.

Es un conjunto de fenómenos mecánicos , térmicos, químicos y eléctricos que suceden en zonas de contacto de los elementos. El fretting es una forma especial del desgaste triboquímico. El daño por fretting se provoca cuando las superficies en contacto sufren

pequeños movimientos tangenciales oscilatorios relativos a cada pieza del tribosistema. La amplitud del movimiento relativo es muy pequeño, aproximadamente 80  $\mu\text{m}$ . El resultado de amplitudes mas grandes afecta en forma similar y se debe al desgaste por deslizamiento recíprocante. El movimiento relativo entre las superficies en contacto puede ser debido a la carga cíclica o vibraciones inevitables en el sistema tribológico. El desgaste por fretting en componentes cargados cíclicamente pueden volverse muy peligrosos ya que se inician grietas por fatiga en la superficie del material y las uniones apropiadas de éstos materiales pueden hacerse holgadas o muy ajustadas por el escape o el estancamiento de las partículas o escombros de desgaste.

## II.7.-DESGASTE POR OXIDACION O DESGASTE TRIBOQUIMICO.

Aparece en fricción de deslizamiento y en la de rodadura y sucede cuando la intensidad de formación de capas de óxido es mayor que la intensidad de destrucción del material por abrasión.

Es un proceso con adsorción de oxígeno, su difusión a las regiones deformadas plástica y elásticamente, y formación de algunas soluciones y uniones químicas del metal propio con oxígeno que facilita mucho la separación de óxidos mas frágiles del material mencionado. En materiales ferrosos se forman el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  y  $\text{FeO}$  y con decrecimiento del material de la superficie, esas capas entran en el mismo orden al corazón de la pieza.

La corrosión ambiental puede ser líquida o gaseosa, ésta corrosión ataca a todas las superficies con ajuste mecánico las cuáles están en peligro de sufrir desgaste por reacción triboquímica, por ejemplo; uniones remachadas, sellos, muelles, cadenas, etc.

De acuerdo a la figura II.16 (1) los mecanismos de desgaste triboquímico se dividen en cuatro categorías:

(a) Contacto metálico entre las asperezas superficiales las cuáles llevan al traslado del metal debido a la adhesión. Los pequeños escombros de desgaste metálico producido pueden oxidarse, causando posteriormente desgaste por reacción triboquímica.

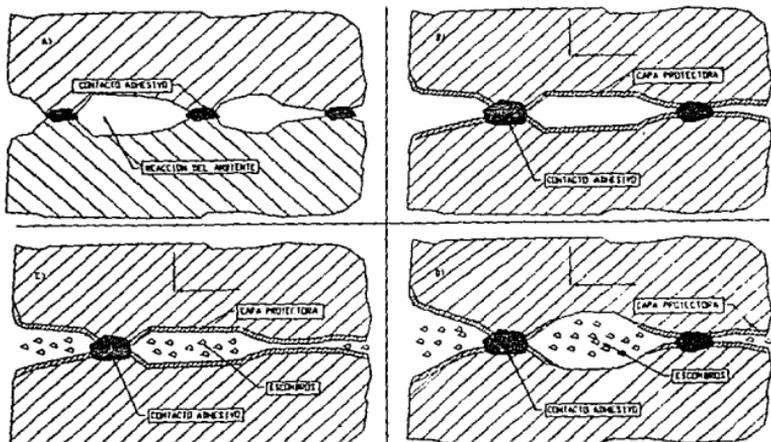


Figura II.16.- Mecanismos involucrados en el desgaste triboquímico.

(b) La reacción química de los metales con el medio ambiente produce una protección de la capa superficial que reduce el contacto metálico.

(c) El rompimiento de la protección de la capa superficial debido a la presión local alta o microfátiga produce escombros de desgaste no metálicos.

(d) Los escombros de desgaste metálico o no metálico pueden actuar como abrasivos y ponen ásperas las superficies de contacto.

El daño de la superficie friccionada y la pérdida de masa de la misma son causados por la presencia de éstos diferentes procesos.

Esto nos dice que el desgaste triboquímico esta influenciado por la cinética de la formación de las capas superficiales y las propiedades que determinan su resistencia a ser removidas, por ejemplo la ductilidad, la resistencia y la adhesión que tienen sobre la subcapa.

La resistencia que tiene la capa triboquímica a la fractura se incrementa por una resistencia suficiente del material de la subcapa. El desgaste poco severo (ver capítulo IV) es favorecido si la dureza de la capa producida y la subcapa son iguales, por lo tanto el ataque abrasivo de los escombros de desgaste no metálico en la subcapa se reduce en éste caso.

Dentro de las condiciones del medio ambiente que rodean a la capa de trabajo puede encontrarse un lubricante o simplemente el contacto con el oxígeno atmosférico. Estos factores favorecen en gran forma el ataque químico y por consiguiente la formación de la reacción triboquímica. Por lo que se refiere al lubricante, este puede influir mucho para que se anule el desgaste por adhesión pero incrementa la posible formación del desgaste triboquímico. En la figura II.17 (1) se ve esquemáticamente la relación entre el desgaste y la reacción química que determina la cantidad y la velocidad de formación de la capa superficial protectora en sistemas lubricados o simplemente en contacto con oxígeno atmosférico.

Concluyendo podemos decir que el desgaste por adhesión se reduce con el aumento de las áreas superficiales protegidas, con capas superficiales frágiles y fracturadas aumentando cuantitativamente la abrasión de las partículas de desgaste. Aquí se presenta justamente la transición del desgaste por adhesión al desgaste triboquímico y muy posiblemente al desgaste abrasivo por el incremento de la actividad química.

La reacción química necesaria para minimizar el desgaste depende de la severidad del contacto deslizante, tomando como variables la presión de contacto, la temperatura y la calidad de la

superficie, o la relación del espesor del lubricante a las rugosidades de la superficie. La dureza reduce el desgaste triboquímico y también puede incrementar debido a la acción abrasiva de sus partículas de desgaste. En sí se deben de considerar muchas variables, y el saberlas manipular ayudaría para que el desgaste en mecanismos disminuyera considerablemente.

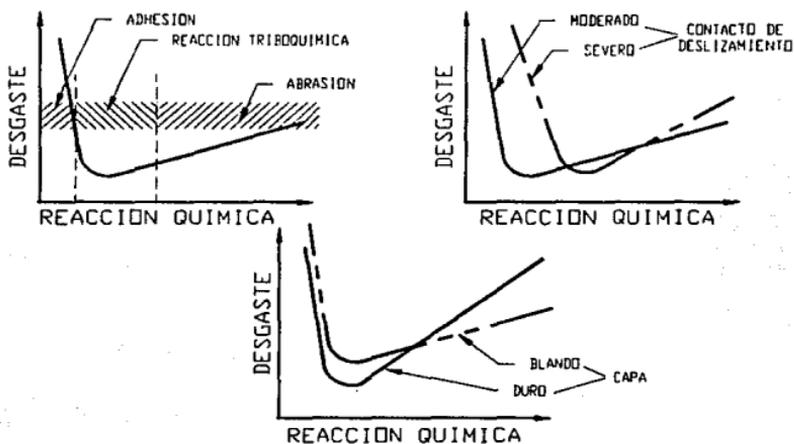


Figura II.17.- Desgaste en función de la reacción química.

## II.8.- DESGASTE POR DELAMINACION.

La teoría de la delaminación del desgaste se introdujo en 1973 y se describe por una serie de eventos secuenciales, los cuales conducen a la formación de partículas de desgaste.

1.-Cuando dos superficies en deslizamiento están en contacto, la carga normal y tangencial es transmitida a través de los puntos de contacto por adhesión y por la acción de las rugosidades. Las asperezas de la superficie más blanda son fácilmente deformadas y

algunas son fracturadas por la acción repetitiva de la carga. Una superficie relativamente lisa se genera cuando sus asperezas son deformadas y removidas. Una vez que la superficie no contiene tantas rugosidades, entonces ocurre que el contacto no se da entre aspereza y aspereza sino entre asperezas y planos; entonces cada punto a lo largo de la superficie más blanda experimenta una carga cíclica desarrollada por las asperezas de la superficie más dura.

2.-La tracción superficial que se ejerce por las asperezas más duras en la superficie más blanda induce una deformación cortante plástica la cuál se acumula con la repetición de la carga.

3.-Como la deformación en la zona subsuperficial continúa, las grietas se nuclean abajo de la superficie. Esta nucleación no es muy recomendable porque se realiza cerca de la superficie y existe un esfuerzo de compresión muy alto justo abajo de las regiones de contacto.

4.-Una vez que se presentan las grietas (y su nucleación) otra carga y deformación causa que éstas se extiendan, se propagen, y se unan con otras. Las grietas tienden a propagarse paralelamente a la superficie a una profundidad que depende de las propiedades del material y del coeficiente de fricción.

5.-Cuando estas grietas cortan y/o fracturan finalmente a la superficie aparecen capas de desgaste de una longitud y espesor cualquiera, a éste mecanismo de desgaste se le llama delaminación. El espesor de estas capas de desgaste se controlan por la localización y el crecimiento de las grietas subsuperficiales.

## II.9.- DESGASTE TERMICO.

Aparece en fricción de deslizamiento. Destruye las superficies de materiales durante el aumento de la temperatura en las zonas de contacto, ya que comunmente sobrepasa la temperatura de fluencia de

uno de los dos materiales que se encuentran en movimiento relativo. Causa por tanto macropuentes térmicos y de adhesión y el barrido del metal sobre la superficie.

## II.10.- DESGASTE POR DESCAMACION. (SPALLING)

Es característico por la fricción de rodadura. Durante la carga cíclica aparecen en la superficie deformaciones y esfuerzos inferiores formando microgrietas y luego macrogrietas en la capa exterior del metal. Finalmente se desprenden en forma de pequeñas escamas partes del material. La causa del spalling es la fatiga del material, pero solamente en zonas de contacto cíclico durante la rodadura de esferas y cilindros sobre las superficies planas (casi planas) o de la misma forma. Entonces el esfuerzo cortante máximo  $\tau_{max}$  que influye mucho sobre la formación de escamas, aparece a una profundidad de 0.78 y no sobre la superficie de contacto. ver figura II.18 (3).

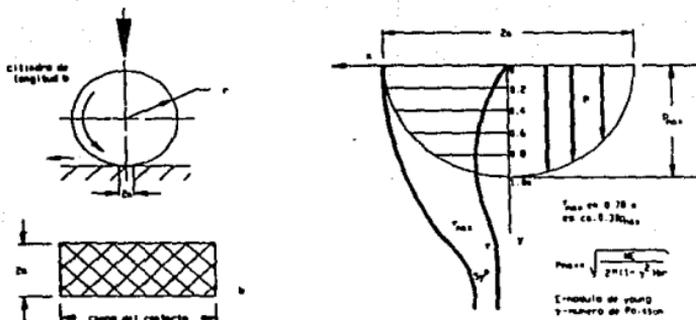
## II.11.- DESGASTE POR PITTING.

Aparece en fricción de rodadura con asistencia de grasa. Es un proceso causado por la carga cíclica y acción mecánica en propagación de grietas por aceite o grasa.

Se distinguen tres etapas:

- 1.- Fatiga superficial del material e inicio de microgrietas.
- 2.- Desarrollo y propagación de grietas como resultado de acción de descuñado por aceite o grasa.
- 3.- La extracción por medio lubricante de algunas partículas metálicas que perdieron su cohesión con material propio.

El pitting es característico de rodamientos y engranes donde ocurre la fricción de rodadura pero con deslizamiento.



**Figura II.18.- Distribución de esfuerzos en el contacto puntual o lineal de dos elementos elásticos;  $\tau_{max} = 0.3 \frac{P}{2a}$  =esfuerzo cortante máximo;  $N$ =carga normal;  $2a$ =ancho del campo de contacto;  $b$ =longitud del mismo campo.**

### III. SUPERFICIES EN CONTACTO

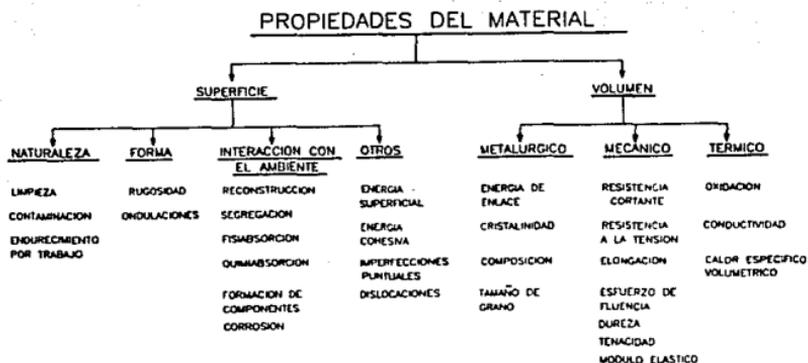
Las elevadas exigencias en la nueva tecnología necesitan de los procesos nuevos de manufactura para producir las capas exteriores adecuadas de los diferentes elementos de las máquinas, pues alrededor del 80% al 85% de las piezas en las máquinas deben cambiarse a causa de la disminución de tamaño de las superficies debido al contacto sometido durante el trabajo. Por esta razón, se ha de poner gran atención al proceso de creación de la superficie; sus propiedades físicas, la estructura de la superficie exterior y las condiciones que puedan cambiar las propiedades iniciales en las superficies en contacto durante los procesos de desgaste.

Es por esto que el Ingeniero Mecánico debe de dar importancia a la conexión entre las características anteriores y las posibilidades de utilización para una aplicación específica.

#### LA FISICA DE LOS MATERIALES TRIBOLOGICOS

El comportamiento de los materiales a la fricción y desgaste es ampliamente dependiente de la superficie del material, la forma de acoplamiento superficial, el ambiente y las condiciones de operación. En la figura III.1 están listados varias propiedades superficiales y de volumen de materiales que juegan un papel importante en la determinación de un comportamiento tribológico.

Esta bien establecido que las superficies metálicas limpias se adhieren cuando son presionadas, viendose reducidas con pequeñas cantidades de oxígeno u otros contaminantes. Una película superficial puede cambiar el comportamiento mecánico de las primeras capas atómicas del metal adyacente a la película a través de la interacción con el ambiente o por difusión. Es necesario para entender los fenómenos que toman lugar durante los procesos de fricción y desgaste el reconocimiento de la naturaleza de las superficies y la interacción con el ambiente.



**Figura III.1 Propiedades de volumen y superficie que son relevantes en el comportamiento tribológico de los materiales.**

La energía superficial, la cual determina finalmente la energía de adhesión entre las superficies en movimiento en la interfase, depende de la orientación cristalina, enlaces, etc. Las propiedades mecánicas tales como la resistencia cortante (Shear strength), esfuerzo de cedencia (yield strength), el módulo de elasticidad y dureza; están influenciados ampliamente por la aleación de un material con otro. Por ejemplo, la adición de carbón en acero cambia la dureza significativamente. La microestructura, tamaño de grano y dislocaciones también cambian durante los procesos de aleación.

### III.1 NATURALEZA DE LAS SUPERFICIES SOLIDAS

El comportamiento tribológico de una superficie está influenciado directamente por los estados químicos y físicos de los materiales, que para nuestro estudio serán metales y aleaciones. Las propiedades superficiales de materiales cambian notablemente en diferentes ambientes; por ejemplo, si un metal es colocado en un vacío y calentado, la superficie siempre liberará agua. La superficie exterior del material consiste de varias zonas, las cuales tienen diferentes características fisicoquímicas.

La figura III.2 muestra un esquema de la superficie de un metal (10). El metal volumétrico, también conocido como el metal sustrato, tiene una estructura que depende sobre la composición y la historia del procesamiento del metal. Este metal volumétrico comúnmente es una capa que se ha deformado plásticamente y endurecido por trabajo durante los procesos de manufactura.

La profundidad y propiedades de la capa endurecida por trabajo -la estructura superficial- depende de varios factores tales como el método de procesamiento usado y el deslizamiento al cual fue sujeto la pieza. Herramientas afiladas y la selección de procesos propios producen parámetros superficiales con o sin pequeñas perturbaciones. Por ejemplo, si la superficie es producida por maquinado con una herramienta desafilada o bajo condiciones de corte deficiente -o es pulida con esmeril- ésta capa será relativamente gruesa. También, la deformación superficial no uniforme o los gradientes de temperatura severos durante las operaciones de manufactura causan generalmente esfuerzos residuales en ésta capa endurecida por trabajo.

Encima de la capa endurecida por trabajo existe una región de estructura amorfa o microcristalina, ésta es la llamada capa de Bellby.

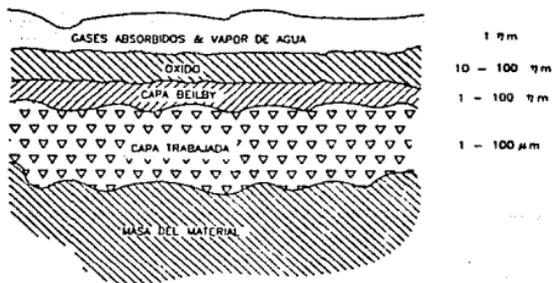


FIGURA III.2 Representación esquemática de la superficie de un metal

El nombre de esta capa se le debe a Beilby, quien fué el primero que admitió la hipótesis de que una capa amorfa recubre la superficie del metal como un manto. Esto se debe a la acción simultánea de compresiones y cizallamientos importantes, que provocan una trituración de la estructura granular; así, tal capa puede formarse en operaciones de acabado de la superficie, tales como el rectificado y el pulimento. El modo en el cual éstas actúan es el siguiente:

- los granos más o menos finos de abrasivos tienen una acción mecánica: trabajan la superficie y dejan las asperezas más salientes al mismo nivel.

- el rozamiento crea fenómenos de fusión microlocalizados entre los granos de abrasivo y el metal trabajado; una prueba de esto es que un metal se pule mejor cuanto los granos de abrasivo tienen un punto de fusión más elevado que el suyo y no cuando éstos son más duros;

-finalmente, un endurecimiento grande procede, por una parte, de los esfuerzos ejercidos por el grano de abrasivo; por otra parte, de la presión del plato de la máquina.

Se han realizado así las condiciones de una trituración extremadamente fina de la superficie cristalina, a las cuales se añade por elevación de temperatura la creación de materiales fundidos y oxidados debidos al maquinado. El deslizamiento viscoso de éste conglomerado termina por crear una delgada capa superficial, llamada zona amorfa de Bellby.

Sobre la capa de Bellby está una capa de óxido, la formación de está capa depende del ambiente y la cantidad de oxígeno disponible a la superficie que favorezcan los mecanismos de oxidación.

A menos que el metal sea procesado y guardado en un medio ambiente inerte (libre de oxígeno) ó éste es un metal noble como el oro o platino la capa de óxido está sobre la capa Bellby. Algunos ejemplos son:

a) El hierro tiene una estructura de óxido con  $\text{FeO}$  adyacente al metal volumétrico, seguida por una capa de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  y una capa de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , la cual esta expuesta al ambiente.

b) El aluminio tiene una capa amorfa densa de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  con un espesor, encima de ésta existe una capa porosa de óxido de aluminio hidratada.

c) El cobre tiene una superficie brillante cuando es rayada o maquinada recientemente. Despues de un instante, éste desarrolla una capa de  $\text{Cu}_2\text{O}$ , la cual está entonces cubierta con una capa de  $\text{CuO}$ .

Bajo condiciones normales ambientales, las capas superficiales de óxido son generalmente cubiertas con capas adsorbidas de gas y humedad. Finalmente, la superficie más delgada del metal puede estar

cubierta con contaminantes, tales como suciedad, polvo, grasa, residuos de lubricantes y contaminantes del ambiente.

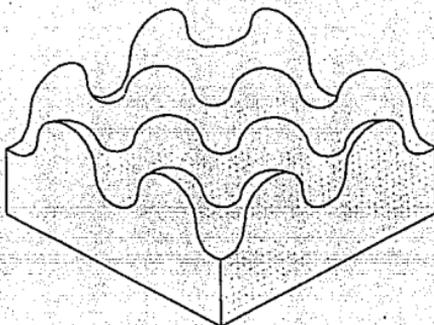
Así las superficies generalmente tienen propiedades que son muy diferentes de aquellas del material base. El óxido sobre una superficie de metal, por ejemplo, es generalmente mucho más dura que el metal base. (Tabla III.1) Por lo tanto los óxidos tienden a ser frágiles y abrasivos.

Tabla III.1  
Ratio de dureza de óxidos  
para un metal base de  
varios metales (15)

METAL	RADIO
Molibdeno	0.3
Tantalum	0.6
Cobre	1.6
Niquel	2
Tunsteno	5
hierro	5
Aluminio	70

### III.2 TEXTURA SUPERFICIAL

Las superficies usadas para componentes mecánicos varían en una topografía superficial inicial, la cual depende de los procesos de manufactura, por ejemplo, fundición, moldeado, maquinado y pulido. La textura geométrica de la superficie es controlado por las características de los procesos de acabado por los cuales son producidos. Una superficie metálica pulida por un polvo fino de óxido de aluminio (tamaño de partícula de 1  $\mu\text{m}$  o menos), visto macroscópicamente se observa como un espejo. La misma superficie vista microscópicamente no es suave y contiene irregularidades superficiales llamadas asperezas. Estas irregularidades superficiales (referidas así como microrugosidades) son mostradas esquemáticamente en la figura III.3.



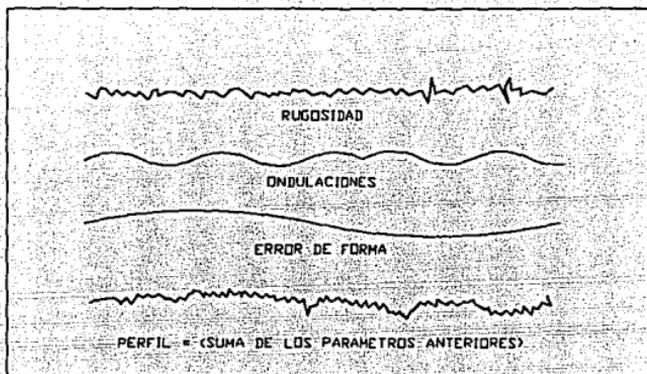
**FIGURA III.3** *Asperezas superficiales de una superficie nominalmente lisa*

Un perfil superficial aparece principalmente debido a diferentes componentes de textura superficial, figura III.4 y III.5. Imperfecciones (flaws) o defectos, son irregularidades fortuitas, tales como rayaduras, grietas, hoyos, depresiones, arrugas e inclusiones.

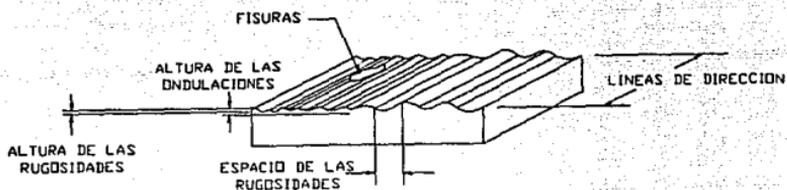
Direccionalidad (lay). Es la dirección predominante del modelo superficial y es por lo general visible a simple vista.

Rugosidad. (o microrugosidades) Irregularidades superficiales de corta longitud de onda, caracterizada por crestas y valles de amplitud variada y espaciamientos más grandes de las dimensiones moleculares. Estas crean el modelo superficial predominante, las cuales exhiben éstas características intrínsecas para los procesos de manufactura.

Ondulaciones (o macrorugosidades).



**Figura III.4 Componentes de la textura superficial**



**Figura III.5 Componentes del perfil de la textura superficial**

Las irregularidades superficiales que tienen la longitud de onda más grande que las microrugosidades, surgen frecuentemente por tratamientos térmicos, deflexión de la pieza de trabajo, vibración o torceduras.

La integridad superficial no sólo describe los aspectos topológicos de las superficies, sino también las propiedades y características mecánicas y metalúrgicas. La integridad superficial es una consideración importante en operaciones de manufactura porque ésta influye en las propiedades del producto, tal como la resistencia a la fatiga y la resistencia a la corrosión, y éstas en la vida de servicio. El efecto perjudicial de rectificar inadecuadamente, por ejemplo, afecta la resistencia a la fatiga de una aleación de acero, como se muestra en la figura III.6

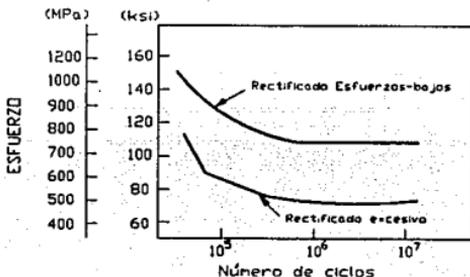


FIGURA III.6 Curva de fatiga para la superficie de un acero 4340

Varios efectos causados por y durante la producción de la manufactura de un componente puede ser responsable de la carencia de integridad superficial. Estos defectos son usualmente causados por una combinación de factores, tales como defectos en el material original, el método por el cual la superficie es producida, y la carencia de un control apropiado de los parámetros de proceso que pueden resultar en esfuerzos y temperaturas excesivas. Las siguientes son definiciones de los mayores defectos superficiales encontrados en la práctica.

Grietas son separaciones externas o internas con un perfil agudo.

Hoyos son depresiones poco profundas

Zona afectada por calor. Es la porción de un metal sujeto a ciclos térmicos fuera del punto de fusión.

Inclusiones son pequeñas, elementos no metálicos o conglomerados en el metal.

Ataque intergranular. Es el debilitamiento de las fronteras de grano por corrosión.

Transformaciones metalúrgicas. Involucran cambios microestructurales causados por temperatura y presión cíclica. Son incluidas las transformaciones de fase, recristalización, descarbonización, fusión y el maquinado por descargas eléctricas.

Picaduras. Son depresiones superficiales poco profundas, usualmente el resultado de ataques químicos o físicos.

Splatter consiste en pequeñas partículas fundidas resolidificadas depositadas sobre la superficie.

Deformación plástica. Es una deformación superficial severa causada por alta fricción, dados y herramientas, herramientas desgastadas y métodos de procesamiento.

Esfuerzos residuales. Son esfuerzos superficiales (tensión o compresión) causados por deformaciones no uniformes y por la distribución de temperaturas.

La técnica comúnmente usada para probar la integridad superficial es la metalografía. A partir de una pieza se obtiene una muestra la cual es pulida, atacada y observada al microscopio electrónico u óptico.

### III.3 MECANISMOS BASICOS DE LA TRIBOLOGIA

Es necesario comprender mejor los principales mecanismos que actúan entre dos superficies en contacto para controlar los procesos de desgaste. El desgaste tiene un mecanismo muy complicado y no se puede explicar sino con el conocimiento de otras disciplinas científicas. Pues con el tiempo, el mecanismo de desgaste cambia. Los efectos del desgaste se acumulan y pueden afectar la estructura.

Las propiedades de la superficie se pueden estudiar a partir de las fórmulas de Gibbs - Helmholtz (13)

$$du = de_{*} + Tds$$

$$dh = dg + Tds$$

donde:  $du$  = incremento en la energía interna  
 $de_{*}$  = incremento en la energía libre  
 $dh$  = incremento en la entalpía  
 $dg$  = incremento en el potencial termodinámico  
 $Tds$  = la energía no liberada de la disposición

De las fórmulas de Gibbs y Helmholtz resulta que para aumentar el área de superficie se tiene que facilitar la energía que parcialmente ( $de_{*} + dg$ ) la superficie va a expandir y que va a elevar la cantidad de calor en la superficie.

El aumento en la energía superficial intensifica la acción de los fenómenos superficiales como son la adhesión, la difusión, la recristalización etc.

Desde el punto de vista del desgaste, es de gran interés, la previsión, en función del esquema atómico, de lo que ocurrirá cuando dos átomos pertenecientes a dos cuerpos diferentes se pongan en contacto; este encuentro se hará, con frecuencia, en condiciones severas de temperatura y de presión; pues en las superficies en donde se efectúa el contacto, el rozamiento se reparte sobre un número restringido de áreas muy pequeñas que están sometidas a tensiones elevadas y temperaturas microlocalizadas que pueden

alcanzar 1500°C (11).

Dos átomos de cuerpos diferentes pueden asociarse para formar una molécula; la facilidad con que lo hacen depende ante todo de los electrones del nivel exterior.

Se sabe que los elementos más estables son los gases nobles, casi inertes químicamente; por ello su disposición atómica presenta un nivel mínimo de energía.

Por otro lado, dos átomos que cambian uno o dos electrones, constituirán cada uno de ellos, una estructura de gas noble con el nivel exterior saturado, se asociarán para formar una molécula estable; recordando que los metales son generalmente muy electropositivos con pocos electrones en el nivel exterior ( uno para el cobre y la plata) susceptibles a combinarse con elementos electronegativos de seis o siete electrones de valencia como los siguientes:

- el oxígeno como revestimiento esencial de los cuerpos en fricción (existe siempre al menos como película absorbida);
- el cloro como aditivo de los aceites para engrasar
  
- el azufre como elemento esencial de difusión en los tratamientos de superficie para mejorar el aspecto de las capas superficiales en fricción.

### III.3.1 ENLACES EN ESTADO SOLIDO

La rigidez de un sólido se da por que los átomos en el sólido están detenidos por enlaces interatómicos. Existen dos tipos de sólidos: cristalinos y amorfos.

Los sólidos amorfos carecen de cualquier clase de modelo regular o arreglo de átomos en el sólido. Los sólidos cristalinos incluyen la mayor parte de metales y aleaciones.

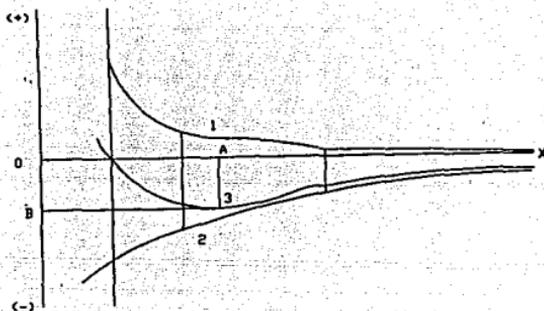
El arreglo espacial de átomos en un sólido cristalino está fuertemente influenciado por la naturaleza de los enlaces interatómicos, los cuales están influenciados por la estructura electrónica de átomos.

En dos cuerpos semejantes, cuando la distancia de los átomos que los separa es muy pequeña, dichos átomos están sometidos a fuerzas de repulsión y atracción.

La teoría molecular de la fricción y el desgaste fue propuesta por Tomlinson en 1929, él cual estudio detalladamente la naturaleza de las fuerzas atómicas en una red cristalina.

La hipótesis de Tomlinson (9), consiste fundamentalmente en que en condiciones de equilibrio las fuerzas de repulsión entre los átomos de un sólido contrarrestan las fuerzas de cohesión. Sin embargo, cuando dos átomos se encuentran en contacto, un átomo de uno de ellos llegará a estar lo bastante cerca de otro átomo del segundo cuerpo como para entrar al campo de repulsión. Cuando esto sucede, las dos superficies se separan causando una pérdida de energía que se manifiesta como la resistencia debida a la fricción.

Si se traza un gráfico del valor de estas dos resultantes, en función de la distancia entre los núcleos de los átomos, figura III.7, se observa que su suma tiene un mínimo; su abscisa es la distancia correspondiente al nivel mínimo de energía del par de átomos asociados (16).



**FIGURA III.7** Energía potencial en un par de átomos en función de la distancia interatómica.

1 =  $c$  potencial debido a la repulsión

2 =  $c$  potencial debido a la atracción

3 = Curva resultante      OA = posición media

OB =  $c$  mínimo potencial definiendo la posición media

Este acoplamiento con un vecino no cambia en absoluto, por otra parte, para el átomo, la distancia de energía mínima que impondrá a otros vecinos eventuales; de este modo, la estructura del material va a construirse <<disponiendo>> geoméricamente en el espacio esferas cuyo radio es la mitad de la distancia interatómica; la disposición de estas esferas llevará a utilizar el mayor número posible de ellas en un volumen dado.

Se sabe que la mayor parte de los metales disponen sus átomos de tres maneras principales: el sistema cúbico, el sistema de cúbico de caras centradas y el sistema compacto hexagonal.

Naturalmente, los electrones de los niveles exteriores van a encontrarse con interacciones; éstas van a dar al material su cohesión: crean enlaces, los cuales pueden ser de cuatro tipos, como se muestra en la figura III.8, (a) Van der Waals, (b) iónicos, (c) Metálicos y (d) Covalentes

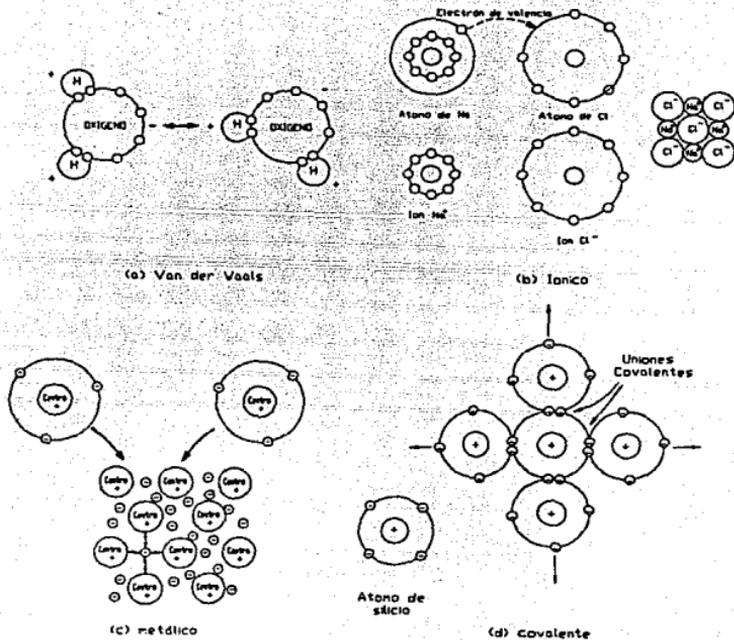


FIGURA III.8 Diferentes tipos de enlaces

(a) Enlace de Van der Waals.

Las uniones o enlaces de Van der Waals ligan moléculas o grupos de átomos mediante atracciones electrostáticas débiles. Muchos plásticos, cerámicos, el agua y otras moléculas están permanente o instantáneamente polarizadas; esto es, algunas porciones de la molécula tienden a estar con cargas positivas, mientras otras porciones están cargadas negativamente. La atracción electrostática

entre las regiones positivas de una molécula y las regiones negativas de una segunda molécula unen débilmente a las dos.

El enlace de Van der Waals es un enlace débil entre átomos o moléculas polarizadas instantáneamente. Es una unión secundaria, pero los átomos dentro de la molécula, o grupo de átomos, están unidos por fuertes enlaces covalentes o iónicos. Los cristales formados por gases nobles, tienen enlaces de Van der Waals.

Calentar agua al punto de ebullición rompe los enlaces citados y convierte el agua en vapor, pero se requieren temperaturas muy elevadas para romper las uniones covalentes que ligan a los átomos de oxígeno o hidrógeno. El enlace de Van der Waals es encontrado frecuentemente en sistemas tribológicos con la fisiorción de lubricantes líquidos y gases a una superficie sólida.

#### (b) Enlace iónico

Cuando en un material se encuentra presente más de un tipo de átomo, uno de ellos puede donar sus electrones de valencia a un átomo diferente, ocupando el nivel energético externo del segundo átomo. Ambos tienen ahora su nivel energético externo lleno (o vacío) y han adquirido carga eléctrica, comportándose como iones. El átomo que aporta los electrones queda con carga neta positiva y es un catión, mientras que el átomo que acepta los electrones adquiere carga neta negativa y es un anión. Los iones cargados opuestamente se atraen entre sí produciendo la unión iónica. Por ejemplo, la atracción entre los iones de sodio y de cloro produce cloruro de sodio, NaCl, o sal común.

Otro ejemplo clásico es el óxido de aluminio, un material tribológico el cual tiene inherente una elevada resistencia.

Cuando se aplica una fuerza a un cristal de cloruro de sodio, se rompe el equilibrio eléctrico entre los iones. En parte por esta causa los materiales unidos iónicamente tienen un comportamiento frágil. Su conductividad eléctrica es baja ya que la carga eléctrica

puede ser transferida por el movimiento de iones enteros, los que no se desplazan tan fácilmente como los electrones.

(c) Enlace metálico

La falta de iones cargados opuestamente en la estructura metálica y la falta de suficientes electrones de valencia para formar un enlace covalente verdadero hace necesario que más de dos átomos compartan electrones de valencia. Cada átomo de metal contribuye con sus electrones de valencia a formar una "nube" electrónica negativa. Estos electrones no están asociados con un ion particular, sino que se mueven entre los iones metálicos positivos en niveles de energía definidos. Los iones metálicos se mantienen juntos en virtud de su atracción mutua para la nube electrónica negativa. Cabe pensar que el enlace metálico es una extensión del enlace covalente aplicado a numerosos átomos.

El aluminio por ejemplo, libera sus tres electrones de valencia, dejando un cuerpo central o núcleo que consiste en el núcleo y los electrones internos. Puesto que faltan tres electrones negativos a dicha parte, ésta se convierte en un ion con carga positiva igual a 3. Los electrones de valencia, que ya no están asociados a ningún átomo en particular, se mueven libremente en la nube de electrones y se ligan a diversos núcleos de átomos. Tales partes centrales cargadas positivamente, se mantienen unidas entre sí por atracción mutua hacia el electrón, produciéndose de esta manera la fuerte unión metálica.

(d) Enlace covalente

Los materiales ligados en esta forma comparten electrones entre dos o más de sus átomos. Por ejemplo, un átomo de silicio, que tiene valencia 4, acepta ocho electrones en su capa externa cuando comparte sus electrones con otros cuatro átomos vecinos. Cada punto de unión que se comparte representa un enlace covalente, de modo que cada átomo de silicio está unido a cuatro átomos vecinos por medio de cuatro enlaces covalentes.

Como las uniones covalentes son muy fuertes, los materiales unidos de este modo tienen poca ductilidad y escasa conductividad eléctrica. Cuando se dobla una barra de silicio, los enlaces deben romperse porque los átomos de este elemento van a cambiar permanentemente la relación entre ellos. Igualmente, para que un electrón se mueva y forme una corriente eléctrica, el enlace covalente debe romperse para liberar al electrón, necesiándose temperaturas o voltajes muy elevados.

Los materiales formados por enlaces covalentes son frágiles, se comportan como aislantes eléctricos, alta dureza y un alto punto de fusión, tal como el diamante. A la vez, el enlace covalente encontrado en moléculas de polímeros y lubricantes es relativamente débil.

### III.3.2 ESTRUCTURA CRISTALINA

Un aspecto importante de cualquier material tribológico es la estructura cristalina, debido a que las propiedades están estrechamente relacionadas a éste rasgo. Un cristal está definido como un arreglo ordenado de átomos en el espacio. Generalmente los materiales están compuestos de cristales simples muy pequeños. Además tales materiales son conocidos como policristalinos y los cristales en estos materiales son referidos como granos.

En cristales, los átomos tienden a enlazar uno a otro en una disposición particular o arreglo el cual está repetido por todas partes del cristal. La densidad atómica varía en diferentes direcciones, llamadas planos atómicos, a través del cristal. En otras palabras, el sólido es hecho de los enlaces atómicos individuales dentro de los planos cristalinos, y los planos están enlazados por todas las partes del sólido. Así que la estructura de un cristal puede ser representada por una celda unitaria debido a que el látice entero puede ser derivado por la repetición de esta celda como unidad.

La Figura III.9 muestra los arreglos atómicos de la estructura cúbica simple, cúbica de cuerpo centrado (bcc), cúbica centrada en las caras (fcc) y hexagonal compacta (hcp).

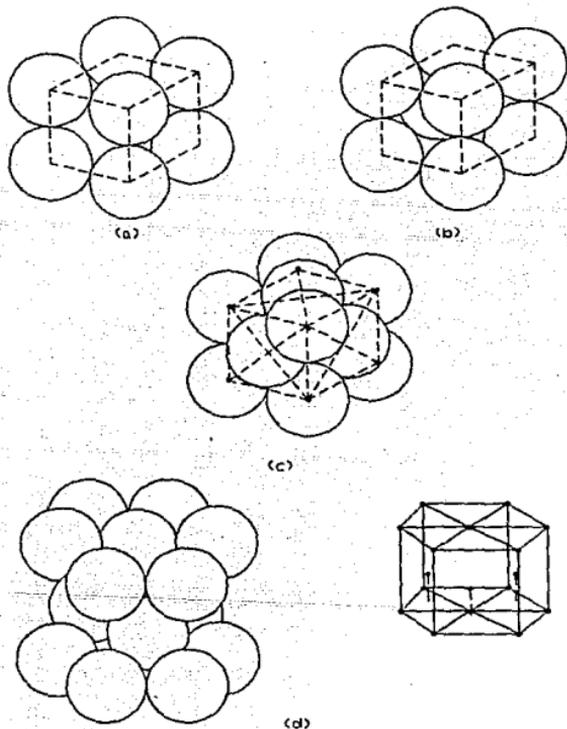


FIGURA III.9 Arreglos atómicos en (a) cúbica simple, (b) bcc, (c) fcc y (hcp) para celdas unitarias

Materiales tales como metales, aleaciones, cerámicos y lubricantes sólidos son cristalinos con sus átomos o moléculas arregladas o empaquetadas de acuerdo con una estructura particular. Por ejemplo metales como cobre, níquel, plata, oro, platino, hierro  $\alpha$  y aluminio tiene una estructura cúbica centrada en las caras; hierro  $\alpha$ , tantalio, niobio, vanadio y tungsteno tienen una estructura cúbica centrada en el cuerpo; y el zinc, cobalto, zirconio y titanio tienen una estructura hexagonal compacta. Las posiciones atómicas, características y ejemplos típicos de cs, bcc, fcc y hcp son enlistados en la Tabla III.2 (12).

**TABLA III.2** Estructuras cristalinas, posición atómica y ejemplos

Estructura del cristal		Posición atómica y características	Ejemplos
C.S	(i)	Solamente las posiciones de las esquinas son ocupadas Hay un átomo por celda unitaria Cada átomo está rodeado por 6 vecinos más cercanos	NaCl, MgO
b.c.c.	(ii)	Los átomos ocupan la esquina (0,0,0) y la posición de cuerpo centrado (1/2 1/2 1/2) Hay dos átomos por celda unitaria Cada átomo está rodeado por 8 vecinos más cercanos	Fe, Cr, Mn W, Mo, V, Nb, Ta
f.c.c.	(iii)	Los átomos de las esquinas están en (0,0,0) y la posición para las caras centradas son (1/2 1/2 0), etc. Hay cuatro átomos por celda unitaria Cada átomo está rodeado por 12 átomos vecinos más cercanos.	Pb, Cu, Ag Al, Pd, Pt Sr, Ca
h.c.p.	(iv)	El latice es un hexagono simple con 2 átomos (0 0 0, 2/3 1/3 1/2) asociados con el punto del latice Los índices hexagonales con los cuatro ejes ( $a_1$ , $a_2$ , $a_3$ , c) son usados: (0 0 0 1) c - indica los ejes el radio c/a para el empaquetamiento de esferas es $(8/3)^{1/2} = 1.633$ Cada átomo está rodeado por 12 átomos vecinos más cercanos	

El método usual de deformación plástica en metales es por el deslizamiento de bloques de los cristales uno encima de otro a lo largo de planos cristalográficos, llamados planos de deslizamiento. Como una aproximación muy burda, el deslizamiento de un cristal puede ser considerado análogo a la distorsión producida en un paquete de cartas cuando esta es empujada desde la carta final. La figura III.10 ilustra este mecanismo clásico de deslizamiento. En la figura III.10a, un esfuerzo cortante es aplicado a un cubo de metal con la superficie superior pulida. El deslizamiento ocurre cuando el esfuerzo cortante excede un valor crítico. Los átomos se mueven un número integral de distancias atómicas a lo largo del plano de deslizamiento, y un escalón es producido en la superficie pulida, figura III.10b. Mientras se observa la superficie pulida desde arriba con un microscopio, el escalón se mostrara como una línea, a la cual se le da el nombre de línea de deslizamiento. si la superficie es pulida nuevamente despues de que el deslizamiento a ocurrido, el escalón es removido y la línea de deslizamiento desaparecera, figura III.10c (21).

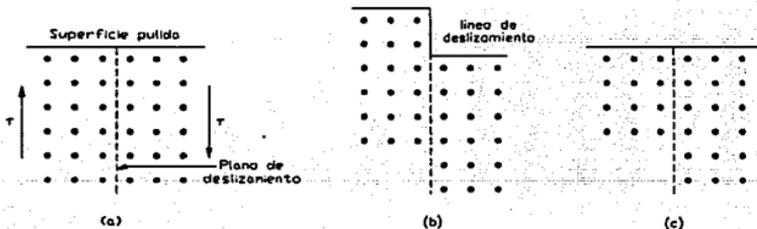


FIGURA III.10 Dibujo esquemático de una idea clásica de deslizamiento

Debido a la simetría translacional del látice cristalino, la estructura cristalina es perfectamente reabastecida después que el deslizamiento ha ocurrido proporcionando que la deformación sea uniforme. Cada átomo en la parte deslizada del cristal mueve hacia adelante el mismo número integral de espaciamentos de látice. Se debe notar que las líneas de deslizamiento son debidos a cambios en la elevación superficial.

El hecho de que un cristal simple permanezca como un cristal después de la deformación homogénea plástica, provoca que existan limitaciones sobre la vía en la cual la deformación plástica puede ocurrir. El deslizamiento ocurre fácilmente en direcciones específicas sobre ciertos planos cristalográficos. Generalmente el plano de deslizamiento es el plano de densidad atómica más grande, Tabla III-3 (21), y la dirección de deslizamiento es la dirección de empaquetamiento más cerrada dentro del plano de deslizamiento.

Tabla III-3 Densidad atómica de planos de índice-bajo

Estructura cristalina	Plano	Densidad atómica átomos por unidad de área	Distancia entre planos
f. c. c	Octaedro {111}	$4/\sqrt{3} a_0^2$	$a_0\sqrt{3}$
	Cubo {100}	$2/a_0^2$	$a_0/2$
	Dodecahedro {110}	$2/\sqrt{2} a_0^2$	$a_0/2\sqrt{2}$
b. c. c	Dodecahedro {110}	$2/\sqrt{2} a_0^2$	$a_0/\sqrt{2}$
	cubo {100}	$1/a_0^2$	$a_0/2$
	octaedro {111}	$1/\sqrt{3} a_0^2$	$a_0/2\sqrt{3}$
h. c. p	Basal {0001}	$2/\sqrt{3} a_0^2$	c

Puesto que los planos de densidad atómica mayor son también los planos más espaciados en la estructura cristalina, la resistencia para deslizarse es generalmente menor para éstos planos que para cualquier otra colocación de planos. El plano de deslizamiento

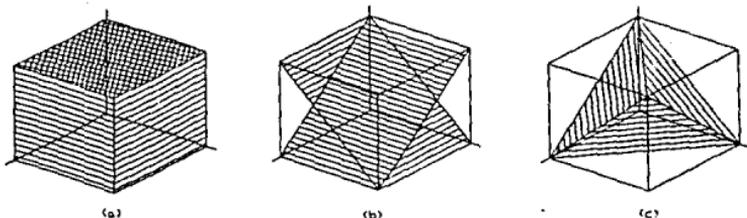
simultáneamente con la dirección de deslizamiento establece el sistema de deslizamiento.

En el empaquetamiento de hexagonal compacta, solamente el plano con alta densidad atómica es el plano basal (0001). Los ejes  $\langle 1120 \rangle$  son la dirección de empaquetamiento compacto. Para el zinc, cadmio, magnesio y cobalto el deslizamiento ocurre sobre el plano (0001) en las direcciones  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ . Entonces existe solamente un plano basal por celda unitaria.

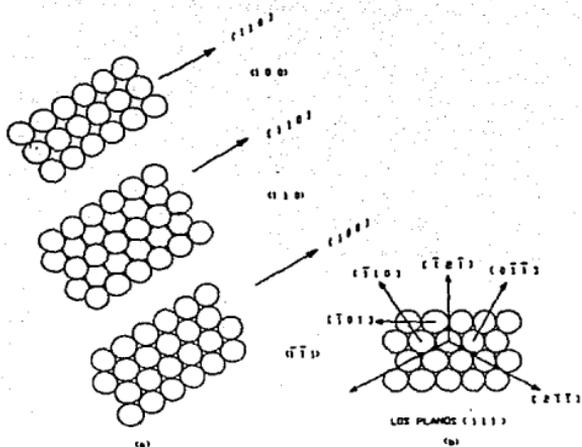
En la estructura cúbica de caras centradas, los planos octaedros {111} y la dirección  $\langle 110 \rangle$  son los sistemas de empaquetamiento compacto. Hay ocho planos {111} en la f.c.c. por celda unitaria. Sin embargo, los planos a caras opuestas del octaedro son paralelos para cada uno, así que existen solamente cuatro posiciones. Cada plano {111} contiene tres direcciones  $\langle 110 \rangle$ .

La estructura b.c.c. no es una estructura de empaquetamiento compacto como la estructuras fcc y hcp. No existe un plano predominante de densidad atómica, los planos {110} tienen la densidad atómica más alta en la estructura bcc, pero la diferencia no es superior con respecto a otros planos. El deslizamiento en metales bcc ocurre sobre los planos {110}, {112} y {123}, mientras que la dirección de deslizamiento es siempre la dirección [111]. Hay 48 posibles sistemas de deslizamiento, pero los planos no tienen un empaquetamiento compacto como en la estructura fcc, los esfuerzos cortantes más altos son usualmente requeridos para provocar el deslizamiento.

La figura III.11(a) muestran los arreglos de empaquetamiento para tres planos atómicos en el sistema cúbico de caras centradas. El empaquetamiento compacto es una manera de colocar objetos equidimensionalmente en el espacio así que el espacio disponible es ocupado eficientemente. La notación (110) en la figura III.11(a) muestra la dirección en la cual los planos atómicos se mueven relativamente uno contra otro. De la figura III.11(a) se observa que los planos (111) tienen el empaquetamiento atómico más cerrado, el cual resulta en la energía superficial más baja en el sistema fcc; en cambio los planos (110) son menos prometedores a interacciones químicas con los constituyentes ambientales. En cambio, los planos (110) en los sistemas fcc están empacados menos densamente, exhibiendo la energía superficial mayor, y además son más reactivos a su ambiente.



**FIGURA III.11(a)** Planos de posibles deslizamientos en cristales bcc y fcc: (a) tres planos (100), (b) planos (110) y (c) planos (111)



**FIGURA III.11(b) Planos cristalográficos y direcciones de empaquetamiento para materiales fcc: (a) apariencia de varios planos cristalinos, y (b) planos (111)**

El módulo de elasticidad y la microdureza de los planos (110) serán también más bajos que los planos (111). Como se ha mencionado la densidad de empaquetamiento de un plano particular, es decir (111) varía también significativamente con la dirección, mostrada en la figura 3.11(b), lo cual afecta la energía superficial y otras propiedades.

### III.3.3 DEFECTOS SUPERFICIALES

En la práctica, muchos materiales cristalinos tienen numerosas desviaciones pequeñas del arreglo atómico ideal, las cuales tienen efecto en el comportamiento del material.

Las imperfecciones cristalinas pueden ser clasificadas sobre las bases de su geometría como sigue: imperfecciones puntuales, imperfecciones de línea, imperfecciones superficiales e imperfecciones de volumen. Las imperfecciones de volumen pueden ser inclusiones de partículas exteriores, grandes vacíos o poros.

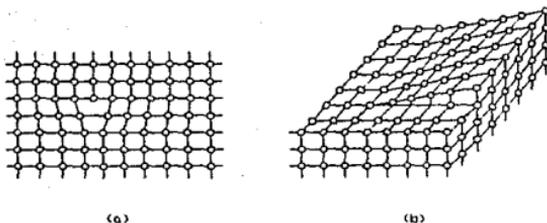
#### III.3.3.1 Imperfecciones de punto

Imperfecciones de punto son referidas como imperfecciones dimensionales-cero. La figura III.12 muestra diferentes tipos de imperfecciones puntuales las cuales pueden ocurrir en cristales.

Una vacancia se refiere a un sitio atómico desde el cual el átomo es perdido, la figura III.12(a). La impureza sustitucional se refiere a un átomo exterior que substituye o reemplaza a un átomo en el cristal, figura III.12(b). En una impureza intersticial un átomo de tamaño pequeño ocupa un espacio vacío en el láctice cristalino, quitando de sus sitios cualquiera de los átomos originales, figura III.12(c).

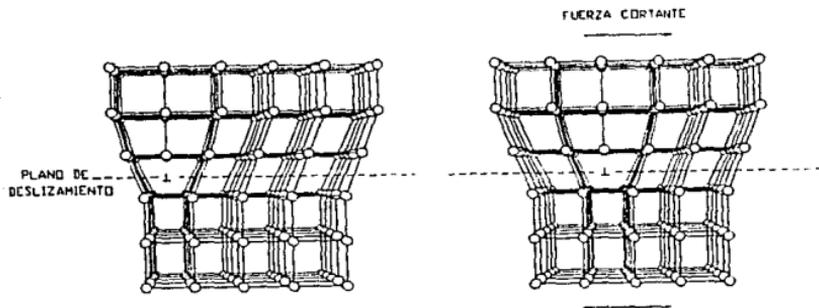
La presencia de distorsiones puntuales provoca modificaciones en el cristal. Por ejemplo, si la imperfección es una vacancia, los enlaces que el átomo perdido pudo haber formado con éstos vecinos no estarán presentes. En una imperfección sustitucional, un átomo más grande introduce esfuerzos compresivos y las deformaciones correspondientes alrededor de éste, donde un átomo más pequeño crea un cambio de esfuerzo-deformación a tensión. Todas éstas imperfecciones tienden a incrementar la entalpía de los cristales.





**FIGURA III.13 Imperfecciones de línea (dislocaciones): (a) Dislocación de borde y (b) dislocación de tornillo**

Cuando el cristal mostrado en la figura III.13(a) está sujeto a fuerzas de corte suficientemente grandes dirigidas perpendicularmente a las dislocaciones, estas se moverán como se muestra en la figura III.14.



**FIGURA III.14 Deformación permanente resultado del movimiento de una dislocación de borde: (a) antes y (b) después de deslizarse al aplicarse una fuerza cortante.**

De ésta manera, debido a la fuerza aplicada, la dislocación de borde se ha movido, y a través de la repetición de éste proceso puede continuar para moverse y deslizarse. Si la dislocación se mueve a través del cristal entero figura III.14(c); entonces la mitad superior del cristal será cambiado por un vector de deslizamiento o espaciamentos interatómicos relativos a la mitad inferior. La deformación plástica ocurre a través del movimiento de dislocaciones, lo cual requiere de fuerzas más pequeñas que aquellas necesarias para deformaciones permanentes a un cristal perfecto.

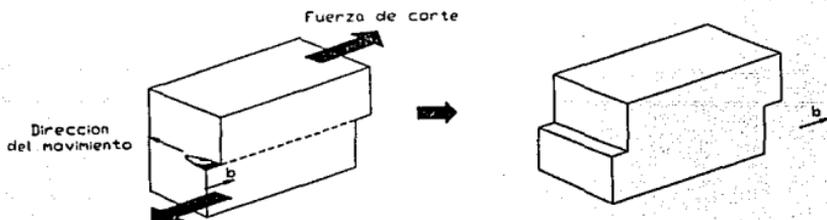


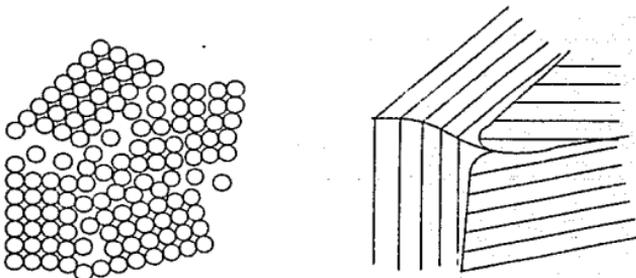
FIGURA III.14(c) Cambio permanente del cristal

### III.3.3.3 IMPERFECCIONES SUPERFICIALES

Se refieren a regiones o distorsiones que están situadas arriba de la superficie teniendo un espesor de pequeños diámetros atómicos. La superficie externa es una imperfección en sí misma, como los enlaces atómicos no se extienden más allá de la superficie, esto afecta directamente la energía superficial. Además de la superficie exterior, los cristales pueden tener imperfecciones superficiales interiores. Durante la solidificación o recristalización, nuevos materiales que están orientados casualmente con respecto a otros, forman partes diferentes en los materiales. Crecen por la adición de átomos de las regiones adyacentes y eventualmente chocan unos contra otros. Cuando dos cristales chocan de ésta forma, tratan de unir a

su configuración a los átomos que son alcanzados. A causa de éstas fuerzas de oposición, ningún cristal puede enlazarse y por lo tanto tomar una posición del arreglo. Estas posiciones en la región de frontera entre dos cristales son así distorcionadas y sin ninguna relación para ambos. La región frontera (límite) es llamada frontera de grano.

La orientación cristalina cambia severamente con la frontera de grano.



*Figura III.15 Los arreglos atómicos en las fronteras de grano las cuales están distorcionadas y sin relación.*

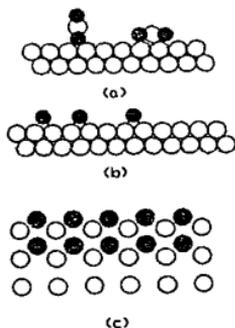
### III.-4 INTERACCIÓN SUPERFICIAL CON EL AMBIENTE

#### III.4.1 Fisiabsorción

Las superficies limpias son extremadamente activas químicamente. La energía potencial de un átomo en la superficie de un sólido en vacío, es más grande que la de un átomo dentro del cuerpo, porque una interacción de equilibrio es establecida entre los átomos en un cristal tridimensional, el cual no puede ser alcanzado en la superficie. Existe un número pequeño de átomos vecinos en la superficie, como cada átomo no está completamente enlazado, almacena energía libre, por ejemplo si un gas es admitido por el vacío, la energía libre puede ser más baja por absorción.

Esto ocurre espontáneamente, y las partículas son absorbidas en sitios localizados o retienen la movilidad arriba de la superficie. Debido a que los átomos superficiales tienen éste exceso de energía, los átomos pueden interactuar mutuamente, con otros átomos del volumen y con partículas del ambiente.

Uno de los tipos más comunes de interacción superficial que pueden tomar lugar con una superficie limpia es la absorción física de especies sobre la superficie sólida. El proceso de absorción física es un proceso relativamente débil el cual es mostrado en la figura III.16. La molécula mostrada en la figura, por fisiabsorción, por sí misma se enlaza a la superficie, la cual es mostrada como una molécula diatómica como ocurre en el oxígeno ( $O_2$ ). En tal caso ambos átomos de las moléculas de oxígeno pueden enlazarse a la superficie ya contaminada. Sin embargo, una muy pequeña cantidad de energía es requerida para remover los átomos fisiabsorbidos. Este proceso característico involucra fuerzas de Van der Waals.



**FIGURA III.16** *Diversas interacciones superficiales: (a) fisiabsorción, (b) quimiabsorción y (c) formación de componentes.*

### III.4.2 QUIMIABSORCION

La quimiabsorción es un proceso de una sola capa. Cuando los átomos gaseosos individuales interactúan con una superficie sólida, la quimiabsorción ocurre y los espacios atómicos empiezan a ser enlazados a la superficie sólida figura III.16(b). La quimiabsorción es un enlazamiento mayor que el mostrado en la fisisorción. La resistencia de los enlaces son una función de la actividad química de la superficie sólida, esto es, energía superficial, grado de alcance superficial del material que absorbe, reactividad de los espacios adsorbentes y ésta estructura. La energía superficial de la superficie sólida, tiene una tendencia a la quimiabsorción. En general, en las zonas de energía alta, los planos de densidad cristalográfica atómica baja serán quimiabsorbidos más rápidamente que los planos de densidad atómica alta y energía superficial baja. Además, en el caso de cobre, plata y oro, se observa que el oxígeno quimiabsorbera con relativa fuerza al cobre, debilitando a la plata y no del todo al oro.

### III.4.3 FORMACION DE COMPUESTOS

La formación de compuestos sobre las superficies sólidas juega un papel importante en los sistemas tribológicos, figura III.15(c). Películas fisisorbidas y quimiabsorbidas son muy efectivas en la reducción de fricción y desgaste moderado bajo fricción moderada. Estas películas fallan regularmente bajo condiciones de fricción severa y además no son muy efectivas en la prevención de desgaste o ataque. La presencia de óxidos sobre metales previene su destrucción durante la fricción, pero una vez que han sido removidos, la reoxidación de la superficie puede ser también lenta para ser efectiva.

La formación de compuestos por reacción química surgen sobre la superficie del material, sean metales o no metales. Una actividad mayor puede ser añadida por los lubricantes al reaccionar con las superficies en fricción y de ésta forma producir películas protectoras.

### III.5 EFECTOS MICROESTRUCTURALES SOBRE LA FRICCIÓN Y EL DESGASTE

La microestructura de un material tiene un papel importante en las propiedades, por ejemplo, los materiales de grano fino muestran mejor tenacidad o resistencia al impacto, dureza y mayor dureza. Ha sido establecido que el módulo de elasticidad, la dureza y la topografía de la superficie afectan el número de asperezas en contacto y el tamaño individual de cada contacto, además de la resistencia a la deformación de la capa superficial. En el caso de metales, la nucleación de grietas y el coeficiente de propagación de grietas son afectadas considerablemente por la tenacidad, la cual afecta también la razón de desgaste. Las propiedades físicas y químicas, tal como la energía superficial, afecta la adhesión en la interfase la cual en cambio afecta la fricción y desgaste (12).

La figura III.17 presenta una clasificación de metales basados sobre diagramas de fase binarios. Los metales pueden ser clasificados dentro de metales puros, soluciones sólidas, aleaciones de dos fases, y compuestos. Los metales puros pueden ser clasificados además en términos de su estructura cristalina, subestructura, estructura de grano, etc. Similarmente las soluciones sólidas pueden ser clasificadas como soluciones ordenadas y desordenadas. Metales de dos fases pueden ser clasificados en términos de precipitados, tamaño, forma e interfase de la matriz-partícula. Los compuestos pueden ser clasificados en términos de tamaño, forma, orientación y conectividad de varias fases. En compuestos, las fracciones volumétricas de varias fases son comparables. Los eutécticos y eutectoides corresponden a los compuestos.

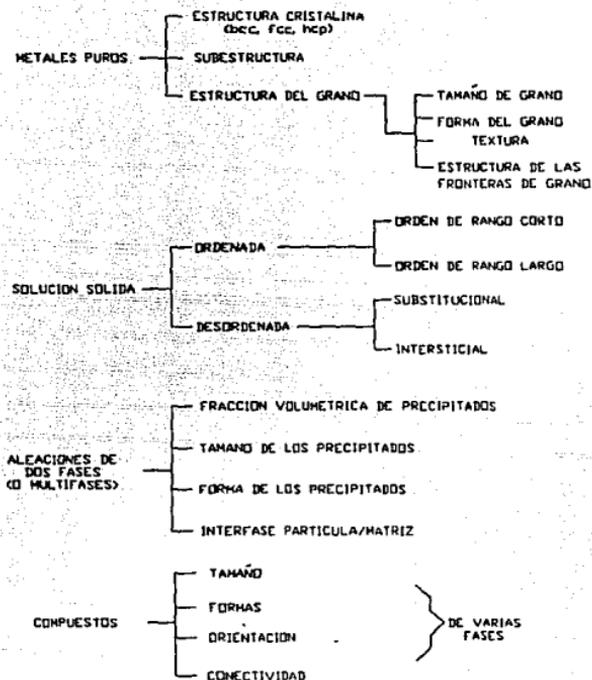


FIGURA III.17 *Clasificación de metales basada en los diagramas de fase binario*

Debido a que la fricción y desgaste involucran dos cuerpos en contacto, éstas son función de la microestructura de ambos materiales. Debido a que la fricción y el desgaste son procesos no reversibles, la microestructura inicial es alterada substancialmente durante el deslizamiento para producir microestructuras de estado estable completamente diferentes. La microestructura en estado estable es una función no solamente de la microestructura inicial sino también del comportamiento a la fricción y desgaste de los

metales en el período de transición.

Así uno debe seguir los cambios microestructurales desde la primera vez que los materiales son llevados al contacto hasta que el estado estable es alcanzado. Además, como la fricción y desgaste son fenómenos superficiales, son posibles los gradientes en la microestructura. Tales gradientes pueden afectar algunas propiedades básicas durante el deslizamiento.

### III.5.1 EFECTO DE LA MICROESTRUCTURA SOBRE LA FRICCIÓN

De acuerdo a Rabinowicz (12), el efecto de la microestructura sobre el coeficiente de fricción es esencialmente a través de la influencia del trabajo de adhesión de los metales en contacto  $W_{12}$  y la razón de dureza  $H$ .

La ecuación III.1, dada por Rabinowicz surge de extender el modelo de Bowden y Tabor al tomar en cuenta la energía superficial de los cuerpos en contacto.

$$\mu = \frac{\tau_{ad}}{H} \left[ 1 - 2 \left[ \frac{W_{12} \cot \theta}{\beta H} \right] \right]^{-1} \quad (III.1)$$

$$\text{donde } \tau_{ad} = W_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12}$$

$\theta$  = promedio de las asperezas inclinadas (slope)

El término  $W_{12}$  representa la energía que debe ser aplicada para separar una área unitaria de la interfase entre los cuerpos 1 y 2 (trabajo de adhesión), comprometiendo la necesidad para crear dos superficies de energía libre superficial  $\gamma_1$  y  $\gamma_2$ , pero destruyendo la interfase que tiene una cantidad de energía interfacial  $\gamma_{12}$ .  $W_{12}$  es generalmente referida como el trabajo de adhesión de los materiales en contacto.

La ecuación III.1, en la cual se relaciona el coeficiente de fricción a  $W_{12}/H$ , puede ser modificada, basada sobre evidencias experimentales, como

$$\mu_a = 0.3 + C_1 \frac{W_{12}}{H} \quad (\text{III.2})$$

donde  $C_1$  es una constante para una geometría constante. Desde que el valor máximo de  $W_{12}$  es  $(\tau_1 + \tau_2)$  y el valor mínimo es cero, una forma conveniente de usar la fórmula es:

$$W_{12} = C_2 (\tau_1 + \tau_2) \quad (\text{III.3})$$

Substituyendo la ecuación III.3 en III.2 se obtiene

$$\mu_a = 0.3 + C_1 C_2 (\tau_1 + \tau_2) / H \quad (\text{III.4})$$

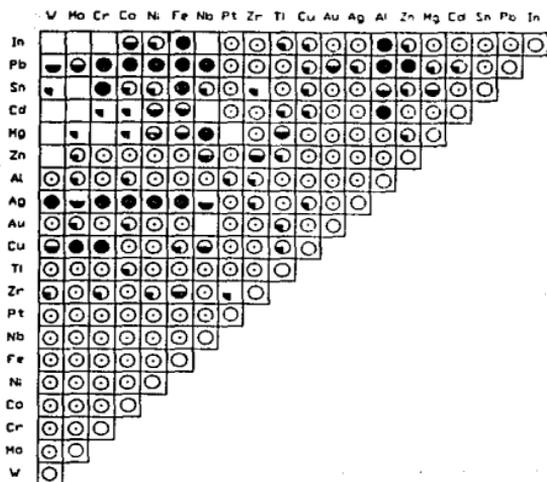
Notar que  $C_2$  es supuesta por ser una función de compatibilidad teniendo un valor alto donde la compatibilidad metalúrgica (metales con un alto grado de solubilidad mutua) es alta (compatibilidad = 1 para parejas idénticas), para un valor bajo donde las superficies son incompatibles metalúrgicamente (siendo aquellos metales que son mutuamente insolubles). Tales clasificaciones de compatibilidad fueron obtenidas por consideración de diagramas de fase binarios. El diagrama de compatibilidad de varias parejas de metales es mostrado en la figura III.18 (12).

TABLA III.4 Valores para el parámetro de compatibilidad  $C_2$

Condición	Símbolo	Valor medido de $C_2$
Idéntica	○	1.00
Compatible	◐	0.50
Compatibilidad limitada	◑	0.32
Compatibilidad muy limitada	◒	0.20
Incompatible	●	0.125

**TABLA III.5 Relación de Compatibilidad para Metales**

Símbolo	Solubilidad Metalúrgica	Compatibilidad Metalúrgica	Compatibilidad para el desizamiento	Desgaste anticipado
○	100%	Identica	Muy pobre	Muy alta
◉	arriba 1%	Soluble	Pobre	alta
◐	0.1-1%	Solubilidad intermedia	intermedia	intermedia
◑	debajo 0.1%	insolubilidad intermedia	intermedia o buena	intermedia o baja
●	dos Fases líquidas	Insoluble	muy buena	muy baja



**Figura III.18** Diagrama de compatibilidad de pareja de metales. El significado de los diferentes círculos es mostrada en las Tablas III.4 y III.5. Los círculos en blanco es debido a que se tiene insuficiente información.

Rabinowicz y sus colaboradores han elaborado numerosas pruebas de fricción sobre metales comerciales puros y han reportado el coeficiente para cientos de parejas de metales, Tabla III.6. (12)

Tabla III-6. Coeficiente de Fricción para Metales Puros Comerciales

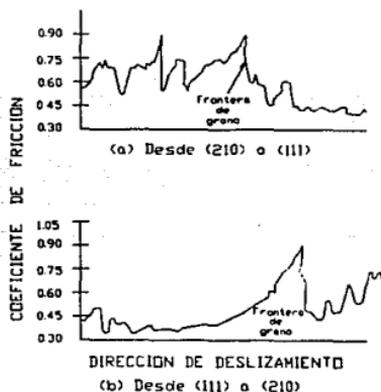
Metales	Estructura Cristalina	Dureza medida $\text{kg mm}^{-2}$	Energía superficial $\text{erg cm}^{-2}$	V	Mo	Cr	Co	Ni	Fe	Nb	Pt	Zr	Ti	Cu	Au	Ag	Al	Zn	Ni	Cd	Sn	Pb	In
In	Tetragonal	89	600	106	73	70	68	39	64	67	79	78	68	67	67	82	90	117	132	74	81	93	146
Pb	fcc	4	430	41	65	33	35	60	54	31	58	76	88	64	61	73	68	70	53	66	94	90	
Sn	Tetragonal	6	570	43	61	32	31	55	35	32	45	36	33	34	62	60	63	58	52	57	74		
Cd	hcp	22	620	44	59	36	32	47	32	36	49	35	35	39	49	48	38	35					
Ni	Hexagonal	40	760	48	31	32	4	42	41	50	61	51	52	55	53	53	38	35					
Zn	hcp	19	730	31	53	35	3	36	45	50	61	51	52	55	53	53	38	35					
Al	fcc	27	780	49	40	45	43	35	54	50	62	52	54	56	41	50	38	35					
Ag	fcc	70	820	49	40	45	43	35	54	50	62	52	54	56	41	50	38	35					
Au	fcc	70	1100	46	42	50	42	54	47	50	59	46	52	54	49	50	37	37					
Cu	fcc	80	1100	41	48	46	44	49	36	49	59	51	47	55									
Ti	hcp	250	1200	56	44	54	41	31	49	31	66	57	63										
Zr	hcp	240	1400	47	44	43	40	44	32	56	52	63											
Pt	fcc	140	1800	57	59	53	54	64	31	37	35												
Nb	bcc	160	2000	46	47	54	42	47	46	44													
Fe	bcc	200	1700	47	46	48	41	47	31														
M	fcc	210	1700	45	50	59	43	50															
Co	Hexagonal	230	1800	48	40	41	56																
Cr	bcc	600	1400	49	44	46																	
Mo	bcc	300	2300	51	44																		
V	bcc	500	2300	51	44																		

Rabinowicz encontró que tanto metales bcc y fcc siguieron esencialmente la ecuación III.4 y los valores obtenidos para  $C_2$  están dados en la Tabla III.4. En cuanto a materiales hcp tienen comportamiento marcadamente diferente y el coeficiente de fricción es generalmente más bajo. En éste caso el coeficiente de fricción fue encontrado por ser más bajo para valores más grandes de  $c/a$  que el valor ideal. Este concluyo que cuando  $c/a$  es más grande que el valor ideal, la deformación plástica toma lugar a esfuerzos bajos de los dados por el lugar de fluencia isotrópico (isotropic yield locus) cuando los planos de deslizamiento están orientados favorablemente.

Excepto para la desviación en metales hexagonales, se nota que cuando el parámetro de compatibilidad  $C_2$  es cercano a la unidad, los metales son compatibles y los coeficientes de fricción son altos. Generalmente, los metales mutuamente solubles son compatibles y, además, exhiben coeficientes de fricción grandes. Los efectos subestructurales no parecen ser importantes en metales puros. Cuando los metales son trabajados en frío, la penetración de la dureza se incrementa y es por ésto que  $W_{12}/H$  podría disminuir. Acordando el coeficiente de fricción podría también disminuir (el trabajo en frío no podría afectar apreciablemente el término  $W_{12}$ ). Aunque investigaciones no sistemáticas fueron hechas sobre el efecto del trabajo en frío, aparentemente el coeficiente de fricción no depende de la densidad de las dislocaciones, arreglo, etc. En verdad, los valores de los coeficientes de fricción obtenidos sobre metales recocidos después de una cantidad substancial de deslizamiento podría ser interpretado estrictamente como aquella para metales trabajados en frío debido a la substancial deformación del material durante el desgaste (tal vez alcanzando una dureza completa en un tiempo corto).

La presencia de fronteras de grano en materiales policristalinos influye en el comportamiento de la fricción. En los procesos de deslizamiento, las dislocaciones superficiales son bloqueadas en su movimiento por una frontera de grano. Acumulandose en la frontera de grano y produciendo deformaciones de

endurecimiento en las capas superficiales. Esta deformación de endurecimiento hace más difícil el deslizamiento e incrementa la fuerza de fricción para materiales en contacto deslizante (12). El metal deformado -que es, metal con alta concentración de dislocaciones- es químicamente más activo, porque la presencia de defectos incrementa la energía en el material.

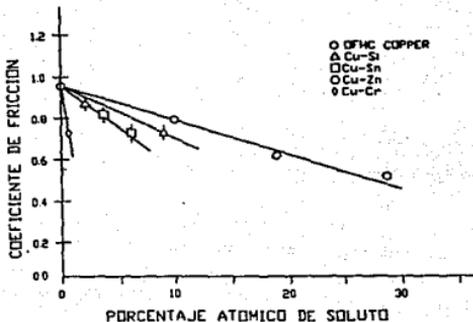


**FIGURA III.19** Coeficiente de fricción para el deslizamiento de cobre policristalino a través de la frontera de grano sobre un bicristal de cobre. Carga= 1N; velocidad de deslizamiento =  $1.4 \text{ mm min}^{-1}$

Experimentos de fricción deslizante han sido llevados a cabo a través de la superficie de las fronteras de grano en cristales simples y bicristales de cobre con la finalidad de medir la influencia de la fricción en las fronteras de grano ( ). Un grano tiene una orientación de acuerdo al plano (111); el otro en un plano con orientación (210); el deslizamiento de cobre cristalino deslizando a través de la superficie, la fricción fue medida, figura III.19. Se aprecia en la figura que hay una marcada

disminución en el coeficiente de fricción cuando el movimiento es desde la orientación (210) a la orientación (110) debido a que el plano (210) tiene una energía superficial más baja que la del plano (111). Un máximo del coeficiente de fricción aparece en la frontera de grano.

Cuando elementos aleantes son añadidos a metales puros, dos efectos son encontrados: (1) la dureza del metal se incrementa por los mecanismos de endurecimiento sustitucional o intersticial y (2) la energía superficial ésta disminuyendo conforme el contenido de los aleantes aumenta. El aleante introduce átomos extraños que distorsionan el cristal original, estas distorsiones locales ofrecen resistencia al movimiento de las dislocaciones, provocando que el material incremente su dureza. Es conocido que muchas impurezas segregan a las fronteras de grano e interfase. Resultados experimentales sobre soluciones sólidas sustitucionales obtenidas por Pamies-Teixeira (1977) (12) muestran que el coeficiente de fricción disminuye cuando la concentración de los elementos aleantes es incrementada figura III.20. Recientemente datos obtenidos por Tohkal (1978) (12) sobre una variedad de aceros y algunos resultados sobre la dispersión de óxidos de aleaciones fortalecidas indican también que el coeficiente de fricción disminuye cuando el contenido de soluto es disminuido. El efecto del soluto podría ser más predominante en las aleaciones intersticiales debido a los altos valores de razón de endurecimiento obtenidos en soluciones sólidas intersticiales.



**FIGURA III.20** Dependencia del coeficiente de fricción a un % de soluto de aleaciones basadas en cobre

Mientras que la dureza se incrementa enormemente con la cantidad de partículas de segundas fases, la energía superficial podría permanecer constante cuando el límite de solubilidad es excedido. De este modo, aún cuando la energía superficial e interfacial de aleaciones de dos fases no sean substancialmente diferentes de los valores correspondientes de las soluciones sólidas saturadas, de acuerdo a la ecuación III.2, el coeficiente de fricción podría disminuir conforme la fracción de volumen de la partícula de fase segunda es incrementada. Además, para una fracción volumétrica dada, la dureza puede ser incrementada por la disminución del tamaño de la partícula y el espaciamiento entre partículas.

Así, el coeficiente de fricción podría disminuir substancialmente en aleaciones de dos fases cuando se disminuye el tamaño de la partícula y el espaciamiento para una fracción volumétrica dada de la segunda fase. Desafortunadamente, los resultados experimentales sobre una variedad de aceros comerciales,

aleaciones endurecidas por precipitación, y la dispersión de óxidos de aleaciones fortalecidas no confirmaron ésta hipótesis. Así la teoría de Rabinowicz, la cual tiene éxito en la aplicación de la fricción de metales puros, fracasa en el caso de aleaciones de dos fases. En la actualidad no existe teoría que pueda explicar esta anomalía.

### III.5.2 EFECTOS DE LA MICROESTRUCTURA SOBRE EL DESGASTE

El desgaste adhesivo (que se tratara con más detalle en el capítulo IV) está relacionado directamente a la tendencia de diferentes materiales para formar soluciones sólidas o componetes intermetálicos en cada una de sus caras. La compatibilidad metalúrgica como lo indica la solubilidad mutua, representa el grado de atracción intrínseca de los átomos de los metales en contacto. Tal compatibilidad se determina mejor a través del diagrama de fase binario, el cual muestra el alcance de la solubilidad o insolubilidad mutuo en los estados líquido y sólido, figura III.18.

El significado de los diversos círculos, en términos de la solubilidad metalúrgica a temperatura de cuarto, compatibilidad metalúrgica, compatibilidad al deslizamiento, y el desgaste anticipado son mostrados en la Tabla III.5. La regla general es que el círculo más negro, tiene las mejores características de deslizamiento o el coeficiente de desgaste adhesivo más bajo, Tabla III.7.

**TABLA III.7 Coeficientes de desgaste de materiales que tienen diferentes solubilidades**

Pareja de Metales	Solubilidad	Desgaste Coeficiente, x 10 <sup>-4</sup>
Cu-Pb	No	0.10
Ni-Pb	No	0.21
Fe-Ag	No	0.68
Fe-Pb	No	0.69
Al-Pb	No	1.4
Al-Zn	Si	3.9
Al-Fe	Si	1.0
Fe-Cu	Si (min)	19.0
Al-Al	Si	30.0
Mg-Mg	Si	36.0
Fe-Hg	Si (min)	38.0
Fe-Fe	Si	77.0
Cu-Ni	Si	81.0

Evidencias experimentales indican que la razón de desgaste  $W$  de los metales es aproximadamente proporcional a la carga normal  $F_N$ .

$$W_{ad} = \frac{V}{L} = k \frac{F_N}{H}$$

$W_{ad}$  = razón de desgaste, volumen desgastado por unidad de distancia de deslizamiento.

$K$  = coeficiente de desgaste

$V$  = Volumen de desgaste

$F_N$  = Carga Normal

$L$  = Distancia de deslizamiento

$H$  = Dureza del material más suave

La figura III.21 indica aproximadamente que la razón de desgaste adhesivo de metales es inversamente proporcional a la dureza de acuerdo a la ecuación anterior. Sin embargo en caso de soluciones sólidas, la razón de desgaste no se encontró una buena correlación con la dureza, como puede ser visto en la figura III.22. La diferencia es más pronunciada en el caso de precipitación endurecida y aleaciones fortalecidas por dispersión.

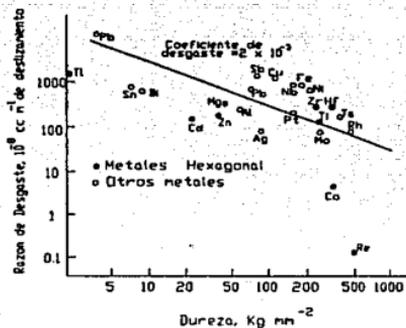


FIGURA III.21 Razón de desgaste como una función de la dureza para metales puros en una prueba espiga sobre disco a una carga de 2N

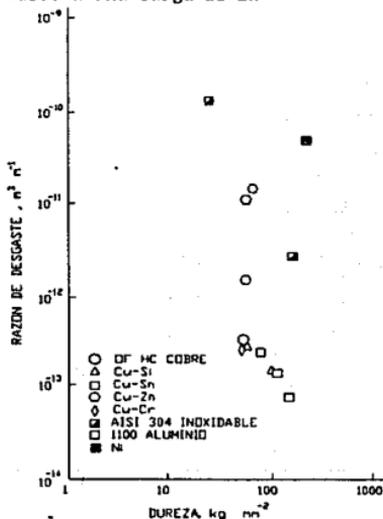


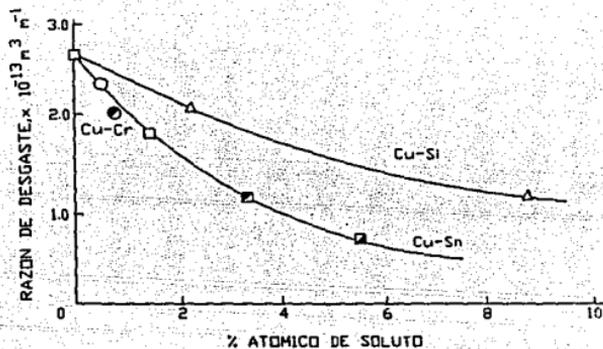
FIGURA III.22 Razón de desgaste vs dureza de aleaciones y metales puros disponibles comercialmente.

La clave para una mejor comprensión de los efectos microestructurales sobre la razón de desgaste, en muchos casos, consiste en el conocimiento de la deformación de la subsuperficie, crack nucleation, y el aspecto de propagación como una función de la microestructura.

La razón de desgaste exhibida para los metales bcc es generalmente más baja que las otras clases de cristales, debido a que los metales bcc son en general más duros que los metales fcc y hcp. Metales de baja energía con fallas de apilamiento (stacking-fault) exhiben un deslizamiento planar, mientras que metales de energía alta exhiben un deslizamiento transversal y una estructura de dislocación celular.

Se ha especulado por Hirth y Rigney (12) que las fronteras de la celda podrían actuar como un sitio potencial de nucleación de grietas y propagación de trayectorias. Aunque éstas especulaciones vistas razonablemente no prueban directamente las afirmaciones. Sin embargo, se ha mostrado experimentalmente por Suh y Saka (12) que la alta energía de materiales con fallas de apilamiento realmente exhiben alta razón de desgaste. El tamaño de grano y la forma del grano también influyen la razón de desgaste. La textura también puede tener alguna influencia sobre la razón de desgaste en metales bcc cuando los planos divididos son orientados favorablemente para promover la propagación de grietas.

La adición de átomos solutos a metales puros generalmente incrementa la dureza sin realzar la tendencia de nucleación de grietas. Pamiés-Teixeira (12) han mostrado que la razón de desgaste disminuye a medida que el contenido de soluto es incrementado, figura III.23 (12). Tanto soluciones sólidas intersticiales y sustitucionales son encontrados para exhibir propiedades superiores de desgaste (Se ha mencionado que el coeficiente de fricción disminuye con el incremento en el soluto contenido).

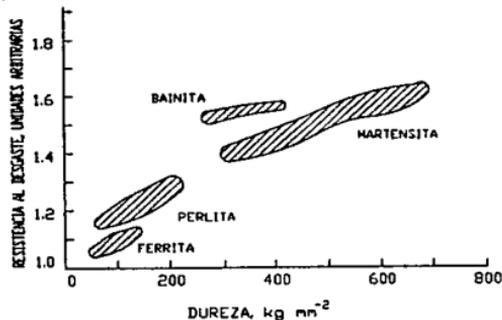


**FIGURA III.23 Razón de desgaste como una función de % de soluto en soluciones sólidas basadas en Cobre**

En general, el desgaste abrasivo, es reducido por contacto intersticial alto y gran dureza, relación bien conocida en experiencias prácticas. Por ejemplo, el acero SAE S2100 el cual es muy duro con un contenido de carbón de 1%. Se conoce que los átomos de carbón disueltos intersticialmente, atmosferas de carbón (precipitados coherentes y precipitados incoherentes), interfieren con el paso de dislocaciones, y así impiden el proceso de flujo plástico. Este impedimento no solamente incrementa la resistencia de cedencia (y dureza) sino también intensifica el proceso de endurecimiento por trabajo. La resistencia al desgaste alcanzado con la adición de microconstituyentes duros, es retenido a temperaturas elevadas pues muchos microconstituyentes son estables.

Datos para desgaste de aceros por abrasivos duros, figura III.24, muestra que la resistencia al desgaste se incrementa con el incremento de la dureza, pero las estructuras perlíticas y bainíticas son superiores a las estructuras ferríticas y martensíticas de la misma dureza (Borik, 1972; Khrushov y Babichev,

1965; Moore, 1974, 1981; Zum Gahr, 1987). Esto es atribuido a la mayor capacidad de endurecimiento por deformación y a la ductilidad de la perlita y bainita (1).



**FIGURA III.24** Efecto de la estructura y dureza sobre la resistencia a la abrasión de aceros: (a) bajo carbono recocidos o normalizados; (b) medio y alto carbono recocidos o normalizados.

Los mecanismos de nucleación de grietas en aleaciones de dos fases han sido trabajados por Jahanmir y Suh (1977). Desde un punto de vista microestructural, se necesita describir los efectos básicos de la morfología de la partícula. Cuando el camino libre medio de las partículas (la distancia recorrida por una partícula entre dos colisiones sin cualquier disturbio) es disminuido, la dureza aumenta y la razón de deformación subsuperficial disminuye. Pero la razón de desgaste aumenta o disminuye dependiendo del tamaño de la partícula y coherencia, debido a que estos parámetros afectan la razón de nucleación de grietas.

### III.6 CONTACTO MECANICO

Un estudio del área real de contacto es una parte integral de la ciencia de la fricción y desgaste. Las superficies de los cuerpos reales son idealmente lisas, pues está constituida por microrelieves los cuales tienen distintos pasos de Angstroms en altura.

Dos tipos de microdesviaciones del perfil de la superficie ideal son ahora reconocidas, esto es, superficie aspera y superficie ondulada.

Cuando dos superficies están en contacto, el contacto no es continuo y solamente ciertas partes de la superficie sostendrán la carga aplicada. La suma de estas áreas discretas de contacto forman el área de contacto real. El área de contacto real define las partes de la superficie donde hay una fuerte interacción entre los cuerpos. Por lo tanto, la fuerza de fricción está relacionada con el área real de contacto.

El daño superficial a sólidos durante el deslizamiento (desgaste), está estrechamente ligado con la magnitud del área real de contacto.

La formación del área real de contacto bajo carga ocurre como resultado de la penetración o aplastamiento de microasperezas individuales, y la deformación mayor a lo largo del área real de contacto más grande.

La proporción del área real de contacto al área aparente de contacto puede ser tan bajo como  $10^{-2}$  y depende de la distribución de las irregularidades de la superficie, la fuerza de contacto y el esfuerzo de cedencia involucrado del material más suave. El área real de contacto es más grande en el estado deslizante que en el estado estático.

De acuerdo al estado estático en la figura III.24 (b), el área real de contacto está dado por:

$$A_r = \sum_{i=1}^n A_i \quad \text{III.5}$$

donde  $A_r$  es el área real de contacto y  $A_i$  el área individual de contacto puntual.

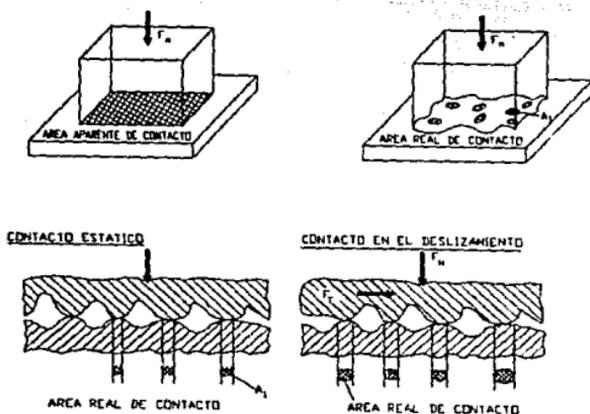


Figura III.24 (b) Área aparente y área real de contacto

Para el contacto estático de materiales idealmente elásticos-plásticos, el área real de contacto puede ser calculada:

$$A_r = \frac{F_n}{P_y} \quad \text{III.6}$$

donde  $F_n$  es la fuerza normal sobre las superficies en contacto y  $P_y$  la presión de cedencia del material más suave. De acuerdo a

Bowden y Tabor (11),  $P_y$  es mayor igual a la dureza del material más suave. Usando la siguiente relación entre dureza  $H$  y el esfuerzo de cedencia  $\sigma_y$  del material esforzado:

$$H = c \cdot \sigma_y \quad \text{III.7}$$

con  $c = 3$  para aceros ferríticos, se obtiene de la ecuación (III.6) para contacto estático:

$$\frac{A_r}{A} \propto \frac{P}{\sigma_y} \quad \text{III.8}$$

El área real de contacto entre el área aparente de contacto es proporcional a la presión superficial aplicada dividida por el esfuerzo de cedencia  $\sigma_y$  del material esforzado. El área real de contacto se incrementa debido al deslizamiento de las superficies relativas en contacto mutuo.

La Fricción y desgaste de dos superficies sólidas en contacto sin lubricación dependen del tipo de deformación de las irregularidades superficiales involucradas. Greenwood y Williamson (1) propusieron un índice de plasticidad  $\psi$ , el cual describe la transición de las asperezas superficiales de deformación elástica a deformación plástica:

$$\psi = \frac{E'}{H} \sqrt{\frac{S}{R}} \quad \text{(III.9)}$$

con

$$E' = \frac{E_1 E_2}{E_2(1-\nu_1)^2 + E_1(1-\nu_2)^2} \quad \text{(III.10)}$$

donde  $H$  es la dureza del material más suave,  $E_1$  y  $E_2$  son el módulo de Young y  $\nu_1, \nu_2$  es el radio de Poisson de los dos cuerpos en contacto,  $R$  es el radio de la cresta de las asperezas (El cual es

asumido para ser el mismo para todas las asperezas) y S es la desviación estandar de una distribución Gaussiana de las alturas de las asperezas. Si  $\psi < 0.6$  el contacto es predominantemente elástico, pero si  $\psi > 1$  la deformación plástica predomina. Whitehouse y Archard (1) introdujo un factor de plasticidad más general  $\psi^*$  el cual permite que la aspereza de la cresta tenga una distribución de curvaturas,

$$\psi^* = 0.69 \frac{E'}{H} \cdot \frac{S}{\beta} \quad (\text{III.11})$$

donde E' puede ser calculado de la relación (III.10), S es el valor rms de la superficie y  $\beta$  esta relacionado para la correlación de la distancia de la superficie. De acuerdo a Onions y Archard (1) la ecuación (III-9) plástica subestimado, lo cual puede ser debido a la suposición de que todas las asperezas tienen el mismo radio. Whitehouse y Archard (1) muestran sin embargo que la cresta más alta de asperezas tiene un radio más agudo que la cresta más pequeña.

De acuerdo a Tabor (11) la transición desde contacto elástico a contacto elastoplástico para la indentación de una esfera rígida dentro de una superficie lisa, depende de la profundidad de la indentación. El contacto empieza a ser elastoplástico si la profundidad de indentación h excede el valor crítico:

$$h_{cr} = 0.89R (H/E) \quad (\text{III.12})$$

donde R es el radio de la esfera, H es la dureza y E el módulo de Young de el material deformado. Apartir de las ecuaciones (III.9), (III.11) y (III.12) donde la deformación de las asperezas en contacto es determinado principalmente por las características de la textura superficial, dureza y constante elástica. La carga normal aplicada o la presión superficial no influye directamente en la transición desde la deformación elástica a la deformación plástica, de acuerdo a las ecuaciones (III.9) y (III.11).

### III.8.1 DEFORMACION ELASTICA

La naturaleza discreta del contacto es característico de todos los contactos entre sólidos y es relacionado a sus rugosidades superficiales. Considerando las asperezas como puntos de contacto individuales, los esfuerzos y fuerzas elásticas a el área de contacto pueden ser estimados desde la formula de Hertz ( 1).

Para simplicidad del análisis, ambos cuerpos en contacto son de el mismo material ( $E_1 = E_2$  y  $\nu_1 = \nu_2 = 0.3$ ). La figura III.25 muestra la distribución de presión y esfuerzos sobre y por debajo del área de contacto para diferentes configuraciones de contacto.

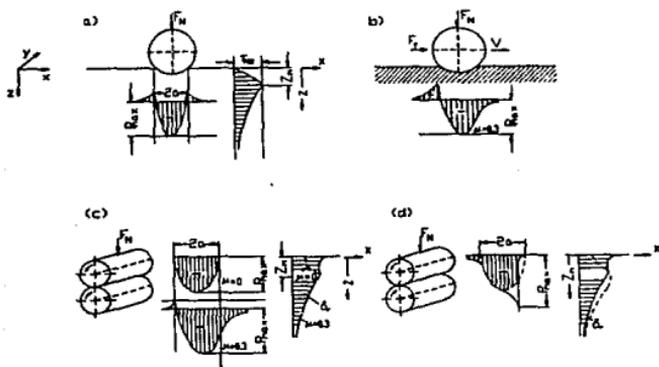


FIGURA III.25 Esquema de la distribución de esfuerzos para el contacto elástico de: (a) una esfera y un plano debido a la carga normal; (b) una esfera y un plano debido a la combinación de las cargas normales y tangencial donde  $F_T = 0.3F_N$ ; (c) El rolado de dos cilindros sin lubricación y (d) Dos cilindros lubricados.

### Contacto de una esfera y un plano

La presión de Hertz es distribuida hemisféricamente sobre un área de contacto plana con el radio de contacto  $a$  :

$$a = 1.11 \left[ \frac{F_N \cdot R}{E} \right]^{1/3} \quad (\text{III.13})$$

y la presión de contacto máxima  $P_{\max}$ :

$$P_{\max} = -0.388 \left[ \frac{F_N \cdot E^2}{R^2} \right]^{1/3} \quad (\text{III.14})$$

donde  $F_N$  es la carga normal,  $R$  el radio de la esfera y  $E$  el módulo de Young con  $E_1 = E_2$  y  $\nu_1 = \nu_2 = 0.3$ , el esfuerzo cortante máximo  $\tau_{\max}$  ocurre a una profundidad  $Z_m$  bajo el área de contacto (figura III.25(a)):

$$\tau_{\max} = 0.31 P_{\max} \quad (\text{III-15})$$

$$Z_m = 0.47 a \quad (\text{III-16})$$

Esfuerzos de tensión ocurren en una región cerrada a la superficie y fuera del círculo de contacto.

Combinando una carga normal con una carga tangencial resulta un incremento substancial de los esfuerzos tensiles en la parte trasera de la esfera de la superficie esforzada (figura III.25(b)). El máximo esfuerzo cortante ocurre ahora más cerca a la superficie o en la superficie, dependiendo sobre el coeficiente de fricción  $\mu$  entre los cuerpos en contacto. Los esfuerzos tensiles máximos en la parte trasera del círculo en contacto pueden ser calculados por

contacto deslizando ( 1):

$$\sigma_{\text{tmax}} = \frac{1-2\nu}{2} \cdot \frac{F_N}{\pi a} (1 + c' \cdot \mu) \quad (\text{III.17})$$

con

$$c' = \frac{3}{8} \pi \cdot \frac{4\nu}{1-2\nu}$$

#### Contacto con dos esferas

Para un contacto del tipo Hertz de dos esferas con radio  $R_1$  y  $R_2$ , el radio de contacto  $a$  es calculado de:

$$a = 1.11 \left[ \frac{F_N}{E} \left( \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \right) \right]^{1/3} \quad (\text{III.18})$$

y la presión máxima debida solamente a la carga normal:

$$P_{\text{max}} = 0.388 \left[ F_N \cdot E^2 \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2} \right) \right]^{1/3} \quad (\text{III.19})$$

El esfuerzo cortante máximo a una profundidad  $Z_m$  bajo la superficie es obtenida por

$$\tau_{\text{max}} = 0.31 P_{\text{max}} \quad (\text{III.20})$$

y

$$Z_m = 0.47a \quad (\text{III.21})$$

#### Contacto de dos cilindros

El radio de contacto  $a$  para un contacto del tipo Hertz de dos cilindros puede ser calculado desde:

$$a = 1.52 \left[ \frac{F_N \cdot R_1 \cdot R_2}{E \cdot l \cdot (R_1 + R_2)} \right]^{1/2} \quad (\text{III.22})$$

donde  $l$  es la longitud  $R_1$  y  $R_2$  el radio de los cilindros y  $E$  el módulo de Young. La presión máxima es obtenida por:

$$P_{\max} = -0.418 \left[ \frac{F_H}{l} \cdot E \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2} \right]^{1/2} \quad (\text{III.23})$$

El esfuerzo cortante máximo a una profundidad  $Z_m$  bajo la superficie es obtenida desde:

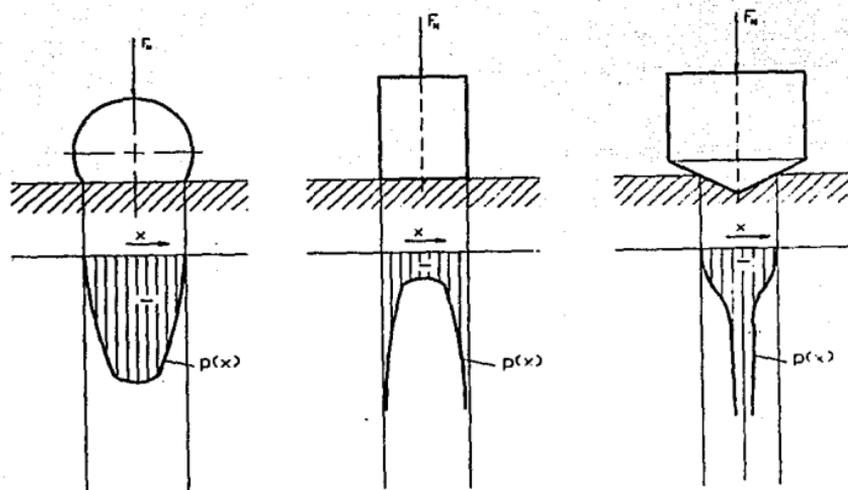
$$\tau_{\max} = 0.30 P_{\max} \quad (\text{III.24})$$

$$\text{y} \quad Z_m = 0.78a \quad (\text{III.25})$$

La Figura III.25(c) muestra el contacto de dos cilindros cualitativamente. La fricción entre dos cilindros rodando resulta en tracción tangencial en la superficie. Los esfuerzos en la superficie en el área de contacto son compresivos para un coeficiente de fricción  $\mu=0$ . Los componentes de los esfuerzos compresivos empiezan a incrementar asimétricamente con incremento del valor  $\mu$ . Simultáneamente, el incremento de los esfuerzos tensiles al final de la región de contacto. El esfuerzo de referencia calculado por el uso de la hipótesis de la energía de esfuerzo alcanza éste valor máximo bajo la superficie para  $\mu=0$ . El esfuerzo de referencia máximo ocurre sin embargo en la superficie cuando el coeficiente de fricción excede arriba de 0.2 (1).

El rolado de dos cilindros fue considerado por Bental y Johnson (1). En deslizamiento con lubricación figura III.25(d) el punto máximo local en la curva de presión ocurre justo antes del contacto final.

La figura III.28 muestra la influencia de el tamaño de indentadores sobre la distribución de presión en el área de contacto.



**FIGURA III.28** Curvas de distribución de presión a contacto elástico de tres diferentes indentadores (esfera, herramienta plana y conica).

En el área de contacto entre una esfera y una superficie plana, la presión máxima, con un valor finito, ocurre en el centro. En contraste, el modelo de un cono o una herramienta plana resulta en esfuerzos indeterminados en el centro o a la periferia del contacto. Por tanto, una geometría esférica es favorecida en comparación con otras, para el cálculo de problemas de contacto elástico.

Para deformación elástica pura, la proporcionalidad entre el área real de contacto  $A_r$  y la carga normal  $F_N$  es presentada en la figura III.27 para diferentes geometrías de contacto.

De la ecuación (III.13) para contacto de una esfera y un plano o de la ecuación (III.18) para un contacto entre dos esferas, en los cuales el contacto es de forma elíptica y el área real de contacto depende de la carga normal de acuerdo a:

$$A_r \propto F_N^{2/3} \quad (III.26)$$

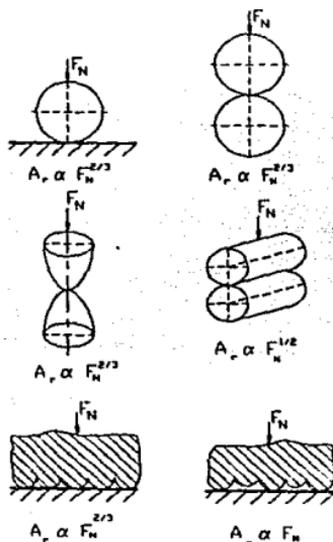


FIGURA III.27 Influencia de la geometría de contacto sobre la dependencia del área real de contacto  $A_r$  sobre la carga normal  $F_N$  en contacto puramente elástico.

Para superficies reales en fricción y desgaste, modelos de multiasperidades son más prácticos. Archard (1) estudio el contacto entre superficies cubiertas con asperezas formadas esféricamente. Dos modelos en contacto pueden ser distinguidos. Primeramente el número de contactos de asperezas es independiente de la fuerza normal. Un incremento en la carga normal provoca un aumento de la deformación en cada contacto.

Segundo, el área promedio de cada contacto de las asperezas permanece constante con aumentos de la carga normal, pero el número de contactos de las asperezas se incrementa. De acuerdo a estos modelos, se obtiene:

$$A_r \propto F_N^m \quad (III.27)$$

$$2/3 < m < 1$$

donde  $m=2/3$  para un número constante y  $m=1$  para un aumento en el número de contacto de asperezas con un aumento en la carga normal. La figura III.27 muestra esquemáticamente ambos modelos de asperezas. Otros modelos describen el contacto elástico de superficies cubiertas con asperezas más pequeñas. A consecuencia de esto, esas asperezas más pequeñas y más cerradas están lo más cercanas al factor  $m$  de aproximación 1. De acuerdo a Adams, Bowden y Tabor (1), el área real de contacto entre una esfera dura y una superficie plana suave de un polímero depende también de la carga normal, como lo predecido por la ecuación (III.27) con  $m$  entre 0.7 y 0.8. El contacto plástico de las asperezas es considerado en la ecuación (III.9), es decir,  $m$  es igual a 1. Las técnicas de elemento finito pueden ser aplicadas para calcular los esfuerzos a los que están sometidos las superficies rugosas sometidas a contacto elástico.

En muchos problemas de fricción y desgaste, el contacto entre dos cuerpos elásticos suaves puede ser influenciado por adhesión. Más o menos las fuerzas atractivas pueden ocurrir entre superficies

en contacto, dependiendo del medio ambiente o condición de lubricación, superficie rugosas, capa superficial o materiales involucrados.

Johnson et al. (1) ha mostrado que el radio de contacto entre dos cuerpos puede ser substancialmente incrementado por la acción de fuerzas superficiales atractivas. Describieron las fuerzas superficiales de adhesión por la energía superficial, esto es, el trabajo requerido para separar una unidad de área de las superficies adheridas.

Para dos esferas suaves, calcularon la razón del radio de contacto  $a$ , con adhesión  $a_0$  desde:

$$\left[ \frac{a_0}{a} \right]^3 = \frac{F_N + 3\gamma\pi R + [36\gamma\pi R F_N + (3\gamma\pi R)^2]^{1/2}}{F_N} \quad (\text{III.28})$$

donde  $F_N$  es la fuerza normal,  $\gamma$  la energía superficial y  $R = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ ,  $R_1$  y  $R_2$  siendo el radio de las esferas. La adhesión afuera, la energía superficial  $\gamma$  empieza en cero y  $a_0$  igual a  $a$ . La Figura III.28 muestra el campo de esfuerzos debido a la adhesión. Las esferas fueron presionadas al mismo tiempo por la fuerza normal  $F_N$ . Entonces esta fuerza fue reducida por  $\Delta F_N$ .

El contacto es mantenido por encima del área original ampliada debido a la adhesión. Como un resultado, los esfuerzos entre las superficies son compresivos al centro pero tensiles en el borde de contacto.

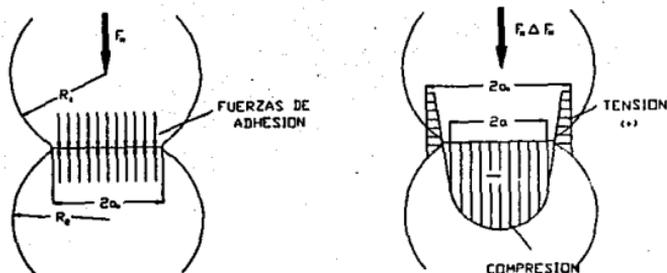


FIGURA III.28 Contacto elástico entre dos sólidos en la presencia de fuerzas superficiales.

Johnson (1) presentó un modelo del contacto de las superficies rugosas. De acuerdo a este modelo, la presión de contacto máxima disminuye y la presión de contacto efectiva se extiende por encima de un aumento de área, cuando la rugosidad superficial aumenta. La influencia de adhesión depende del valor del índice de adhesión:

$$\alpha_a = \left[ \frac{4 \cdot S^3 \cdot k^2}{3\pi^2 \gamma^2 R} \right]^{1/3} \quad (\text{III.29})$$

en el cual  $k = \frac{4}{3} E'$  y

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

donde  $S$  es la desviación estándar de la altura de las asperezas,  $\gamma$  la energía superficial,  $R = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$ ,  $R_1$  y  $R_2$  son los radios y  $E_1$ ,  $E_2$  el módulo de Young de los cuerpos en contacto. La adhesión excede un valor crítico ( $\alpha_{ad} = 1.6$ ).

Es por ésto, que la influencia de adhesión disminuye con el incremento de la rugosidad superficial o módulo elástico y con la disminución de la energía superficial.

Roy Chowdhury y Pollock (1) presentó un modelo multi-áspero para contacto plástico el cual expresa el área de contacto por:

$$A_r = \frac{F_N}{H \left( 1 - \frac{\gamma_{ad}}{H.S} \right)} \quad (III.30)$$

donde  $F_N$  es la carga aplicada,  $H$  la dureza,  $S$  la desviación estandar de las alturas de las asperezas y  $\gamma_{ad}$  el trabajo de adhesión por unidad de área. De acuerdo a éste modelo, una fuerza de adhesión significativa que puede sólomente ser supuesta cuando las asperezas son deformadas plásticamente. El área real de contacto se aumenta debido a la adhesión. La influencia de adhesión es reducida por el aumento de la dureza superficial y la rugosidad superficial.

### III.8.2 Deformación Plástica

Cuando dos cuerpos elásticos, por ejemplo una esfera y un espécimen plano, son presionados en contacto claramente uno contra otro, el contacto es puramente elástico. Si la carga normal aplicada excede a un valor crítico, al límite elástico, una zona plástica crece, la cual es rodeada por material deformado elásticamente. El límite elástico puede ser calculado desde :

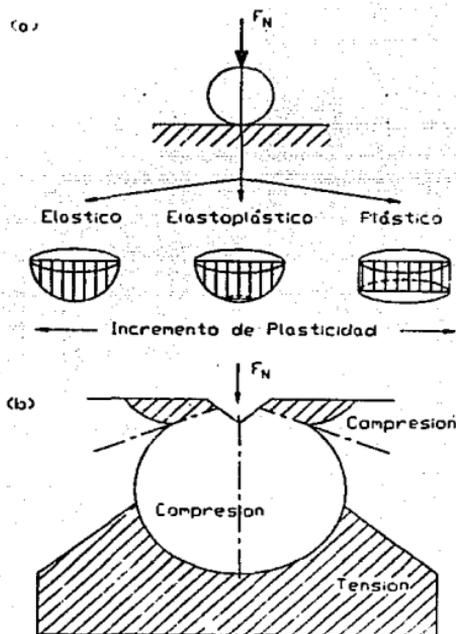
$$P = 1.85 \tau_y \quad (III.31)$$

donde  $P$  es la presión media de contacto y  $\tau_y$  el esfuerzo de cedencia en esfuerzo cortante puro. En contacto elástico, la presión de contacto en el punto máximo es 1.5 veces la presión de contacto media. Al aumentar la carga el contacto empieza a ser elastoplástico y la distribución de presión es más uniforme. Finalmente la condición de plasticidad completa existe, lo cual está dado por:

$$p \leq c^* \tau_y \quad (III-32)$$

donde  $c^* \approx 6$  sobre el criterio de Tresca y 5.2 con el criterio de Mises. La figura III.29(a) muestra esquemáticamente la

distribución de presión en contacto elástico, elastoplástico y plástico. Con aumento de la plasticidad, la distribución de presión hemisféricamente, con la presión máxima en el centro de el contacto elástico, es cambiada para una presión distribuida uniformemente a través del área de contacto en condición completamente plástica.



**FIGURA III.29** Representacionesquemática de la distribución de presión por y debajo de las áreas de contacto: (a) Contacto elástico, elastoplástico y plástico de una esfera y una superficie plana. (b) Indentación en una superficie plana.

Después de someterlo a cargas y sin cargas, un estado estable "Shakedown limit" (límite de sacudida) puede ser alcanzado, esto es, el contacto es cuasiestático. Este estado resulta de cambios en la geometría de contacto debido al flujo plástico conectado con endurecimiento por trabajo y el desarrollo de esfuerzos residuales. El límite de sacudida (shakedown limit) es determinado por:

$$P = 3.69 \tau_y \quad \text{(III.33)}$$

Identación elastoplástica por indentadores agudos figura III.29(b), acordando para su análisis, la presión (igual a la dureza) para una indentación elástica plástica por conos y pirámides Vickers están dadas por :

$$P = \sigma_y \left[ 0.494 + 0.577 \ln \left[ \frac{E \cdot \cot \theta}{\sigma_y \cdot (1 - \nu^2)} \right] \right] \quad \text{III.34}$$

donde  $\sigma_y$  es el esfuerzo de cedencia bajo simple tensión, E el módulo de Young y  $\nu$  el radio de Poisson del material de prueba y  $\theta$  es el ángulo semi-apical de indentadores cónicos y piramidales. Desde un modelo de "cavidad expandida" introducida por Hill, Marsh y Johnson, de acuerdo a estos autores la relación siguiente entre la presión de indentación y el esfuerzo de cedencia puede ser usada:

$$P = \frac{2}{3} \sigma_y \left[ 1 + \ln \frac{(E/\sigma_y) \cdot \cot \theta + 4(1-2\nu)}{8(1-\nu)} \right] \quad \text{III.35}$$

donde  $\theta$  es el ángulo semi-apical de indentadores cónicos o piramidal. El factor  $\cot \theta$  puede ser remplazado por  $d/D$  por indentadores esféricos, donde D es el diámetro del indentador y d el diámetro de la indentación. Indentadores esféricos conducen a una deformación elástica con cargas bajas, en contraste a indentadores agudos.

De aquí, la ecuación III.35 es solamente aplicable a indentadores esféricos cuando el límite elástico es excedido. La influencia de endurecimiento por trabajo durante los procesos de indentación es ignorado en éstos modelos.

El área real de contacto en la condición plástica puede ser estimado de la ecuación III.26. Bajo la acción combinada de una fuerza normal y una tangencial, el área real de contacto se aumenta.

McFarlane y Tabor ( 1) calculó el área real en contacto deslizando de un criterio de cedencia por uniones crecientes: (Yield criterion for Junction growth)

$$\sigma^2 + C_1 \tau^2 = P_y^2 \quad (\text{III.36})$$

$$\left[ \frac{F_N}{A_r} \right] + C_1 \left[ \frac{F_T}{A_r} \right]^2 = P_y^2 \quad (\text{III.37})$$

$$A_r^* = \frac{F_N}{P_y} \sqrt{1 + C_1 \left[ \frac{F_T}{F_N} \right]^2} \quad (\text{III.38})$$

$$A_r^* = A_r \sqrt{1 + C_1 \left[ \frac{F_T}{F_N} \right]^2} \quad (\text{III.39})$$

de la ecuación III.35, donde  $A_r^*$  y  $A_r$  son el área real en contacto deslizando y estático respectivamente,  $P_y$  la presión de cedencia del material más suave,  $\sigma$  la carga normal aplicada y  $\tau$  el esfuerzo tangencial aplicado y  $F_N$ ,  $F_T$  las fuerzas normal y tangencial.  $C_1$  es una constante con un valor arriba de 10.

Sólomente bajo una fuerza normal la ecuación III.38 es reducida a la ecuación III.27. El efecto combinado de una fuerza normal y una tangencial resulta en un aumento del área real de contacto.

En el contacto plástico de metales, el endurecimiento por trabajo puede ser un factor importante. La influencia del endurecimiento por trabajo sobre el área real de contacto puede ser estimado de un criterio de cedencia, similar al de la ecuación III.36:

$$\sigma^2 + C_1 \tau^2 = (P_2 + \Delta P_y)^2 \quad (\text{III.40})$$

y finalmente se obtiene:

$$A_r^o = A_r \frac{\sqrt{1 + C_1 \left[ \frac{F_T}{F_N} \right]^2}}{1 + \frac{\Delta P_y}{P_y}} \quad (\text{III.41})$$

donde  $\Delta P_y$  es el incremento en la presión de cedencia  $P_y$  debido al endurecimiento por trabajo. En general, la ecuación III.40 puede ser aplicada también cuando el trabajo de ablandamiento ( $-|\Delta P_y|$ ) ocurre. De acuerdo a este modelo, el endurecimiento por trabajo podría resultar en un ablandamiento más pequeño por trabajo en un área real de contacto más grande.

### III.7 Temperatura Superficial

En ambas deformaciones elásticas y plásticas durante el contacto deslizando de dos superficies de sólidos, la energía puede ser expandida al estar manteniendo el movimiento. Arriba del 90% de la energía expandida por deformación de las superficies de contacto

es disipado como calor, y causa un aumento en las temperaturas en el área de contacto que puede influir en las propiedades mecánicas y microestructurales de los sólidos.

Es conocido que aquellos procesos activados termicamente tales como recristalización, transformación, precipitación o reacciones químicas pueden cambiar substancialmente las condiciones de contacto y de aquí la fricción y desgaste. En un contacto del tipo Hertz, la presión superficial es reducida por el aumento de la temperatura superficial debido a una disminución del módulo de Young.

El área de la superficie en contacto actual tiende a ser considerado como una fuente de calor actuando solamente a un tiempo muy corto. La distribución de temperatura en las superficies en contacto depende en gran parte de la presión superficial, velocidad, geometría de contacto, rugosidad superficial, conductividad, película superficial, lubricante etc.

En el contacto de asperezas individuales, la energía esta siendo disipada tan rápidamente que aquí no hay tiempo para un flujo de calor substancial dentro de regiones fuera de la zona de contacto.

De aquí que muy altas temperaturas, el así llamado flash temperature, son inducidas localmente, el cual puede levantar substancialmente la temperatura de contacto arriba de la temperatura superficial para el tiempo de contacto áspero. Cuando las asperezas están fuera de contacto, la temperatura decrece a una temperatura promedio debida a la conducción de calor dentro del volumen. Esta temperatura promedio puede ser llamada la temperatura superficial en un estado de equilibrio. Una controversia existe para que la temperatura superficial o la temperatura de contacto (esto es la temperatura superficial promedio más la temperatura flash  $\Delta T_f$ ) sea considerada como la más importante para los problemas de fricción y desgaste. De aquí la importancia de los tribosistemas involucrados, pues de éstos depende la temperatura. La ocurrencia de capas blancas

en presencia de aceros es debida a la fricción induciendo transformación martensítica/austenítica. Este proceso es determinado por la temperatura de contacto y es aproximadamente independiente del tiempo. En contraste, la recristalización o precipitación depende de la temperatura y el tiempo.

Cambios microestructurales en asperezas superficiales causados por temperaturas de contacto son efectivas solamente en la zona superficial exterior.

La temperatura máxima ( la temperatura de flash adicional a la temperatura promedio superficial) debido al contacto friccional fue estudiado analíticamente por Block ( 1) . El introdujo un concepto de temperatura de flash para diseño de engranes.

La temperatura flash para el contacto friccional de dos sólidos pudo ser calculado por

$$\Delta T_f = 1.11 \frac{\mu \cdot F_N |v_1 - v_2|}{(K_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1 \cdot v_1)^{1/2} + (K_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2 \cdot v_2)^{1/2}} \cdot \frac{1}{l(2a)^{1/2}} \dots \dots \dots (III.42)$$

donde  $\mu$  es el coeficiente de fricción,  $F_N$  la carga normal,  $v_1$  y  $v_2$  las velocidades de las superficies 1 y 2,  $K_1$ ,  $K_2$  las conductividades térmicas,  $\rho_1, \rho_2$  las densidades,  $C_1$  y  $C_2$  el calor específico,  $2a$  el ancho del el área de contacto ( por ejemplo dos veces el radio de contacto de Hertz y  $l$  la longitud de cuerpos cilíndricos en contacto perpendicular al movimiento. Para calculos prácticos, se utilizan datos que ya existen acerca de las propiedades térmicas específicas de sólidos. La figura III.30 muestran algunos parámetros involucrados en la ecuación III.42.

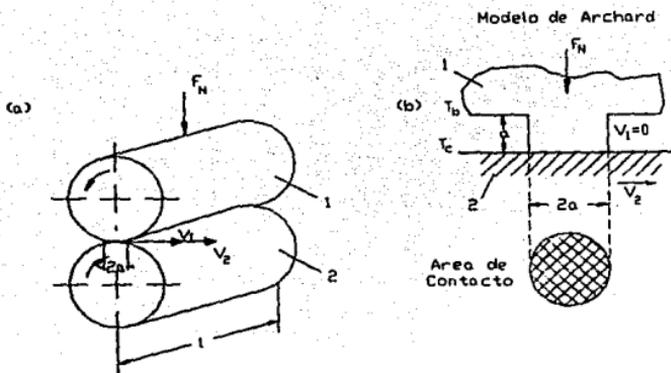


FIGURA III.30 Modelo para el cálculo del incremento de temperatura debido al calentamiento friccional: (a) para un área de contacto rectangular y (b) para un área de contacto circular.

La temperatura instantánea de las asperezas superficiales en contacto pueden ser calculadas desde el volumen de temperatura o la temperatura superficial promedio  $T_b$  y la temperatura relámpago (flash)  $\Delta T_f$ :

$$T_c = T_b + \Delta T_f \quad (3.43)$$

Archard (1) uso un modelo de un área de contacto circular figura III.30(b) para cálculos de temperatura media relámpago para algunos casos especiales. De este modelo las siguientes ecuaciones resultan para deformación de contacto elástico o plástico.

(a) Deformación elástica y velocidad de deslizamiento ( $l_a < 0.1$ )

$$\Delta T_f = \frac{\mu \cdot V \cdot F_N^{2/3} E^{1/3}}{8.8 \cdot K \cdot R^{1/3}} \quad (III.44)$$

(b) Deformación elástica y velocidad alta de deslizamiento  
( $L_a > 100$ )

$$\Delta T_r = \frac{\mu (V_z \cdot F_N \cdot E)^{1/2}}{3.8(k \cdot \rho \cdot C^{\circ} \cdot R)^{1/2}} \quad (\text{III.45})$$

(c) Deformación plástica y velocidad baja de deslizamiento  
( $L_a < 0.1$ )

$$\Delta T_r = \frac{\mu \cdot V_z \cdot (\pi \cdot F_N \cdot P_y)^{1/2}}{B \cdot K} \quad (\text{III.46})$$

(d) Deformación plástica y velocidad alta de deslizamiento  
( $L_a < 0.1$ )

$$\Delta T_r = \frac{\mu \cdot V_z^{1/2} \cdot F_N^{1/4} \cdot (\pi \cdot P_y)^{3/4}}{3.25 (K \cdot \rho \cdot c^{\circ})^{1/2}} \quad (\text{III.47})$$

donde

$$L_a = \frac{V_z \cdot \rho \cdot C^{\circ} \cdot a}{2 \cdot K} \quad (\text{III.48})$$

Para contacto elástico, el radio de contacto a esta dado por la ecuación (III.13) y para contacto plástico obtenemos de la ecuación (III.2)

$$a = \frac{F_N^{1/2}}{(\pi \cdot P_y)^{1/2}} \quad (\text{III.49})$$

Los símbolos usados son:  $F_N$  carga normal,  $\mu$  coeficiente de fricción,  $V_z$  velocidad deslizante,  $E$  módulo de Young,  $P_y$  presión de cedencia (mayor igual a la dureza),  $\rho$  densidad,  $c^{\circ}$  calor específico,  $K$  conductividad térmica y  $R$  radio sin deformación de asperezas.

Como se ha mencionado en el presente capítulo la fricción y el desgaste están entre los factores más significativos en el

conformado de los materiales. Se han logrado grandes avances en el entendimiento de estos fenómenos y los factores que los gobiernan. Entre los factores mencionados se destacan la afinidad y la solubilidad de los dos materiales en contacto, la naturaleza de las películas superficiales, la presencia de contaminantes, y los parámetros del proceso como carga, velocidad y temperatura.

#### IV.- DESGASTE POR DESLIZAMIENTO

Este mecanismo de desgaste se caracteriza por el movimiento relativo entre dos superficies sólidas, lisas y en contacto sobre carga, donde el daño de la superficie durante el deslizamiento ocurre por las rugosidades que puedan tener las superficies o por la penetración de asperezas o partículas ajenas a los materiales. La superficie puede ser metálica o no metálica, lubricada o no lubricada.

En un tribosistema se involucran diferentes parámetros los cuales afectan directamente la fricción y el desgaste de los materiales. En la figura IV.1 se aprecian estas propiedades y son tratadas a continuación.

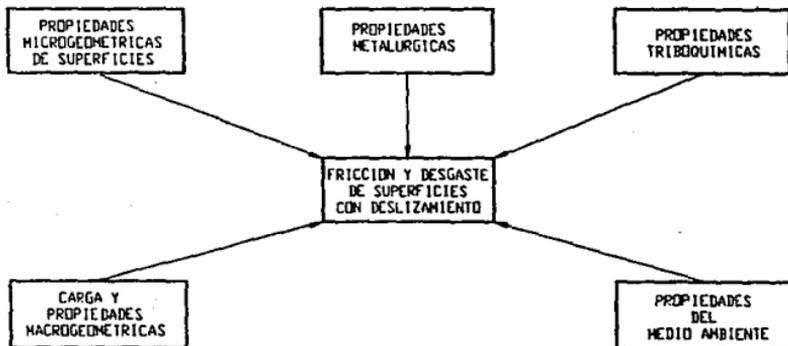


Figura IV.1.- Propiedades que afectan la fricción y el desgaste de materiales unidos en contacto con deslizamiento.

La superficie rugosa y la textura de la pieza, características que dependen del método de fabricación, corresponden a las propiedades microgeométricas del material. El tiempo de carga, la velocidad de deslizamiento, la vibración, la forma y las dimensiones de los sólidos en contacto corresponden a las propiedades

macrogeométricas. Las propiedades triboquímicas de la superficie la cuál absorbe átomos, la cantidad y el tipo de capa que se forma en la superficie (por ejemplo; óxidos o fosfatos), la reacción química y térmica y la conducción eléctrica no se consideran factores independientes de la propiedades del ambiente tal como lubricantes, humedad, temperatura, composición y presión parcial de los gases atmosféricos. Finalmente el desgaste por deslizamiento es afectado por las propiedades metalúrgicas de los materiales en contacto.

En el contacto con deslizamiento el desgaste puede ocurrir debido a la adhesión, fatiga de la superficie, reacción triboquímica y abrasión, muchos factores influyen para que se presente un mecanismo de desgaste en su forma más común, estos factores se presentan en forma arborescente en la figura IV.2.

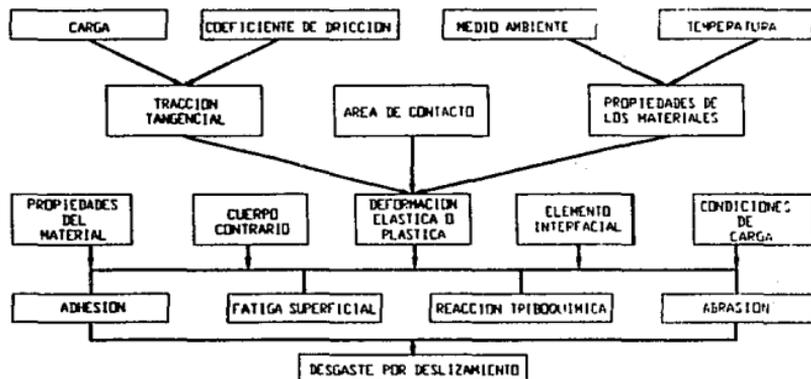


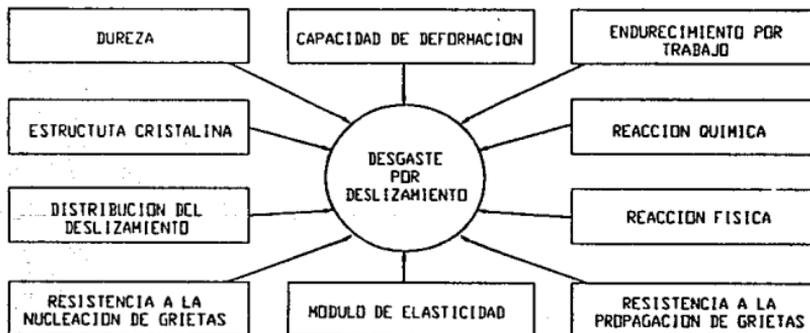
Figura IV.2.- Factores que influyen en los mecanismos de desgaste durante el contacto con deslizamiento.

El tipo de contacto que se presenta en los diferentes elementos tribológicos y la deformación elástica o plástica de los mismos están en función de la tracción tangencial de la superficie, del

Área de contacto y de las propiedades del material así como de la fuerza producida. Además, la forma de deformación, las propiedades de los cuerpos en contacto, el elemento interfacial y las condiciones de deslizamiento determinan los mecanismos de desgaste.

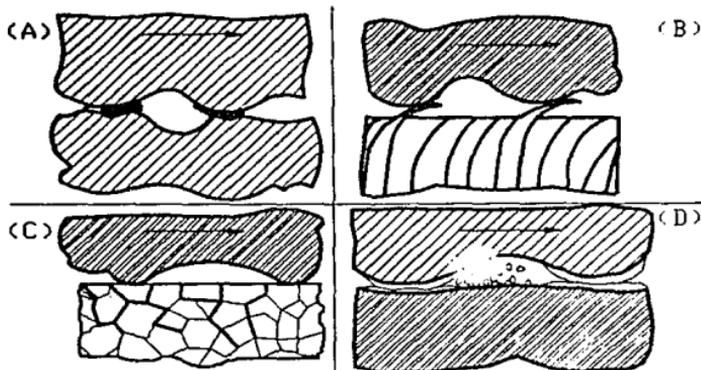
La adhesión que se presenta en las superficies acopladas y con movimiento se puede describir por muchos modelos diferentes, mientras que la fuerza de adhesión entre las mismas superficies dependen de todas las propiedades que se presentan en la figura IV.1.

El fenómeno de la adhesión es importante para entender la fuerza o la carga tangencial que se transfiere (fuerza de fricción) entre superficies muy lisas. Las fuerzas de la superficie que se involucran en el fenómeno de adhesión pueden ser efectivas solamente en distancias muy pequeñas, en el rango de 3 nm. de tal manera que el crecimiento del área real de contacto durante el deslizamiento aumenta la fuerza de adhesión. En la figura IV.3 se ven algunas propiedades de materiales que afectan al desgaste por deslizamiento. El efecto de cada propiedad de los materiales afecta al mecanismo de desgaste que se encuentra en proceso.



**Figura IV.3.- Propiedades metalúrgicas que influyen en el desgaste por deslizamiento.**

Los procesos físicos que ocurren durante el desgaste por deslizamiento se muestran en la figura IV.4.



**Figura IV.4.- Mecanismos de desgaste durante el contacto con deslizamiento: (a)Uniones de adhesión, material de transferencia y surcos, (b)Fatiga superficial debido a la repetición de la deformación plástica en metales dúctiles, (c)Agrietamiento por el resultado de la fatiga superficial en materiales frágiles y (d)Reacción triboquímica y agrietamiento de las capas de reacción.**

Los traslapes soldados son formados en uniones limpias debido a la adhesión, figura IV.4 a. Como un resultado del movimiento relativo, el material es separado o transferido de la superficie, en este material pueden incluirse surcos de asperezas suaves ya que la dureza del material de transferencia es muy elevada. La misma capa de partículas de desgaste se forma debido a la fatiga de la superficie del material más blando durante la deformación plástica ciclica que ejerce el cuerpo contrario más duro, figura IV.4 b. La tracción de la superficie en contacto con deslizamiento puede llevar al rompimiento del material frágil tal como se ve en los ceramicos figura IV.4 c. El rompimiento de la capa superficial formada por la

reacción triboquímica provoca partículas sueltas de desgaste, las cuáles pueden actuar en forma cortante si estas son más duras que el material base.

#### IV.1.- ADHESION.

La adhesión es el fenómeno que resulta de las fuerzas de atracción molecular entre dos superficies en contacto. La adhesión interfacial puede ser debida al enlace iónico, covalente, metálico, de hidrógeno y/o de Van der Waals. El enlace por adhesión se favorece por la deformación plástica y la limpieza de las superficies, este es el proceso por el cual las asperezas dan uniones adheridas, estas uniones sufren un cizallamiento plástico que lleva a la transferencia del material de una superficie a otra. Esta transferencia no produce partículas de desgaste en esa área, pero la porción del material transferido es removido en pasos subsiguientes.

La formación de uniones por adhesión entre las asperezas de dos superficies sólidas y limpias puede describirse por una estructura atómica. El contacto atómico entre las asperezas de dos superficies cristalinas se puede comparar con la forma de un ángulo alto de un límite de grano. La formación de átomos de una superficie depende de la energía mínima libre la cual se obtiene por la faceta de la estructura superficial. En el contacto estático, las vacancias son formadas en el área interfacial debido a la diferencia de orientación de la capa exterior de ambos materiales (figura IV.5a).

Los átomos en la interfase se encuentran relativamente muy separados, los cuales llevan poca fuerza de atracción entre las asperezas de contacto. Bajo la aplicación de carga algunos átomos pueden cambiar su posición (figura IV.5 b). Cuando existe una alta presión local y/o un movimiento relativo entre el contacto de las superficies se obtiene un nuevo arreglo de los átomos superficiales (figura IV.5 c). Este resultado da una reducción de la energía libre

de la interfase. La difusión puede ocurrir dependiendo de la temperatura de contacto y del material, incrementando sustancialmente la resistencia de la uniones formadas por la adhesión (figura IV.5 d).

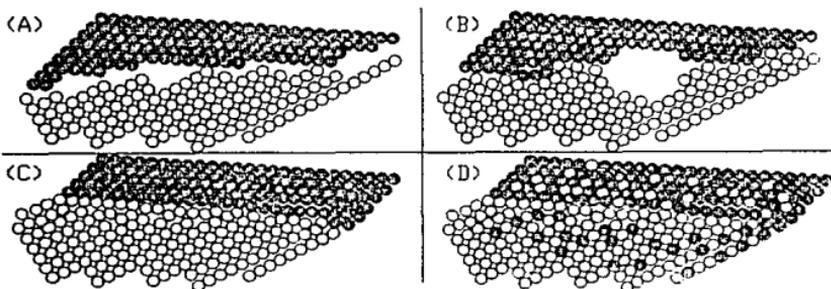


Figura IV.5.- Formación del modelo atómico de las uniones de adhesión entre las asperezas limpias estáticamente y durante el contacto con deslizamiento. (a) Contacto estático; poca carga, (b) contacto estático, media carga; (c) contacto con deslizamiento, carga alta y (d) similar a (c) pero sumándole la difusión mutua.

Se han propuesto muchas teorías para explicar la dependencia del mecanismo de adhesión de las propiedades físicas y químicas de superficies y/o bases metálicas.

Una aproximación a la fuerza de adhesión está basada en la ecuación de Dupre (1).

$$\gamma_{ad} = \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB} \quad (IV.1)$$

donde:  $\gamma_{ad}$  es el trabajo de adhesión .

$\gamma_A$ ,  $\gamma_B$  y  $\gamma_{AB}$  es la energía libre de la superficie de los materiales en contacto A,B y de la interfase AB, respectivamente.

El principal problema en aplicar cuantitativamente la ecuación IV.1, se originó del problema de no poder medir  $\gamma_A$ ,  $\gamma_B$  y  $\gamma_{AB}$ . En una aproximación muy burda el enlace covalente en metales sólidos tiene una energía en la superficie  $\gamma_A, \gamma_B$  de 1000 a 3000 mJ/m<sup>2</sup>. El enlace iónico en sólidos va de 100 a 500 mJ/m<sup>2</sup> y en materiales polímeros se encuentra abajo de 100 mJ/m<sup>2</sup>. La energía  $\gamma_{AB}$  depende de la estructura. En general una estructura amorfa tal como la de un vidrio exhibe una energía superficial más baja que la de una estructura cristalina, ya que los átomos pueden ponerse en orden más fácilmente a la posición de baja energía. El trabajo de adhesión en componentes no metálicos como Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> y FeO y Fe<sub>3</sub>C con metales puros y metales aleados están presentes en la figura 2.4.6 en función de la energía interfacial de los materiales en contacto.

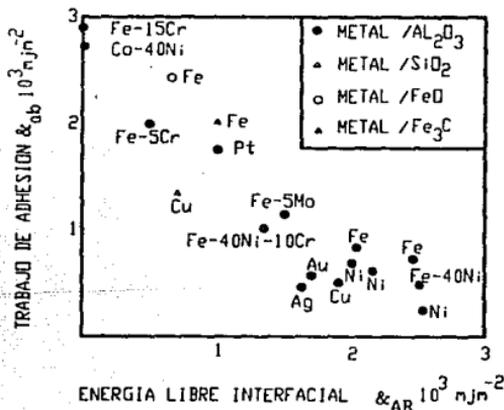


Figura IV.6.- Trabajo de adhesión contra la energía libre interfacial entre metales o aleaciones no metálicas.

La fuerza de adhesión se puede considerar como la fuerza interatómica con la cual el contacto de átomos adhiere cada parte a una interfase. La fuerza de tensión de los metales depende de las fuerzas interatómicas en la masa metálica, las mismas fuerzas pueden actuar a través de la interfase entre la superficie limpia del mismo material. La energía de enlace entre metal-metal y la energía de la superficie son también proporcionales al calor de sublimación del metal. Por lo tanto la fuerza de adhesión puede incrementarse con el aumento de la temperatura de volatilización o la temperatura de fusión. Frecuentemente la fuerzas de adhesión no son reportadas, pero en su lugar se utiliza el coeficiente de adhesión, el cual se define como la relación de la fuerza necesaria a la ruptura de las uniones de adhesión a la fuerza de la carga normal, con las cuál las muestras fueron inicialmente comprimidas.

El significado físico del coeficiente de adhesión  $f_A$  se puede explicar de la siguiente manera:

$$\text{Coeficiente de adhesión} = f_A = F_A / F_N \quad (\text{IV.2})$$

ó

$$f_A = (f_{ad}^* d_o n_A) / (d^2 F_N) \quad (\text{IV.3})$$

donde

$$F_N = H A_r \quad (\text{IV.4})$$

$$f_A = \frac{f_{ad}^* d_o n_A}{d^2 H A_r} = \sigma_{ad} / H \quad (\text{IV.5})$$

donde  $F_A$  y  $F_N$  son las fuerzas necesarias de ruptura de las uniones y la fuerza aplicada por la carga normal con la cual se forman las uniones, respectivamente.

$H$ ,  $A$ ,  $f_{ad}^*$  son la dureza de las asperezas que forman las uniones de adhesión, el área real de contacto y la fuerza de adhesión (energía/átomo) respectivamente.

$n_A$  representa el número de átomos en el área de contacto.

$d$  es la distancia interatómica normal efectiva a la interfase.

$d_0$  es la distancia de equilibrio de los átomos.

$\sigma_{ad}$  (fuerza/área) puede llamarse como la fuerza de adhesión de las uniones.

De acuerdo con Sikorski (1), el coeficiente de adhesión disminuye con el aumento de la dureza y depende de la estructura cristalina (ver figura IV.5). Los valores máximos del coeficiente de adhesión y de la dureza determinan que en el área de contacto existe un menor número de átomos  $n_A$  y por tanto una distancia interatómica mayor. Esto se debe a la baja deformación de las asperezas, todos estos efectos afectan a la fuerza de adhesión  $f_{ad}^*$ .

La fuerza de adhesión de las uniones se puede estimar aproximadamente por el trabajo de adhesión  $\gamma_{ad}$  (energía por área) y la ecuación IV.1.

$$\sigma_{ad} = \gamma_{ad} d_0 / d^2 \quad (IV.6)$$

Si la energía interfacial  $\gamma_{AD}$  tiende a cero el trabajo de adhesión  $\gamma_{ad}$  tiende a  $2\gamma_A$  para metales unidos, y por lo tanto:

$$\sigma_{ad} = 2\gamma_A d_0 / d^2 \quad (IV.7)$$

con  $\gamma_A = 1200 \text{ mJ/m}^2$  para metales.

$$d = 0.6 \text{ nm}$$

$$d_0 = 0.3 \text{ nm}$$

La máxima fuerza de adhesión de las uniones puede alcanzar teóricamente el valor de  $2000 \text{ N/mm}^2$ . El modelo sólo se puede usar

para entender cualitativamente la fuerza de adhesión o la tendencia a la adhesión. La principal desventaja del modelo se origina porque (i) los valores exactos de la superficie y la energía interfacial son desconocidos, y se relaciona en un complicado camino a métodos de fabricación, microestructura de materiales, efectos del medio ambiente, etc. (ii) Los efectos estructurales de la superficie no se incluyen fácilmente, por ejemplo; superficies rugosas, absorción de átomos, etc. y (iii) la influencia de las condiciones de carga, por ejemplo: presión en la superficie, velocidad de deslizamiento o duración de contacto, temperatura, etc. no son considerados.

En general todas las superficies y la energía interfacial que existe entre ellas son afectadas por las siguientes características:

- Medio ambiente,
- Temperatura,
- Absorción de átomos,
- Moléculas,
- Capa superficial y;
- Rugosidad superficial.

Generalmente, las superficies tienden a ser enriquecidas por aquellos constituyentes que tienen una energía superficial más baja. Se debe entender que la adhesión de superficies limpias es mayor que la adhesión de superficies contaminadas y también de superficies que han adsorbido oxígeno y sulfuro.

En general, la difusión de átomos en cuerpos sólidos depende de la solubilidad de los átomos que existen en la unión metálica. La difusión direccional es causada por el gradiente de concentración y el gradiente de temperatura, y puede ser debido también a un campo eléctrico o magnético. La difusión ocurre por la migración de átomos por una serie de saltos hechos al azar a través de la red cristalina. De aquí que la difusión aumente por los defectos cristalinos como vacancias, dislocaciones y tamaños de grano. Por lo tanto la solubilidad mutua no es una condición a priori de la alta

adherencia de los metales, y los pares incompatibles tales como Fe/Ag, Fe/Pb o Ag/Ni pueden adherirse más fuertemente que los pares compatibles bajo ciertas condiciones experimentales.

El coeficiente de fricción y el aumento del desgaste en el contacto con deslizamiento son de gran interés práctico. Una solución cuantitativa exacta para calcular estas cantidades no se puede suponer, porque las fuerzas dependen de las propiedades de un tribosistema particular. Sin embargo, los modelos cuantitativos proyectan el factor principal el cual influye en estas magnitudes y son muy importantes para combatir problemas de fricción y desgaste.

Acordando con la teoría de adhesión de Bowden y Tabor (1), el coeficiente de fricción  $\mu_{ad}$  está dado por:

$$\mu_{ad} = F / F_N = \tau_n / P_y \quad (IV.8)$$

donde:

f=fuerza de fricción.

$F_N$ =Carga normal, puede ser la suma de la carga externa y la fuerza de la superficie debido a la adhesión.

$P_y$ =Es el flujo de presión (aproximadamente equivalente a la dureza de la muesca H) del más blando de los materiales acoplados.

$\tau_n$ =Es el promedio del esfuerzo cortante de las uniones de adhesión o de la masa del material, depende de la localización del corte.

Para superficies rugosas el término  $\mu_{def}$  puede sumarse ya que representa los surcos de ambas superficies.  $\mu_{def}$  incluye la pérdida de energía durante el deslizamiento debido a la deformación plástica. Para muchos metales la presión de cedencia  $P_y$  se relaciona con el esfuerzo cortante  $\tau_n$  por:

$$P_y = 5\tau_n \quad (IV.9)$$

de las ecuaciones anteriores  $\mu_{ad} = 0.2$  que es el valor que se toma para muchos materiales.

Considerando que en general la superficie metálica está cubierta de una capa de óxido o lubricante entonces el área real de contacto metálico puede reducirse a:

$$\beta = A_r(\text{metálico})/A_r \quad (IV.10)$$

donde  $\beta$  define la relación del área real del contacto metálico al área real total de contacto; en este caso el coeficiente de fricción se puede estimar cualitativamente de la siguiente ecuación simplificada.

$$\mu = \frac{\tau_m}{P_y} \cdot \frac{b + \frac{(1-b) \cdot \tau_1}{\tau_m}}{b + \frac{(1-b) \cdot P_{y1}}{P_y}} \cdot \frac{(1 + \Delta A_r / A_r)}{(1 + \Delta P_y / P_y)} + \mu_{def} \quad (IV.11)$$

donde:  $\tau_1$  y  $P_{y1}$  son el esfuerzo cortante y el flujo de presión de la capa superficial (óxido o lubricante), respectivamente.

$\Delta A_r$  es el incremento del área real de contacto debido al deslizamiento.

$\Delta P_y$  es el incremento en el flujo de presión del metal debido al endurecimiento por trabajo.

Para un contacto puramente metálico  $\beta=1$  y el primer término de la ecuación anterior se reduce a la ecuación IV.8 tomando en cuenta el crecimiento del área debido al deslizamiento y al endurecimiento por el trabajo del metal. El otro extremo es cuando  $\beta=0$  por ejemplo ambas superficies metálicas están completamente separadas por una capa superficial, esto nos lleva a:

$$\mu = \tau / P_{y1} \quad (IV.12)$$

Para un lubricante como capa superficial, el término  $\mu_{def}$  puede volverse cero. Sin embargo, el coeficiente de fricción se determina solamente por las propiedades de la capa superficial, principalmente por la resistencia al corte de esta capa.

El trabajo de adhesión se puede presentar en otra ecuación la cual fué desarrollada por Robinobicz, Roy Chpwdhury y Pollock (1) esta ecuación nos dice:

$$\mu_{ad} = \frac{\tau_m}{P_y} \cdot \frac{1}{1 - (2\gamma_{ad} \cot\theta)/(P_y \cdot r)} \quad (IV.13)$$

donde:  $\tau_m$  y  $P_y$  son definidos por la ecuación IV.8.

$\gamma_{ad}$  es el trabajo de adhesión

$r$  es el promedio de las uniones o el radio de contacto y.

$\theta$  es el ángulo promedio de las rugosidades superficiales.

Cuando se presentan en la superficie las llamadas multiasperezas (debido al acabado de las áreas de contacto) se puede aplicar la siguiente ecuación.

$$\mu = \frac{\tau_m}{P_y} \left[ 1 - \frac{\gamma_{ad}^{-2}}{(P_y \cdot S)} \right]^{-1} \quad (IV.14)$$

donde:  $P_y$  es la dureza y,

$S$  es la desviación estandar de la altura de las asperezas.

La predicción principal de las ecuaciones IV.13 y IV.14 es que el coeficiente de fricción aumenta con el trabajo de adhesión disminuyendo las rugosidades superficiales.

Concluyendo, la ley principal para describir el desgaste debido a la adhesión en el contacto metálico con deslizamiento se conoce como:

$$\frac{W_v}{S} = K \frac{F_N}{H} \quad (IV.15)$$

donde:  $W_v$  es la pérdida de volumen debido al desgaste.

$S$  es la distancia de desplazamiento.

$F_N$  es la carga normal.

$H$  es la presión de cedencia o la dureza del material y,

$K$  es el coeficiente de desgaste.

$K$  expresa la probabilidad de la formación de partículas de desgaste.

El principal problema de la ecuación IV.15 surge al no conocer el valor del coeficiente de desgaste, el cual se puede determinar experimentalmente o en forma aproximada por la experiencia. Otro punto crítico es la dependencia del volumen de desgaste de la dureza del material desgastado. Se han obtenido muchos resultados experimentales los cuales dicen que el volumen de desgaste es independiente de la dureza relacionandolo en base a la ecuación IV.15. Esto supone que el coeficiente de desgaste puede estar en función de la dureza, dependiendo del tribosistema. Sin embargo esta ley del desgaste por adhesión puede ser considerada solamente como una descripción formal. Una versión modificada de la ecuación IV.15 la presenta Pollock en la cuál el coeficiente de desgaste está en función del trabajo de adhesión  $\gamma_{ad}$ , la desviación estandar de la altura de las asperezas  $S$ , la constante  $K^*$  y también de la dureza  $H$ :

$$K = \frac{K^*}{1 - \gamma_{ad} / (H \cdot S)} \quad (IV.16)$$

Esta última ecuación nos dice que el coeficiente de desgaste se incrementa si la superficie viene muy lisa y blanda debido a la acción térmica o mecánica durante el contacto con deslizamiento. De acuerdo con la experiencia práctica, una superficie perfectamente lisa o rectificada puede ser o no deseable en un sistema tribológico ya que puede ocasionar problemas por la adhesión.

## IV.2. FATIGA SUPERFICIAL.

La formación de partículas de desgaste que se presentan en contacto con deslizamiento de dos superficies metálicas puede ser descrito en seis pasos aplicando la teoría de la adhesión:

- 1.-Contacto con carga de asperezas sueltas en un par de superficies rugosas.
- 2.-Formación.
- 3.-Crecimiento.
- 4.-Falla de las uniones por adhesión.
- 5.-Movimiento del material en la superficie de contacto.
- 6.-Separación del material transferido, o parte de este, de la superficie sólida a las primeras partículas sueltas.

Se establece que la deformación plástica juega un papel importante en este proceso. Semejante al efecto que produce la estructura cristalina en la adhesión. Si el valor de la energía superficial es elevado entonces implica que tenemos una alta dureza y de aquí la baja deformación plástica. La carga que actúa en una área de contacto pequeña implica tener un coeficiente de fricción relativamente bajo; esto se presenta ya que con una energía superficial elevada también suscita una alta adhesión.

De acuerdo a la ecuación  $\mu = \mu_{ad} + \mu_{def}$  el coeficiente de fricción se determina por un término de adhesión y por un término debido a los surcos que interactúan entre las dos superficies ( $\mu_{def}$ ), este último puede dominar si las superficies son muy rugosas pero ambos términos cubren la energía disipada debido a la deformación plástica. Generalmente cuando se aplica carga a dos superficies en contacto con deslizamiento las asperezas de ambas superficies tienden a acoplarse, siendo deformadas plásticamente debido a las fuerzas de atracción por adhesión.

Rigney (1) ha desarrollado un modelo de fricción basado en la energía suponiendo que todo el trabajo por fricción es transferido a

una deformación plástica. Como el deslizamiento de un material duro en un material blando produce una alta deformación de la capa superficial. La carga puede ser transferida por adhesión, por embonamiento de las superficies u otro mecanismo de transferencia del deslizamiento a la superficie de tensión. El modelo perfeccionado de Rigney se presenta en la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{n \cdot A}{F_N} \cdot \tau_{\max} \cdot 1 - 2 \frac{\ln(1 + \tau_s / \tau_{\max}) - \tau_s / \tau_{\max}}{\ln 1 - (\tau_s / \tau_{\max})^2} \quad (\text{IV.17})$$

donde:  $\mu$ .-es el coeficiente de fricción.

$\tau_s$ .-es el esfuerzo real de la superficie.

$\tau_{\max}$ .-es el valor máximo de saturación del esfuerzo cortante cuando se somete a una carga prolongada.

$F_N$ .-es la carga normal.

$n$ .-es el número de asperezas que están en contacto.

$A$ .-es el promedio del área de contacto de asperezas sencillas.

Se puede hacer una primera aproximación para:

$$F_N / n \cdot A = H = \text{dureza de la muestra} \quad (\text{IV.18})$$

El esfuerzo superficial promedio  $\phi_s$  se calcula de la siguiente forma:

$$\phi_s = -(1/c) \ln 1 - (\tau_s / \tau_{\max})^2 \quad (\text{IV.19})$$

Y usando esta curva exponencial como el perfil de esfuerzo, el esfuerzo cortante  $\tau(z)$  en función de la profundidad abajo de la superficie es:

$$\tau(z) = \tau_{\max} \cdot 1 - (\tau_s / \tau_{\max})^2 \exp(-aiz) \cdot 1/2 \quad (\text{IV.20})$$

donde:  $a$  y  $c$  son constantes que dependen del tribosistema.

Durante el deslizamiento relativo de superficies en contacto, se forma una estructura de celdas alargadas desarrollada cerca de la superficie que está sometida a esfuerzo. La deformación plástica provoca un avance de rotación del enrejado cristalino, que continúa hasta que existe el deslizamiento.

El desgaste por deslizamiento en seco de los metales depende de las propiedades de la delgada capa superficial la cuál se forma generalmente de óxido, material de transferencia y material base, estas propiedades son función de los materiales de contacto, los parámetros de carga y las condiciones ambientales. La capa transferida y la formación de las partículas de desgaste se ha estudiado por diferentes herramientas analíticas. Los estudios en aleaciones de cobre han mostrado que la capa transferida es cristalina, y se puede formar antes que exista la pérdida de partículas. El resultado de la capa de transferencia que existe en el deslizamiento de dos materiales diferentes, consiste de una mezcla de cristales de ambas superficies. Las partículas de desgaste que se desprenden exhiben la misma estructura y composición de la capa transferida. Las partículas de desgaste se pueden formar por delaminación del material de transferencia.

En el caso del acero una capa de color blanco se puede producir durante el frotamiento de superficies en contacto. Esta capa muy dura y frágil es debida a la deformación plástica y esta a su vez se relaciona con rápidos ciclos de calentamiento y enfriamiento durante el frotamiento. La alta dureza se atribuye a partículas (carburos y óxidos) y a la dureza de la solución sólida. La matriz estructural está compuesta de martensita o martensita y austenita, debido a efectos del templeado.

En general, los principios de la mecánica de la fractura han sido aplicados al desgaste por deslizamiento. El mecanismo de la fractura elástica lineal (MFEL) se limita al crecimiento de grietas, acompañado por una deformación plástica muy pequeña.

La aplicación de la mecánica de la fractura elástica lineal al desgaste, es referida a materiales frágiles, en el cuál el crecimiento de grietas es acompañado solamente por una deformación elástica baja. Esto significa que los principios de MFEL se pueden aplicar a problemas de desgaste en cerámicos, metales muy duros como acero o metales cubiertos o revestidos con una capa superficial dura y frágil (TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, WC, etc.). El agrietamiento superficial en materiales frágiles es un fenómeno que se puede demostrar perfectamente en el contacto con deslizamiento en seco. En contraste a los datos estáticos o dinámicos en la fractura mecánica los cuales son altamente no homogéneos en un campo de esfuerzos en la zona subsuperficial de una superficie que se está desgastando, los cuales conducen a la disminución de la intensidad del factor de esfuerzo con un aumento de la longitud de las grietas perpendiculares a la dirección de deslizamiento de una corredera resistente. De ésta manera estas grietas se pueden parar con el aumento de la distancia normal al camino de deslizamiento. Estas grietas no son capaces de volverse inestables, pero ellas se propagan establemente o bajo una condición crítica.

En conclusión, la razón de desgaste de materiales frágiles se puede aumentar por la disminución de la resistencia a la fractura, si el valor crítico, para el inicio de la propagación de la grieta está excedido. La formación de grietas puede ocurrir por un contacto con deslizamiento simple o múltiple. Los principios de la mecánica de la fractura describen solamente la razón o la velocidad de propagación de grietas, pero no la iniciación de las mismas. Los parámetros microestructurales tales como inclusiones, límites de grano muy duro y frágil, etc., son capaces de favorecer la iniciación de grietas y su propagación.

Jahanmir y Suh (1) presentaron un análisis del campo de esfuerzos en la zona subsuperficial bajo condiciones de deslizamiento y superficies de contacto resistentes. Según este análisis, en la región subsuperficial existen dos tipos de deformación, la deformación plástica se presenta justamente adelante

del contacto de deslizamiento de las asperezas por el esfuerzo de compresión, mientras que existe deformación elástica atrás del contacto de las asperezas por el esfuerzo de tensión.

En tribosistemas prácticos interactúan mecanismos como la adhesión y la fatiga superficial, esta interacción se puede describir como sigue: durante el deslizamiento de superficie sólidas y rugosas, cada aspereza está en contacto continuo con la del otro material. Esto da por resultado una carga y una descarga cíclica de asperezas. Muchos surcos interactúan con asperezas de alta dureza ignorando por el momento la existencia de superficies blandas. Sin embargo, una aspereza simple se puede remover por adhesión y el corte de estas uniones provoca transferencia de material en la unión de las superficies, esto es consecuencia de la formación y propagación de grietas que finalmente resultan en la fatiga del material. Ambos procesos físicos ocurren simultáneamente. Una fuerte adhesión acompañada por la transferencia del material puede llevar a la separación del esfuerzo cíclico de la capa superficial antes de la aparición de grietas o el desarrollo de la falla por fatiga. El efecto en el desgaste por deslizamiento de la falla por fatiga de materiales frecuentemente se puede ocultar por otros procesos tales como una fuerte adhesión, reacción triboquímica los cuales producen partículas de desgaste.

#### IV.3. REACCION TRIBOQUIMICA.

El fenómeno de la formación de productos creados por una reacción triboquímica son bien conocidos en el contacto con deslizamiento de superficies metálicas. Como sabemos el desgaste severo es debido al contacto de metal-metal o contacto de materiales en los cuales se presenta adhesión, deformación plástica, formación de uniones y transferencia de material. El resultado de un desgaste severo es que la superficie metálica se hace rugosa y es del orden de 1 a 3 veces que el desgaste denominado poco severo. El desgaste poco severo durante el contacto con deslizamiento ocurre cuando las superficies están cubiertas por una capa de óxido o una capa

superficial producida por una cierta reacción triboquímica. dicha capa sólo se desarrolla en áreas de transporte de carga y su formación y estructura depende de la estructura de contacto debido al calentamiento por fricción.

El desgaste entre superficies preoxidadas o superficies oxidadas durante el deslizamiento puede ocurrir a bajas o a muy altas temperaturas. A alta temperatura ambiente la oxidación de las regiones distantes de las áreas de contacto pueden ser importantes.

El desgaste por deslizamiento está influenciado por diferentes parámetros como la carga, la velocidad de deslizamiento y las condiciones ambientales (temperatura, humedad, presión parcial de oxígeno, etc.). Dependiendo de estos parámetros el valor de la intensidad del desgaste puede variar en un orden de magnitud diferente. Se ha demostrado que la intensidad del desgaste de aceros en contacto con deslizamiento en seco puede ir de un desgaste poco severo (oxidación) a un desgaste severo (metálico) con el aumento de la carga. La representación esquemática se presenta en la figura IV.7.

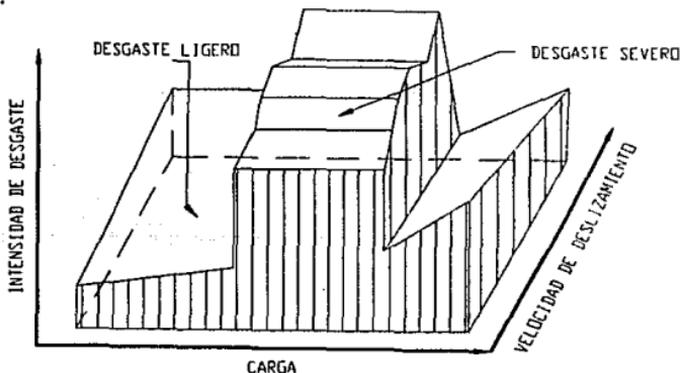


Figura IV.7. Intensidad del desgaste de aceros en contacto con deslizamiento en seco como función de la carga y de la velocidad de deslizamiento.

La transición del desgaste poco severo al desgaste severo que se ve en el diagrama de la figura IV.7 en forma de punta o pico es causado por el cambio de la estructura de los óxidos (a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , o  $\text{FeO}$ ) en la superficie de deslizamiento o por el rompimiento fuera de las capas protectoras de óxido. Al principio de una carga relativamente baja y a una cierta velocidad de deslizamiento en el desgaste poco severo se remueven los escombros de óxidos y se pasa a un desgaste severo cuando se acaba esta capa protectora de óxido, en esta transición la intensidad del desgaste aumenta linealmente si la carga también aumenta. Pasamos a una segunda transición la cuál se presenta en un instante dado de la carga esto es debido a la formación de nuevas capas de óxido las cuales se presentan por una alta temperatura de contacto.

La formación de las capas de óxido son sustancialmente aceleradas por el contacto con frotación y se pueden diferenciar con los óxidos de superficies metálicas expuestas a las condiciones ambientales. La cuantificación del desarrollo de óxidos durante el contacto con rozamiento aumenta con la humedad del medio ambiente. La influencia de óxidos en el desgaste y su representación se describen en la siguiente secuencia (figura IV.8).

En primera estancia se establece un área real de contacto y los pequeños núcleos de óxido se forman como manchas sencillas de el área real de contacto debido a la oxidación de todos los principales elementos mecánicos de las complicadas aleaciones. Las islas o mesetas de óxido se desarrollan y estas llevan la carga externa y son preferentemente oxidados por la alta temperatura de fricción. Estas mesetas crecen hasta un valor crítico y sobresalen al medio circundante. Posteriormente la capacidad de transportar carga de estas mesetas hace que el rango de espesor que se comprende entre 1-5  $\mu\text{m}$ . baje y se convierta en pequeños escombros debido al desgaste.

El espesor crítico de la capa de óxido depende principalmente del tipo de óxido que se forma, del material base que soporta este

óxido, de las condiciones de carga y de la temperatura, esta capa de óxido que se alcanza a formar en un determinado tiempo es removida casi inmediatamente por la frotación de las superficies metálicas formandose una capa nueva de óxido que sustituye al anterior. Los escombros o partículas de metal producidos cuando el contacto de las superficies metálicas es directo serán deformadas y fracturadas durante el deslizamiento, esto incrementa la superficie expuesta a las condiciones ambientales provocando la oxidación de estos incluso a bajas temperaturas. Los escombros de óxido que se desprenden de las superficies metálicas son cristales de tamaño microscópico, estos se aglomeran y se compactan también durante el rozamiento de las superficies. A esta capa se le llama capa vidriada, y se desarrolla con rapidez a elevadas temperaturas.

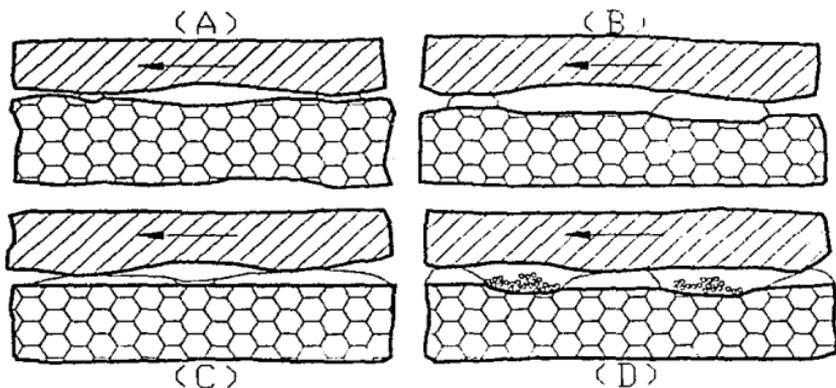


Figura IV.8.- Desgaste por reacción triboquímica, (a) formación de islas de óxidos igual que en (b), (c) crecimiento de islas de óxidos y (d) destrucción de las capas de óxidos y formación de nuevas capas.

Se ha desarrollado un modelo teórico que describe y representa el coeficiente de fricción entre superficies cubiertas por óxidos protectores en el contacto con deslizamiento. Este relaciona el coeficiente de fricción y el área de óxido compactado en términos de metales distintos (parámetros de óxido y de metal junto con el óxido). Quinn (1) desarrolló la ecuación para estimar el desgaste en la región de oxidación y se presenta a continuación.

$$W_v/S = d' A_p \exp(-Q/RT_c) / c_c^2 \rho_0^2 r_0^2 v A_r \quad (\text{IV.27})$$

Lo que se encuentra entre llaves representa el coeficiente de desgaste por oxidación.

Donde  $A_r$ .-es el área real de contacto

$c_c$ .-es es espesor crítico de la capa de óxido.

$T_c$ .-es la temperatura de contacto.

$A_p$ .-es la constante de Arrhenius

$Q_p$ .-es la energía de activación para una oxidación parabólica.

$\rho_0$ .-es la densidad del óxido en el área de contacto.

$f_0$ .-es la fracción de masa del óxido en contacto con  $O_2$ .

$v$ .-es la velocidad de deslizamiento.

$R$ .-es la constante molar de los gases.

$d'$ .-es la distancia de deslizamiento.

El principal problema para utilizar esta ecuación es que se determinen correctamente  $d'$ ,  $c$  y  $T_0$  o que los parámetros de oxidación se tomen indebidamente  $A_p$  y  $Q_p$ . El área real de contacto se determina de:

$$A_r = F_N / H \quad (\text{IV.28})$$

donde  $F_N$ .-es la carga normal aplicada.

$H$ .-es la dureza del metal abajo de la capa de óxido.

Un modo especial del desgaste por reacción triboquímica es llamado **FRETTING**. Se caracteriza por el movimiento oscilatorio, particularmente de pequeñas amplitudes de dislocaciones menores que 100  $\mu\text{m}$ . Las pequeñas amplitudes resultan de bajas velocidades relativas de deslizamiento del orden de 1 mm por segundo. El avance por fretting a la formación de grandes cubiertas de óxido en metales nobles reduce el contacto metal-metal, después alcanzando un estado estable del desgaste por fretting se produce una pérdida de material causada por otro proceso de desgaste que se llama desgaste por delaminación en el cuál delgadas capas de óxido vuelven a separarse de la superficie metálica por la propagación de grietas subsuperficiales. La iniciación y propagación de las grietas por fatiga son suspendidas cuando el material vuelve a perder la capa predominante. El fretting puede continuar destruyendo la capa superficial hasta que descubra un metal reactivo en materiales resistentes a la corrosión. Se ha visto en resultados resientes que el daño debido al contacto por fretting puede ocurrir con amplitudes extremadamente pequeñas del orden de 0.5  $\mu\text{m}$ . este es el mejor valor de las amplitudes para que pueda ocurrir el desgaste por fretting. Este valor está en función de las propiedades de los materiales en contacto así como de la carga y de las condiciones ambientales.

La teoría de la atracción molecular de Tomlinson puede emplearse para explicar parcialmente el desprendimiento de las partículas de la superficie que se encuentran en contacto. Aunque en éste tipo de desgaste, las primeras partículas de material nuevo que se desprenden de las superficies son de dimensiones superiores a las moléculas, (25 diezmilésimas de mm). Han surgido dificultades en cojinetes de bolas, antenas de radar, juntas universales, amortiguadores de vibración de péndulo etc. También se presenta en maquinaria pesada que está parada durante algún tiempo, por el efecto de una ligera condición vibratoria del suelo en que se asienta.

El proceso de arranque de material se presenta como sigue:

- 1.- Producción de partículas diminutas de material nuevo.
- 2.- Oxidación de este material finamente dividido para formar, generalmente, un material duro abrasivo.
- 3.- Abrasión subsiguiente (lo más común).

Se concluye así que la corrosión por fretting disminuye suprimiendo las vibraciones o reduciendo la amplitud del deslizamiento; condicionando la carga hacia los ajustes más apretados o uniendo a la superficie un material, tal como el caucho que tiene un límite de elasticidad elevado y por aplicación de lubricantes.

## V EVALUACION DE LAS PROPIEDADES FRICCIONALES DE LOS MATERIALES

Las pruebas de desgaste y fricción bajo condiciones experimentales, son efectuadas con reducción del tiempo en la vida útil del material. Estas pruebas se usan para clasificar el orden de resistencia al desgaste y fricción, con el fin de optimizar la selección adecuada e impulsar así el desarrollo de nuevos materiales para aplicaciones específicas.

Dichas pruebas deben simular exactamente las condiciones de operación a la cual estarán sujetos la pareja de materiales. Si ésta simulación es apropiada, un factor de aceleración puede ser determinado empíricamente, minimizando así los errores.

Estandarización, repetibilidad, tiempo corto de prueba, técnicas de clasificación y medidas simples son deseables en éstas pruebas. Este capítulo describe la metodología de diseño y las pruebas geométricas típicas de fricción y desgaste.

### V.1 METODOLOGIA DE DISEÑO

La metodología de diseño de pruebas de fricción y desgaste consiste de cuatro elementos básicos: simulación, aceleración, preparación de las muestras y la medición de fricción y desgaste.

#### Simulación

Una simulación adecuada asegura que el experimento sea idéntico para al sistema. Debido a la complejidad del estudio del desgaste y el entendimiento incompleto de los mecanismos de desgaste, la prueba desarrollada está sujeta a prueba y error, y ésta depende de las capacidades del investigador.

El punto de inicio en la simulación, es la reunión de datos útiles sobre el sistema actual y el sistema de prueba. Una simulación eficiente requiere una relación idónea entre las funciones del sistema a simular y del sistema de prueba, esto

es, relacion entrada-salida.

Para obtener ésta similitud, deben tomarse en cuenta los materiales asociados, el lubricante y que las condiciones de operación de la prueba sean las mismas que requiere el sistema que se desea simular (medio ambiente). La selección de la prueba geométrica es un factor crítico en las condiciones de simulación de desgaste. Generalmente, en el laboratorio son pruebas para contactos por deslizamiento, tres tipos de contactos son empleados: contacto puntual (tal como una bola sobre un disco), contacto lineal (tal como un cilindro sobre un disco) y contacto debido al conformado (conforming contact) (tal como placa sobre placa). La selección del arreglo geométrico depende de la función a ser simulada por la prueba. Cada una de éstas geometrías de contacto tienen sus ventajas y desventajas. En el caso de contacto puntual se eliminan los problemas de alineamiento y permite el estudio de los estados iniciales de desgaste de la prueba. Sin embargo, los esfuerzos de nivel cambian conforme las superficies en contacto se desgastan (wear-out). Las pruebas de contacto debido al conformado generalmente permiten que en las piezas en contacto para desgaste (wear-in), se pueda establecer geometrías de contacto uniformes y estables antes de tomar datos. Como resultado, es difícil de identificar el fenómeno de wear-in, porque no se efectúa un monitoreo constante del ambiente de desgaste.

Otros factores además del tipo de contacto, el cual influyen significativamente en el éxito de una simulación, son el tipo de movimiento, carga, velocidad, ambiente de operación (contaminación, lubricación, temperatura y humedad). El tipo de movimiento que existe en el sistema actual es uno de los cuatro tipos básicos: (deslizamiento, rolado, giro e impacto). Estos movimientos simulados para la ejecución de pruebas de desgaste son efectuados bajo movimientos y combinaciones unidireccionales, recíprocantes y oscilantes (recíprocantes con una frecuencia alta y amplitud baja). Las condiciones de carga son simuladas por la aplicación de carga estática y dinámica por peso muerto, resortes, medios hidráulicos, o

medios electromagnéticos.

La lubricación (o carencia de la misma), temperatura, y humedad también influyen considerablemente en las características de fricción y desgaste de ciertos materiales. La temperatura ambiente y la temperatura de contacto determina el estado térmico del sistema y podría ser simulado con una precisión controlada durante la prueba. Mediciones superficiales de una muestra pueden ser hechas con termopares o métodos infrarrojos (IR).

#### **ACELERACION**

Las pruebas aceleradas son extremadamente baratas y rápidas. Sin embargo, si la aceleración no es efectuada adecuadamente, el mecanismo de desgaste a ser simulado puede cambiar. El desgaste acelerado es normalmente conseguido por el incremento de los siguientes parámetros: carga, velocidad, temperatura y operación continua.

#### **PREPARACION DE LAS MUESTRAS**

La preparación de las muestras juega un papel clave en la obtención de resultados reproducibles. Sin embargo, la preparación de muestras puede variar dependiendo sobre el tipo de material a ensayar. Para metales, la rugosidad superficial, la geometría de la muestra, microestructura, homogeneidad, dureza, y la presencia de capas superficiales puede ser controlada cuidadosamente para la pareja de materiales. Controles similares son necesarios para el medio desgaste-causa. Por ejemplo, en una prueba de desgaste abrasivo, la pureza, el tamaño de las partículas, la forma de la partícula y el contenido de humedad de la arena deben ser controlados.

## MEDICION DE FRICION Y DESGASTE

El coeficiente de fricción es calculado apartir del radio de la fuerza de fricción para una fuerza normal aplicada. Los miembros estacionarios del par de materiales es montada sobre un miembro flexible, y la fuerza friccional (fuerza requerida para esforzar el miembro estacionario) es medido usando el calibrador de esfuerzo (strain gauges) (conocido como transductor calibrador-esfuerzo) o medidas de desplazamiento (basados sobre la capacitancia y métodos ópticos). Bajo ciertas condiciones, transductores de fuerza piezométricos (principalmente para mediciones dinámicas) son también usados para mediciones de fuerza-fricción.

Las mediciones comunes de desgaste son pérdida de peso, pérdida de volumen, espesor o profundidad de las rayaduras ocasionadas por el desplazamiento, u otras medidas geométricas y medidas indirectas tales como el tiempo requerido para desgastar a través de un recubrimiento o la carga requerida para causar desgaste severo o un cambio en la superficie final. La exploración con el microscopio electrónico (SEM) se utiliza para medir el desgaste microscópico de superficies desgastadas. Otras técnicas usadas serian: daño radiactivo y la búsqueda del desgaste a escala atómica por túnel microscópico (STM). Las resoluciones de las diversas técnicas son presentadas en la tabla V.1 (12)

*Tabla V-1 Técnicas de medida de desgaste y sus resoluciones*

Técnica de medida	Resolución
Pérdida de peso	10 - 100 $\mu$ m
Destrucción radiactiva	- 1 $\mu$ m
Tipo de perfil	25 - 50 $\eta$ m
Indentación por microdureza	25 - 50 $\eta$ m
Perfil óptico	0.5 - 2 $\eta$ m
Busqueda por microscopio electrónico	0.1 $\eta$ m
Busqueda por túnel microscópico	0.02 - 0.05 $\eta$ m

Las mediciones de pérdida de peso son convenientes para grandes cantidades de desgaste. Sin embargo, las mediciones de pérdida de peso tienen dos grandes limitaciones. Primero, el desgaste está relacionado en primer lugar al volumen de material removido o desplazado. De este modo tales métodos pueden proveer resultados diferentes si los materiales a ser comparados difieren en densidad. Segundo, estas mediciones no hacen la consideración para desgaste por desplazamiento del material; esto es, una muestra puede ganar peso por transferencia. De este modo las mediciones de pérdida de peso son válidas únicamente cuando la densidad permanece constante y la transferencia no ocurre durante los procesos de desgaste. Esta técnica no es suficientemente sensible en el caso de desgaste-resistencia de recubrimientos delgados, donde el desgaste es muy pequeño.

Un estilo o perfil óptico sin contacto y técnicas de indentación de microdureza Vickers o Knoop son fáciles de usar y se utilizan para medir la profundidad de desgaste con una resolución por arriba a una fracción de un nanómetro. Un ejemplo del perfil de una huella de desgaste obtenida por medidas de rugosidad superficial es mostrada en la figura V.1.

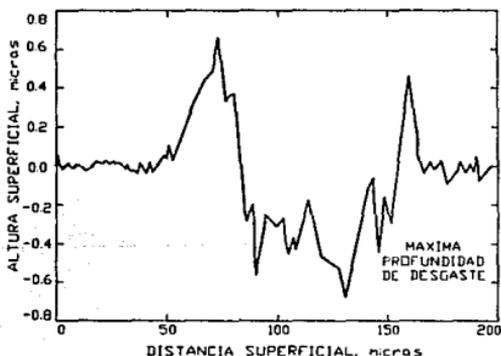


Figura V.1 Rugosidad de una huella de desgaste

En la técnica de indentación por microdureza, las indentaciones Vickers o Knoop son hechas sobre la superficie a desgastar. La profundidad de desgaste puede ser calculada por la medición del ancho de las indentaciones antes y después de la prueba de

## V.2 PRUEBAS GEOMETRICAS TIPICAS

Las propiedades friccionales de parejas que involucran deslizamiento pueden ser evaluadas en equipo de laboratorio, los cuales pueden ser clasificados dentro de dos clases, esto es, clase I, donde el movimiento relativo de los miembros es unidireccional, y clase II, en el cual los miembros son recíprocos.

Cada clase puede ser dividida dentro de dos grupos, esto es, (1) Máquina de acabado por fricción, y (2) Máquinas de fricción por contacto a lo largo de una generatriz. Cada uno de estos grupos puede ser dividido dentro de dos subgrupos de acuerdo con el coeficiente de traslape (overlap) mutuo  $K_{\mu}^+$  : (a)  $K_{\mu} \rightarrow 1$ ; (b)  $K_{\mu} \rightarrow 0$ , tabla V.2 (1).

El coeficiente de traslape (overlap) es la relación de las áreas de superficie de fricción más pequeñas a lo largo de dos cuerpos rugosos.

Se tienen diferentes tipos de máquinas, debido a la necesidad de simular los diferentes tipos de daños de las superficies deslizantes y los efectos de los factores individuales que pueden ser causados especialmente por procesos fisicoquímicos. La naturaleza de los daños difiere ampliamente entre el movimiento unidireccional y recíproco.

TABLA V.2 Clasificación de los arreglos para pruebas de fricción en materiales

K	DESPLAZAMIENTO RELATIVO			
	DIRECCION SIMPLE		CAMBIO DE MOVIMIENTO	
	CONTACTO PRIMARIO			
	CONTACTO POR AREA	CONTACTO POR PUNTO EXTENDIDO	CONTACTO POR AREA	CONTACTO POR PUNTO EXTENDIDO
0.5(K <sub>1</sub> <= 1)				
0(K <sub>1</sub> < 0.5)				

Los materiales usados en contactos con fricción pueden ser evaluados por tres métodos, esto es, por medio de sus características geométricas, físicas y mecánicas. Las características de los sólidos pueden ser evaluadas por pruebas sobre sistemas de contacto montados sobre anillos y por pruebas a escala completa. La relación mutua entre los resultados obtenidos con pruebas de este tipo, no están exentas de sufrir errores.

Esto se debe a la característica del deslizamiento, es decir, la formación de una tercera fase en la zona de contacto, la naturaleza y propiedades de la cual dependen las superficies en contacto, la extensión de acceso del medio ambiente dentro de la zona de contacto, y la temperatura de contacto producida.

Estos factores son importantes en la evaluación de las propiedades de rugosidad de los materiales, las cuales se pueden evaluar por el estudio de la interacción de contacto de dos sólidos en la presencia del medio usado, complicando la evaluación de laboratorio. Debido a esto, durante las dos últimas décadas un gran número de métodos de evaluación de la fricción y desgaste han sido desarrollados, los cuales muestran la conexión entre las características experimentales de sólidos, el medio de lubricación y el coeficiente de fricción, y también la resistencia al desgaste cuando estos cuerpos interactúan. Las características de las propiedades de rugosidad de los materiales obtenidas por estos métodos, pueden ser aplicados a relaciones teóricas para la evaluación de los procesos de fricción y desgaste en estados progresivos.

## V.2.1 FRICCIÓN DESLIZANTE Y PRUEBAS DE DESGASTE

Diversos equipos permiten el control de factores tales como la geometría, la carga aplicada, velocidad de deslizamiento, la temperatura ambiente, y la humedad. Las pruebas utilizadas en la interfase geométrica para cubrir materiales, recubrimientos, y tratamientos superficiales se muestran en las figuras V.2(a) a V.2(h) y son comparados en la tabla V.3.

Tabla V-3 DETALLES GEOMETRICOS DE PRUEBAS TÍPICAS DE FRICCIÓN Y DESGASTE

GEOMETRIA	TIPO DE CONTACTO	TIPO DE CARGA	TIPO DE MOVIMIENTO
1. PROBETA SOBRE DISCO	PUNTO/CONFORMADO	ESTÁTICA, DINÁMICA	DESPLAZAMIENTO UNIDIRECCIONAL OSCILANTE
2. PROBETA SOBRE PLACA (RECIPROCANTE)	PUNTO/CONFORMADO	ESTÁTICA, DINÁMICA	DESPLAZAMIENTO RECIPROCANTE
3. PROBETA SOBRE CILINDRO	PUNTO/CONFORMADO	ESTÁTICA, DINÁMICA	DESPLAZAMIENTO UNIDIRECCIONAL OSCILANTE
4. CILINDROS (CON CARGA EN LAS CARAS)	CONFORMADO	ESTÁTICA, DINÁMICA	DESPLAZAMIENTO UNIDIRECCIONAL OSCILANTE
5. PROBETA DENTRO DENTRO DE UN DADO	CONFORMADO	ESTÁTICA, DINÁMICA	DESPLAZAMIENTO UNIDIRECCIONAL OSCILANTE
6. PLACAS SOBRE UN CILINDRO (CARGA EN EL BORDE)	LÍNEA	ESTÁTICA, DINÁMICA	DESPLAZAMIENTO UNIDIRECCIONAL OSCILANTE
7. CILINDROS CRUZADOS	ELIPTICA	ESTÁTICA, DINÁMICA	DESPLAZAMIENTO UNIDIRECCIONAL OSCILANTE
8. CUATRO ESFERAS	PUNTO	ESTÁTICA, DINÁMICA	DESPLAZAMIENTO UNIDIRECCIONAL

A continuación se hace una descripción breve de las pruebas geométricas típicas ilustradas en la figura V.2(a - h) y se hace una comparación en la tabla V.3. Cargas estáticas o dinámicas pueden ser aplicadas en cualquiera de estas pruebas.

### Espiga sobre un disco (carga superficial)

En la figura V.2(a) se muestra la espiga que es retenida estacionariamente, en la cual el disco tiene un movimiento de rotación u oscilatorio. La espiga puede ser una esfera sin rotación, una placa terminada en forma cilíndrica, o también un paralelepípedo rectangular con un extremo semiesférico. Este aparato de prueba es probablemente el más utilizado para aplicaciones tribológicas.

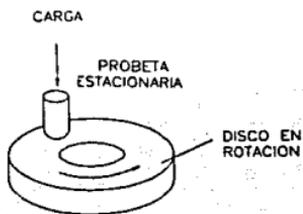


Figura V.2 (a)

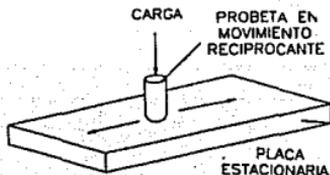


Figura V.2 (b)

### Espiga sobre una placa (movimiento recíprocante)

En este dispositivo de prueba figura V.2(b), una placa tiene un movimiento recíprocante, relativo a una espiga estacionaria. En algunos casos, la placa es estacionaria y la espiga recíprocante. La espiga puede ser una esfera, una espiga punteaguda en forma esférica o una placa finalizada en forma cilíndrica. Usando oscilaciones de amplitud baja a frecuencia alta, se pueden efectuar experimentos de desgaste por fretting.

### Espiga sobre un cilindro (cargado por la orilla)

Este dispositivo se muestra en la figura V.2(c), éste es similar al aparato de espiga sobre disco, excepto que la carga de la espiga es perpendicular al eje de rotación u oscilación. La espiga puede ser plana o afilada esféricamente.

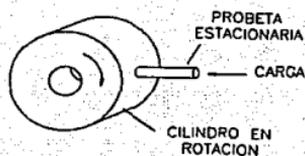


Figura V.2 (c)

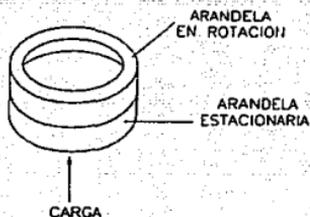


Figura V.2 (d)

### Thrust washer (pieza de sujecion empuje con carga superficial)

La placa superficial de la pieza de sujeción (disco o cilindro) rota u oscila sobre una superficie plana de una pieza de sujeción estacionaria. Las probetas son cargadas superficialmente debido a que la carga aplicada es paralela al eje de rotación. La pieza de sujeción puede ser sólida o anular. Esta configuración es la más común para pruebas de materiales sometidos a esfuerzos bajos, figura V.2(d).

### Probetas dentro de dados (cargados en el borde)

En este dispositivo figura V.2(e) se usa una fuerza axial la cual es necesaria para presionar una probeta con dimensiones ligeramente mayores que las del dado. La fuerza normal (axial) actúa en dirección radial y tiende a expandir el dado; la fuerza radial puede ser calculada a partir de las propiedades del material, de la interfase y del cambio en el diámetro exterior del dado. El coeficiente de fricción se obtiene dividiendo la fuerza axial por la fuerza radial.

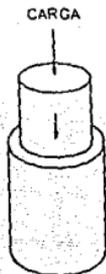


Figura V.2(e)

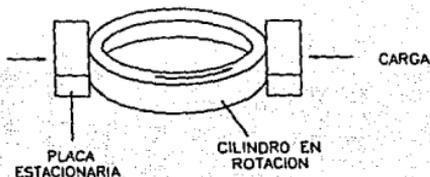


Figura V.2(f)

Placas rectangulares sobre un cilindro en rotación (Carga en el borde).

Las dos placas rectangulares reciben una carga perpendicular al eje de rotación u oscilación del disco, en algunos dispositivos solamente una placa es presionada contra el cilindro. En el dispositivo Falax, una probeta en rotación es aprisionada entre dos bloques en forma de V (en lugar de placas) de ésta forma se obtienen cuatro líneas de contacto con la probeta. figura V.2(f)

### Cilindros cruzados

El aparato de prueba de cilindros cruzados, figura V.2(g), consiste de un canal (enfriado por agua) o un cilindro sólido como el miembro de desgaste estacionario y un cilindro sólido en rotación u oscilante que opere a  $90^{\circ}$  del miembro estacionario.

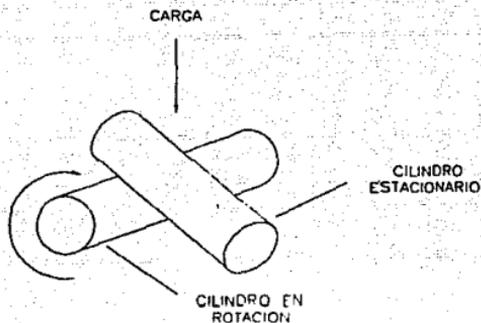


Figura V.2(g)

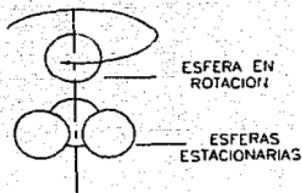


Figura V.2(h)

### Aparato de prueba de cuatro esferas

Este dispositivo consiste de cuatro esferas en la configuración de un tetraedro equilátero figura V.2(h). La esfera superior tiene un movimiento de rotación, manteniéndose en contacto con las tres esferas inferiores, las cuales son mantenidas en una posición fija.

## V.3 PRUEBAS DE ABRASION

Las pruebas de abrasión incluyen pruebas de dos o tres cuerpos, en la cual uno de los miembros está en movimiento, el medio abrasivo. En una prueba de abrasión de tres cuerpos, partículas abrasivas son introducidas a la interfase. Pruebas abrasivas son llevadas a cabo usando cualquiera de las pruebas geométricas convencionales, con una de las superficies hechas de un material abrasivo o en presencia de partículas abrasivas.

### Prueba de abrasión Taber

La prueba Taber es ampliamente usada para determinar la resistencia a la abrasión de varios materiales y recubrimientos. Probetas de prueba (típicamente  $100 \text{ mm}^2$  o  $110 \text{ mm}$  en diámetro) son colocadas sobre el portaprobetas en rotación, figura V.3, sujetos a la acción friccionante de un par de ruedas abrasivas en rotación a pesos conocidos (250, 500, 1000 gr). Cuando el par de ruedas abrasivas inician su movimiento de rotación en dirección opuesta, inician su efecto abrasivo al viajar sobre el material por encima de un eje horizontal desplazado tangencialmente desde el eje del material de prueba, teniendo una acción deslizando.

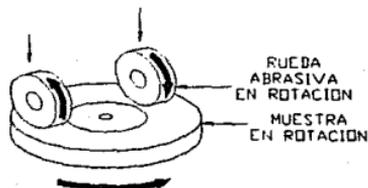


Figura V.3 Prueba de abrasión Taber

Los resultados son evaluados por cuatro métodos diferentes; punto final o colapso general del material, comparación por pérdida de peso entre materiales de misma gravedad específica y medición de la profundidad de desgaste.

Esta prueba provee una técnica de conducción comparativa para evaluaciones de funcionamiento al desgaste con una precisión de  $\pm 15\%$ .

#### Prueba abrasiva por cinta

Un bloque terminado en forma de placa o probeta cilíndrica es desgastada por deslizamiento contra una cinta abrasiva, figura V.4.

La cinta tiene un recorrido horizontal, en el cual la probeta corre transversalmente a través de la cinta. Una variación sería si la probeta tiene una rotación durante la prueba de abrasión.

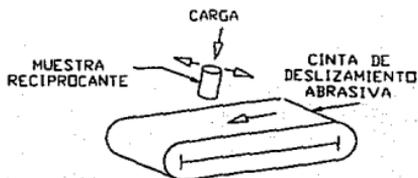


Figura V.4

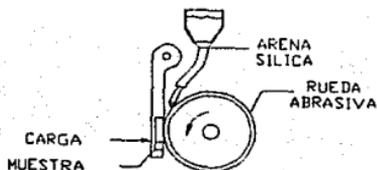


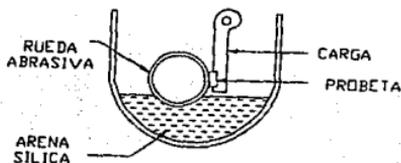
Figura V.5

#### Prueba de abrasión en seco

Los aparatos de prueba de abrasión (ASTM G65) con arena seca o por rueda abrasiva, se muestra en la figura V.5, en donde se observa que la probeta se presiona contra la rueda abrasiva en rotación. La carga es aplicada a lo largo de la línea de diámetro horizontal de la rueda, mientras que el abrasivo es alimentado por gravedad a través del bloque simple y la rueda, los cuales forman una entrada en V. El tipo de probetas usadas permiten evaluar la pérdida de peso.

### Prueba de abrasión de arena húmeda

El aparato de abrasión por arena húmeda, también conocida como prueba SAE rueda-abrasiva arena-húmeda, es mostrada en la figura V.6; la probeta es presionada contra la rueda abrasiva. Este aparato consta de un anillo rugoso de neopreno sobre un acero que rota a través de arena silíca. La rueda tiene canaletes sobre cada lado para agitar la solución conforme ésta rota. La arena es transportada por la rugosidad de la rueda a la interfase entre ésta y la probeta de prueba. La solución consiste de 940 g de agua y 1500 gr. de AFS 50 a 70 mallas de la prueba de arena. Evaluando el desgaste a partir de la pérdida de peso.



PRUEBA DE ABRASION POR  
ARENA HUMEDA (PRUEBA SAE  
RUEDA ABRASIVA ARENA-HUMEDA)

Figura V.6 Prueba de abrasión por arena húmeda

## V.4 PRUEBAS DE FATIGA

Un número de pruebas de fatiga por contacto por rolado permiten probar materiales y lubricantes que tendrán aplicaciones en cojinetes y engranes.

### Prueba de disco sobre disco

El dispositivo usado se muestra en la figura V.7, usa dos discos o una esfera sobre un disco en rotación, uno contra otro, sobre sus superficies exteriores (carga en el borde). El disco puede ser con una cima o plano. Usualmente, la rotación simple se efectúa a diferentes velocidades para producir algún deslizamiento relativo a la interfase.

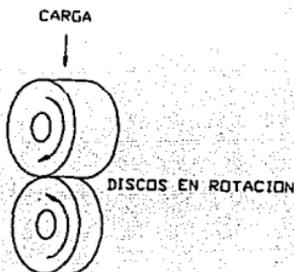


Figura V.7

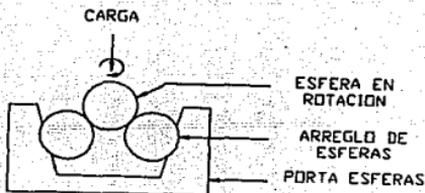


Figura V.8

### Rotacion en cuatro esferas

Este dispositivo se muestra en la figura V.8, consta de cuatro esferas en la configuración de un tetraedro equilátero. La esfera superior tiene un movimiento rotacional y además soporta una carga contra las tres esferas de soporte. (posicionadas a  $120^{\circ}$ )

### Elemento de rolado sobre placa.

El dispositivo de rolado sobre una placa, esta compuesto de tres esferas a igual espaciamiento por un retenedor, los cuales están cargados entre una placa estacionaria de arrastre y un arrastrador con surcos en rotación, figura V.9 . El arrastrador en rotación produce un movimiento de bola y sirve para transmitir la carga a las esferas y a la placa de arrastre.

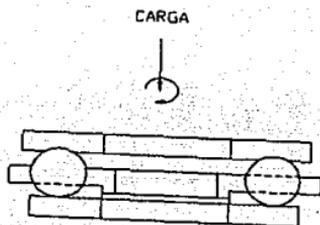


Figura V.9

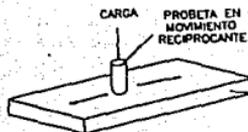


Figura V.10

### Prueba de abrasión por banda

Una probeta cilíndrica es desgastada por deslizamiento contra una cinta abrasiva, figura V.10. La cinta corre horizontalmente, mientras la probeta corre transversalmente a través de la cinta. La probeta también puede tener un movimiento de rotación durante la prueba.

## V.V METODOS PARA DETERMINAR LAS CARACTERISTICAS DE LA MICROGEOMETRIA SUPERFICIAL

Las superficies ingenieriles estan lejos de ser idealmente lisas, y exhiben más o menos rugosidades. Las características de textura de las superficies son descritas por el arreglo, forma y tamaño de elementos individuales, tales como asperezas (crestas y valles sobre una escala microscópica). La figura V-11 muestra esquemáticamente una topografía superficial. Los perfiles de las superficies pueden ser obtenidas por secciones verticales a través de la superficie y secciones horizontales las cuales nos muestran que el contacto entre sólidos es generalmente discreto, debido a la rugosidad de la superficies, es decir, esto ocurre en puntos de contacto de áreas individuales.

FIG. 11

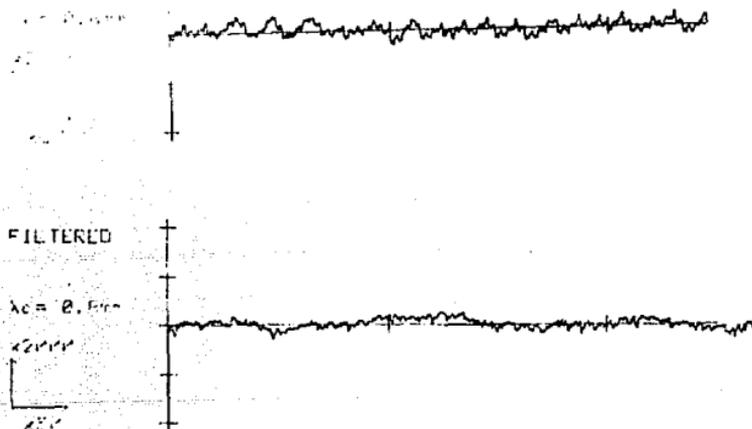


FIGURA V.11 Representación esquemática de irregularidades superficiales

Diferentes métodos ópticos y mecánicos están disponibles para efectuar la medición de las geometrías microscópicas o macroscópicas más notables de las superficies, como la rugosidad superficial, la cual está formada por microrelieves. El método más usado para obtener esta información a través de un analizador de superficies, figura V.12; en él, mecanismos de punzón son usados para obtener perfiles de la superficie.

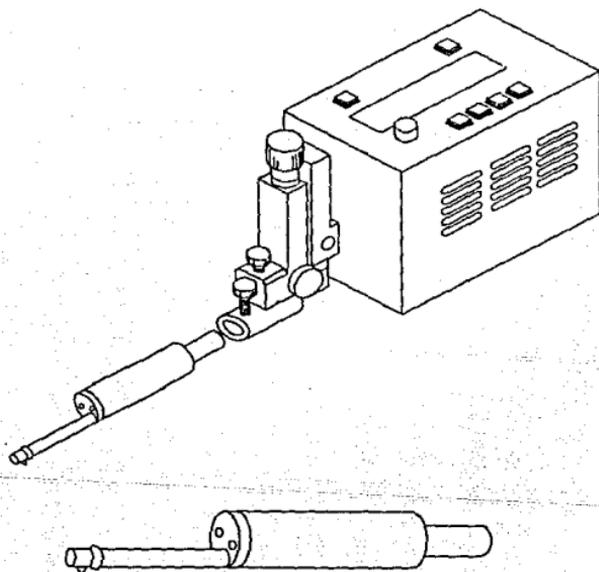
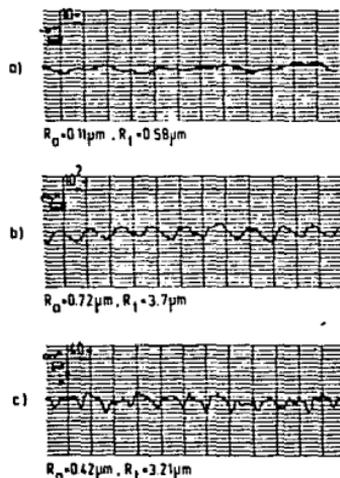


Figura V.12 Analizador de superficies (rugosímetro)

Un punzón de diamante atraviesa la superficie y éstos movimientos verticales son grabados. El perfil representa solamente un paso en una dirección lineal a través de una superficie tridimensional fortuita. El trazado del perímetro puede ser dibujado desde una parte de las áreas de sección transversal de la textura superficial. El perímetro trazado representa una imagen en tres dimensiones de las características de textura.

El analizador de superficies graba las irregularidades sobre las superficies con diferentes ampliaciones en la dirección vertical y horizontal, figura V.13.



**FIGURA V.13** Diferentes perfiles superficiales obtenidos por el analizador de superficies: (a) Pulido electrolítico, (b) Torneado y (c) superficie fresada

Normalmente la ampliación vertical es más grande que la horizontal. Debido a ésta diferencia en ampliación, los perfiles grabados no representan una imagen verdadera de la forma real de las

irregularidades de la superficie. La imagen real de las superficies consiste preferentemente de una amplia base de crestas, con ángulos de inclinación menor que  $15^\circ$  desde la línea de base. Para la evaluación de los modelos de desgaste ésto es muy importante, pues es necesario tomar en cuenta la diferencia de la imagen de la superficie grabada y la superficie actual.

#### V.V.1 Requerimientos del Perfilograma

La exactitud de los valores obtenidos para las características microgeométricas de la superficie depende ampliamente de la calidad de los perfilogramas. Es deseable que la línea central del perfil descrito por los perfilogramas pudiera ser horizontal. La selección de la ampliación vertical del trazo se basada en la utilización máxima del ancho del papel utilizado para gráficar. La selección de la ampliación horizontal se regula para para obtener un grabado claro de las asperezas individuales sobre el perfil .

Los perfilogramas, figura V.14, deben ser obtenidos de varias secciones de la superficie, esas secciones deben de ser las más representativos de la superficie en estudio. La longitud del perfilograma obtenido de cada sección no debe ser menor que la longitud básica, correspondiente a la superficie final de la prueba superficial.

Cuando ondulaciones significativas estan presentes sobre el perfilograma, la longitud del perfilograma de cada sección es disminuida para excluir esto, y el número de secciones es incrementado (1).

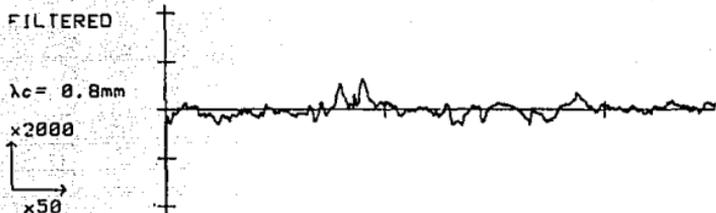


Figura V.14 Sección de un perfilograma

La calidad de las superficies es evaluada por el trazo del perfil de la superficie sobre un diagrama de igual longitud a la línea base l figura V.14. La base o línea centro promedio sirve para evaluar los parámetros geométricos de la superficie, siguiendo la dirección general del perfil la cual es dibujada de acuerdo a la desviación media cuadrática del perfil. Los parámetros de rugosidad más usados para resolver los problemas de contacto de cuerpos son: la altura máxima de las asperezas del perfil  $R_{max}$ , el área de la curva de soporte y el radio de curvatura del extremo de las asperezas  $r$ ;  $R_{max}$  es la distancia entre una línea que corresponde a los extremos de las crestas de las asperezas y una línea correspondiente a los valles dentro de los límites de la línea base. Ambas líneas se estiman a la misma distancia de la línea centro, pasando primero por el punto más alto y después a través del punto más bajo del perfil.

Los valores usados frecuentemente para la caracterización de la textura superficial están al centro -línea promedio-, o la desviación media aritmética del perfil (cla  $\hat{=} R_a$ ), la raíz media cuadrática ( $rms \hat{=} R_q \approx 1.25 R_a$ ), el valor de rugosidad, las crestas a-a altura del valle ( $R_t$ ) o la cresta máxima a la altura del valle ( $R_{max}$ ).

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Y(x)| dx ; \quad \text{cia. } \hat{=} R_a \quad \text{V.1}$$

y  $R_z$  la altura de las asperezas del perfil a 10 puntos, es decir

$$R_z = \frac{1}{5} \left[ \sum_{i=1}^5 |H_{\max_i}| + \sum_{i=1}^5 |H_{\min_i}| \right] \quad \text{V.2}$$

Donde  $H_{\max_i}$  es la desviación de uno de los cinco máximos más grandes desde la línea central y  $H_{\min_i}$  es la desviación de los cinco mínimos que están a menor distancia de la línea central.

## VI. EL ZINALCO

La inquietud del ser humano lo ha llevado siempre a investigar sobre temas tecnológicos, y su esfuerzo y dedicación han hecho posible alcanzar logros increíbles.

El caso de la metalurgia mecánica y la tecnología de materiales no se ha resagado, por ejemplo: los Ingenieros en electricidad y electrónica requieren de circuitos integrados que funcionen adecuadamente y de materiales aislantes que soporten altos voltajes ; los Ingenieros civiles y los arquitectos construyen estructuras sólidas y confiables ; los Ingenieros petroleros y los químicos requieren barrenas de perforación y tuberías que resistan la abrasión y corrosión ; los Ingenieros de diseño en el área automotriz utilizan materiales resistentes y de poco peso, los Ingenieros de manufactura requieren de materiales muy duros para desbaste y maquinado de piezas, los Ingenieros aeroespaciales demandan materiales ligeros que se comportan adecuadamente, tanto a elevadas temperaturas como en el gélido y vacío del espacio exterior. Los Doctores utilizan materiales que sustituyen o refuerzan articulaciones humanas; en fin todo mundo está expuesto a utilizar algún material que facilite su vida y todo esto gracias a los Ingenieros metalúrgicos y a los especialistas en cerámicas y polímeros que producen y conforman materiales que son económicos y que tienen propiedades físicas y mecánicas cada vez mejores.

En la medida en que se comprenden las relaciones entre la estructura y sus propiedades, se desarrollan nuevos materiales.

En materiales para ingeniería se aplica dicho conocimiento científico para transformar materiales en productos útiles.

Los materiales son sustancias que se manufacturan y se procesan; con ellas se diseñan y construyen componentes o estructuras, se seleccionan y analizan sus fallas o simplemente se trata de ver cognositivamente el comportamiento de las mismas.

Los materiales puros tienen muchas aplicaciones en ingeniería, pero cuando se requieren mejores propiedades mecánicas, se utilizan aleaciones o mezclas de materiales. Existen dos tipos de aleaciones: de una fase o unifásica y de varias fases o multifásica, donde una fase posee las siguientes características (19):

- a) Una fase tiene en general la misma composición y propiedades.
- b) Posee la misma estructura y ordenamiento atómico en todo material y,
- c) Hay una interfase definida entre la fase y cualquier otra fase circundantes.

En realidad para el desarrollo de un material o aleación intervienen muchos factores, principalmente del tipo económico; es decir se estudian mucho los recursos de un país para el estudio y la investigación de un material en especial. Estos recursos materiales hacen que la política de desarrollo de un país se movilice para crear objetivos tecnológicos basados en dichas materias primas. Tal es el caso del DESARROLLO DE LA ALEACION ZINALCO COMO MARCO POLITICO Y ECONOMICO. Dicho proyecto fue propuesto a la organización de los Estados Americanos en 1977(8).

Uno de los objetivos principales era la de sustituir al aluminio en algunas aplicaciones y se observó que las aleaciones Zn-Al tenían propiedades prometedoras, estas aleaciones se conocen por su excelente capacidad para fundición y por sus propiedades superplásticas(14). La superplasticidad ocurre en aleaciones cuando son tratadas térmicamente o procesadas de manera especial y pueden ser deformadas uniformemente una cantidad extrema, quizá hasta un 1000%.

Como se puede apreciar las aleaciones base zinc tienen años de investigación y en muchas partes del mundo, pero surge un interés especial en nuestro país ya que México exporta grandes cantidades de este metal.

Bien es sabido que las minas más importantes del mundo, haciendo referencia a este material, se localizan en Norteamérica, México, Japón e Inglaterra y con respecto a la exportación de materia prima México ocupa los primeros lugares, surge así la necesidad de analizar sus propiedades y sus posibles usos.

Hasta la fecha ninguna aleación de zinc tiene aplicación directa con fines específicos ya que algunos presentan ductibilidad muy limitada como es el caso del ZA-27 (esta aleación es muy frágil) o en otra aplicación presentan corrosión intergranular y fluencia lenta como es el caso de las aleaciones superplásticas, por ejemplo: super Z300 (22% AL, 0.5% CU y 0.01% Mg).

En el ZINALCO, aleación basada en Zinc 77%, Al 21% y Cu 2%. Se han logrado eliminar en parte dichos impedimentos para aplicación estructural, de tal manera que puede ser extruido; por la resistencia a la corrosión presenta mayor aplicación que los productos galvanizados, además de aceptar recubrimientos protectores por anodizado o inmersión en baños de cromato. La aleación también se puede pintar si se encuentra perfectamente limpia (14), esta aleación fué desarrollada alrededor del año 1979 por el Dr. G. Torres Villaseñor y también puede incursionar en la rama de la fundición, forja y laminación.

El Zinalco se encuentra ubicado entre los dos materiales con más aplicaciones industriales, el hierro y el aluminio. La densidad del Zinalco es de 5.4 ( $\text{g/cm}^3$ ) lo cual lo hace 31% más ligero que el acero (7.8 ( $\text{g/cm}^3$ )), aunque pesa el doble que el aluminio (2.7 ( $\text{g/cm}^3$ )) sin embargo su resistencia mecánica es semejante a la de un acero de bajo carbón. Su resistencia a la corrosión se encuentra entre la del aluminio y el zinc. Esta aleación tiene un intervalo de solidificación bastante amplio (421 a 481°C). El Zinalco por sus propiedades superplásticas puede tener muchas aplicaciones pero en estas condiciones no se ha estudiado a fondo. Otra de las buenas características es que se puede soldar con electrodo de aleaciones a base de zinc.

## VI.1. PROPIEDADES MECANICAS.

Las propiedades mecánicas se fundamentan en la microestructura del zinalco que obtiene después de un proceso de fabricación determinado o de la cantidad de cobre que contenga la aleación.

La adición de cantidades de Cu menores al 1% en las transformaciones de fase del eutectoide Zn-Al retarda la transformación perlítica sin existencia de alguna nueva transformación; las propiedades mecánicas varían muy poco al agregar 2% Cu, pero al agregar 4% Cu son más notorios. Con 1% Cu y 2% Cu las estructuras son perlitas muy similares a las obtenidas con la aleación Zn-22% Al y con esta composición química cada fase de la perlita contiene Cu en solución. El enfriamiento en aire y agua con hielo produce una estructura con grano muy fino equiaxial en las aleaciones con 1% y 2% Cu. Además a mayores velocidades de enfriamiento en el templado, menor es el tamaño de grano y el aumento en la dureza de estas aleaciones es pequeño, pero el aumento en el esfuerzo de cedencia resulta ser más alto que en las aleaciones sin adición de cobre.

El arreglo microscópico que pueden tomar las fases que componen la aleación son primordialmente dos fases; la fase alfa, es aluminio con menos del 1% del zinc disuelto y la fase beta, es zinc con menos del 0.5% de aluminio disuelto y en ambas fases hay una cierta cantidad de cobre, no bien determinada, que también se encuentra en solución (14). Cuando la aleación es enfriada lentamente desde arriba de la temperatura eutectoide ( $275^{\circ}\text{C}$ ), las fases  $\alpha$  y  $\beta$  se arreglan en forma laminar semejante a la perlita en los aceros; la formación de granos finos del cuál se habló anteriormente es por una descomposición espinoidal de la fase de alta temperatura fase  $\gamma$  (14).

Bajo condiciones de alta temperatura ( $t > 200^{\circ}\text{C}$ ), se acepta que el principal mecanismo de deformación es el deslizamiento de granos. Este deslizamiento puede llevarse a cabo por procesos que

involucran difusión o simplemente movimiento de un grano sobre otro. A temperatura ambiente la deformación se lleva a cabo por procesos clásicos de deslizamiento de planos atómicos y dislocaciones (14). Se llegó a la conclusión que el esfuerzo cortante  $\tau_0$  necesario para producir cedencia en el metal consiste en dos términos: uno es el esfuerzo cortante  $\tau_0$  requerido para vencer la fuerza de cohesión entre granos y el otro un esfuerzo de fricción  $\mu$  el cuál es proporcional al esfuerzo normal a la superficie ( $V_n$ ) de los granos :

$$\tau_0 = \tau_c + \mu V_n$$

El esfuerzo de cohesión entre granos ( $\tau_c$ ) es un término que decae muy rápido con la temperatura; es decir, es alto a temperatura ambiente y cae hasta un 90% a 200 (°C).

$\mu$  involucra a la fricción y es proporcional a la velocidad; la fricción y el esfuerzo de cedencia alcanzan valores elevados a una gran rapidez de deformación, mientras que a bajas velocidades de deformación ( $10^{-3}$ seg) la fricción es casi despreciable y el esfuerzo de cedencia toma valores muy pequeños.

A continuación se presenta una tabla comparativa de propiedades mecánicas del zinc con diversos materiales..

MATERIAL TIPO DE MOLDEO	ZINCALCO I				ZINCALCO II		ZINAC 5	ALUMINIO 300	LATON	BRONCE	FIERRO GRIS
	UNIFICION EN ARENA	UNIFICION POR INYECCION	ENTRUBADO	LAMINADO	UNIFICION EN ARENA	UNIFICION POR INYECCION	UNIFICION POR INYECCION	UNIFICION EN ARENA	UNIFICION EN ARENA	UNIFICION EN ARENA	UNIFICION EN ARENA
DENSIDAD (GPM/CM <sup>3</sup> )	5.4				5.4		6.7	2.74	8.5	8.88	7.4
PUNTO DE FUSION (°C)	421-481				421-481		380-386	540-575	925-940	762-428	1232
COEFICIENTE DE EXPANSION TÉRMICA (°C <sup>-1</sup> )	26				26		26.9	21.8	20	18.5	11.9
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (CAL/CM <sup>2</sup> · SEG·°C)	126				126		132	96	90	47	-
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (Ω <sup>-1</sup> ·A·C·F)	38				38		26	27	20	18	6
RESISTENCIA A LA TENSIÓN (MBA)	290-300	310-320	380-410	270-290	250-300	480-428	280-338	324	230	240	214
ESFUERZO DE CEDENCIA (MBA)	280-300	290-310	280-320	300-310	260-270	340-378	-	158	117	124	124
DEFORMACION MAX. (%)	3-5	8-10	30-35	80-100	5-8	6-10	7	3.5	38	28	2
DUREZA Pó	50-55	60-65	40-55	25-30	65-80	55-70	80-85	60-85	60	63	210
PERSISTENCIA AL IMPACTO (J)	2-3	2-3	7-8	8-9	2-3	2-3	50-60	2-3	15	15	54-88
MODULO DE ELASTICIDAD (KG/CM <sup>2</sup> )	110-130				110-130		-	71	98	80	172

## VII. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Ya que el desgaste es una respuesta del sistema, un reporte completo incluye:

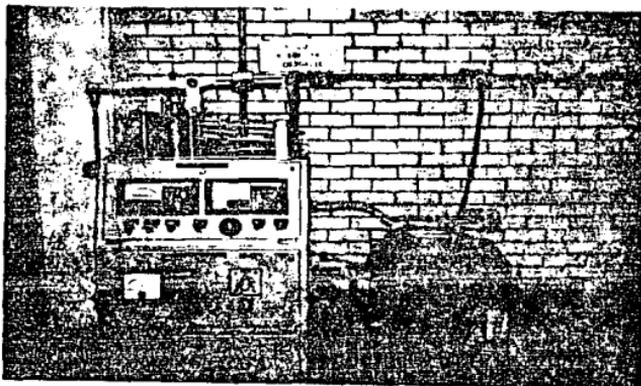
- Descripción del aparato de prueba utilizado
- Geometría de Contacto
- Tipo de movimiento
- Carga, velocidad y condiciones ambientales
- Condiciones del medio desgastante
- Descripción de materiales
- Descripción del lubricante y del tipo de lubricación usada
- Observaciones extrañas, por ejemplo evidencia de transferencia de material
- Superficie y preparación del material
- Rugosidad del par sometido a desgaste.

Debido a la importancia que tiene el equipo para simular condiciones prácticas, describiremos detalladamente el proceso utilizado para evaluar las condiciones de desgaste, en este caso desgaste por deslizamiento y ver el comportamiento de la aleación Zinalco<sup>NR</sup> con respecto a otras aleaciones.

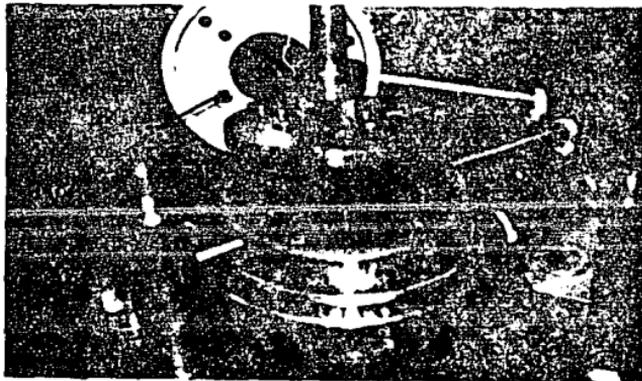
El equipo utilizado (Fotografía VII.1) es especial para desgaste por deslizamiento en seco o con lubricación, consta de una cámara para aislar las piezas de prueba del medio ambiente (Fotografía VII.2); ésta cámara tiene la posibilidad de aumentar su temperatura interna por medio de resistencias que emiten por conducción y convección calor al interior, éste es un factor importante pues la temperatura en condiciones reales aumenta impredeciblemente, éste incremento de temperatura se simula por el aumento de la misma en la cámara mencionada.

La temperatura se determina por un termostato ubicado en la parte inferior derecha del panel de la máquina (fotografía VII.3) y se lee en un galvanómetro ubicado en la parte inferior izquierda (fotografía VII.3), el galvanómetro puede darnos la lectura de

temperatura, tanto de la cámara aisladora como de cada una de las muestras de prueba, dato importante pues el aumento de la temperatura en la muestra provoca un mayor desgaste.



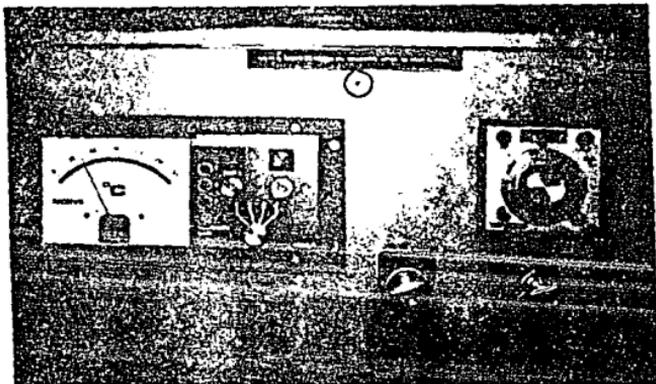
Fotografía VII.1. Máquina modelo 51 cygnus II discs pins.  
SWANSEA TRIBOLOGY CENTRE.  
Para estudios de tribología.



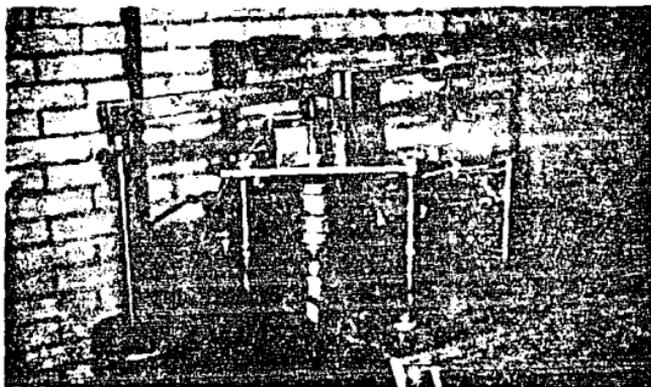
Fotografía VII.2.- Cámara de aislamiento.

El implemento de la carga axial se ubica en la parte superior de la máquina (fotografía VII.4) y consta de un brazo de acero. En un costado se ubica un plato para colocar los discos con diferentes pesos, desde 1/2 Kg. hasta 5 Kg. En la parte central del brazo de acero se localiza una espiga formando una especie de T y en la parte inferior de esta se localiza una bola (balín) la cuál se centra en un punto con el balín de la pieza contraria; ésta pieza es el portamuestras (fotografía VII.5) y el centrado de estas dos piezas se realiza con ayuda de un nivel de gota provocando que la carga sea en forma axial 100% a las piezas a desgastar, el otro costado del brazo tiene un contrapeso.

Las revoluciones por minuto se pueden controlar con una perilla ubicada en la parte superior derecha (figura VII.6); éste dato es importante ya que de él se obtiene la distancia recorrida de la muestra en un diámetro de 7 cm (fotografía VII.7). a ésta variable se le llama S.

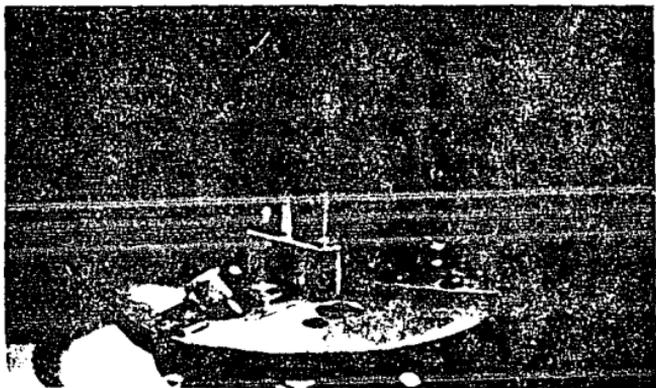


Fotografía VII.3.- Termostato y galvanómetro de temperatura.

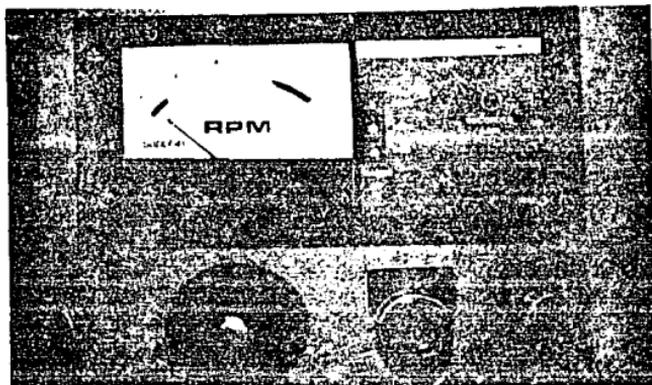


Fotografía VII.4.- *Perspectica de la carga axial.*

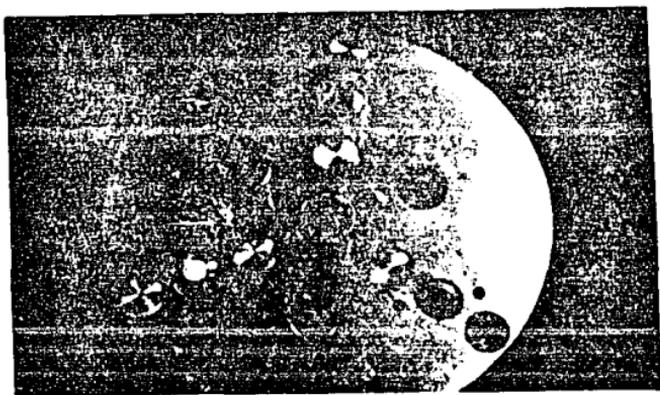
El torque se mide en la carátula ubicada en el costado superior izquierdo (fotografía VII.8) el cuál representa el brazo de palanca o la fuerza de adhesión a la que es sometido el arreglo.



Fotografía VII.5.- *Portamuestras.*

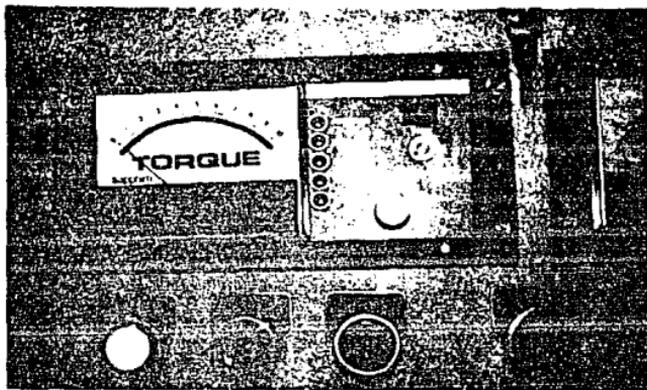


Fotografía VII.6.- Control de las rpm.



Fotografía VII.7.- Arreglo de probetas en portamuestra.

Para evaluar la duración de cada prueba se mide el tiempo con un cronometro externo y con dichos datos se calcula después la distancia de deslizamiento.



Fotografía VII.8.- Control del torque.

#### VII.1. MEMORIA DE CALCULO.

Tomando en cuenta que se tienen las siguientes variables :

Propiedades del material :

H = dureza del material (Rockwell-B) ( $\text{Kg/cm}^2$ )

$\rho$  = densidad del material ( $\text{Kg/cm}^3$ )

V = volumen de desgaste ( $\text{cm}^3$ )

Propiedades de prueba :

RPM = revoluciones por minuto

L = carga axial

$\Delta t$  = incremento de tiempo (t)

$S_0$  = distancia de deslizamiento (cm)

1) Cálculo del coeficiente de desgaste.

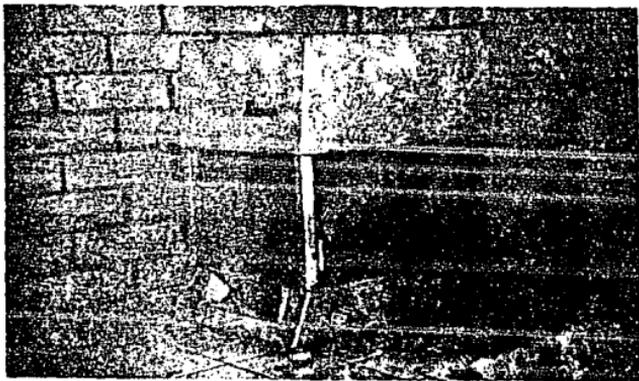
$$K = \frac{VH}{LS_0} \quad (\text{VII.1})$$

Donde H y L son valores conocidos

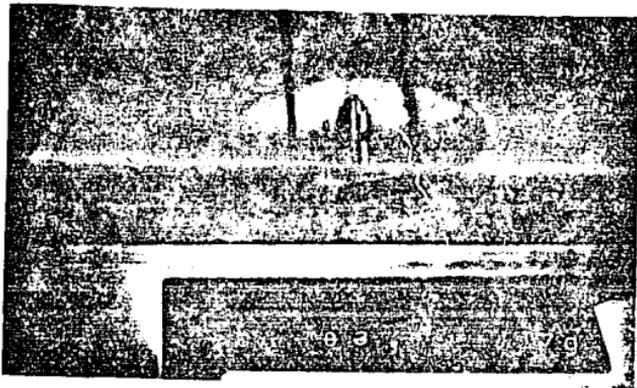
### 11) Cálculo del volumen de desgaste

Para obtener el volumen de desgaste contamos con una balanza analítica (fotografía VII.9), la cual utilizamos para pesar las muestras, dicha balanza nos proporciona datos con una exactitud de hasta diezmilésimas de gramo (fotografía VII.10) lo cual es de enorme ayuda pues el volumen de desgaste es una de las variables que más debemos cuidar, ya que al aumentar el desgaste de un material aumenta su coeficiente.

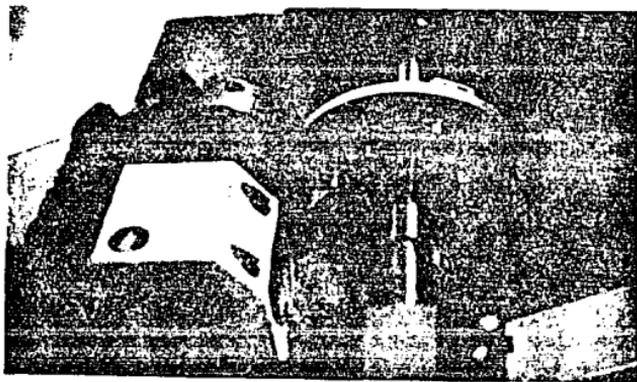
La preparación de las muestras fué la siguiente: se maquinaron por control numérico (fotografía VII.11) obteniendo así una excelente precisión y un acabado superficial aceptable. Como en la máquina para estudios de tribología se tienen que montar 3,6 ó 9 probetas teníamos que asegurar que las 3 muestras (fotografía VII.12) tuvieran la misma longitud de espiga (fotografía VII.13) para que el contacto con el acero (material contra para efectuar el desgaste) fuera exactamente el mismo en los 3 puntos o en las 3 espigas; esto lo conseguimos mediante un careado en torno de las 3 muestras montadas (fotografía VII.14), obteniéndose así una rugosidad en la superficie a desgastar de 8 a 32 pulgadas ( $8\mu$  a  $32\mu$  pulgadas), bajo este proceso se obtuvieron valores en gramos de la pérdida de peso con la balanza analítica.



Fotografía VII.9.- Balanza analítica.



Fotografía VII.10.- Carátula de la balanza analítica.



Fotografía VII.11.- Maquinado CNC.

Si llamamos

Pi = peso inicial

Pf = peso final

$Pi - Pf = TP$  (kg) pérdida de peso.

Dividiendo TP entre la densidad del material obtenemos el volumen de desgaste Vd

$$\frac{P_i - P_f}{\rho} = \frac{TP \text{ (kg)}}{\rho \text{ (kg/cm}^3\text{)}} = V_d \text{ (cm}^3\text{)} \quad (\text{VII.2})$$

iii) Cálculo de la distancia de deslizamiento.

Tomando el arreglo del portamuestras (fotografía VII.7) se aprecian 3 distintos diámetros para montar las probetas (en nuestro caso utilizamos el círculo central con un diámetro de 7 cm) y como la máquina nos da la lectura de las RPM proseguimos con los siguientes cálculos :

Tomando en cuenta que :

$$1 \text{ Rev} = \pi \phi = \text{Perimetro}$$

$$\frac{\text{rev}}{\text{min}} \frac{(\phi \pi \text{ cm})}{\text{rev}} = \frac{\text{cm}}{\text{min}}$$

$$\text{Entonces } S_o = (\text{RPM}) (\phi \text{ cm} \times \pi) \times (t) = S_o \text{ (cm)} \quad (\text{VII.3})$$

Donde t es el tiempo de ensayo.

$$\pi = 3.1416$$

RPM = rev. x min. a la cuál gira el portamuestra

$\phi$  = diámetro en el cuál se encuentran las muestras

De las ecuaciones VII.2 y VII.3 se obtiene el coeficiente de desgaste.

$$K = \frac{V_H}{L S_o} \quad (\text{VII.4})$$

ya obtenido podemos calcular la razón de desgaste del material en estudio por la siguiente ecuación

$$q = K L \rho$$

(VII.5)

donde K es el coeficiente de desgaste y es adimensional

L = carga axial en kg

H = dureza Rc del material (kg/cm<sup>2</sup>)

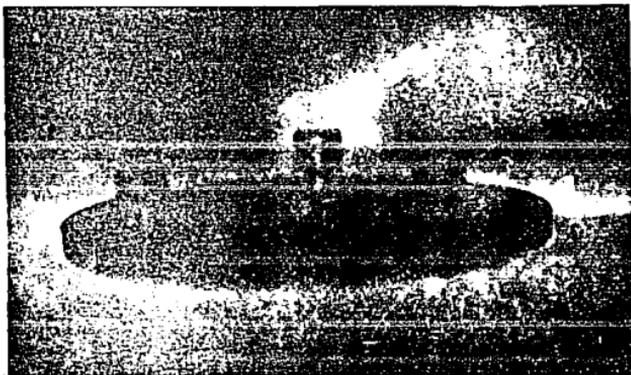
$\rho$  = densidad del material (kg/cm<sup>3</sup>)

q se puede expresar también de la siguiente manera.

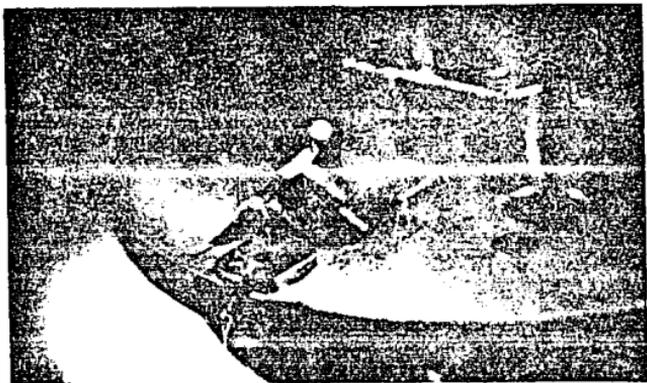
$$q = \frac{V_p}{S_o}$$

(VII.5)

De aquí podemos observar que la razón de desgaste depende de la densidad del material, del volumen de desgaste y de la distancia de deslizamiento; esto se aprecia cuando al aumentar las RPM disminuye la razón de desgaste, ya que el contacto molecular en forma dinámica hace un valor de "q" menor que el contacto estático, por eso hablaremos de una gráfica ideal donde el inicio tiene una curva pronunciada y conforme avanza la prueba la pendiente de la curva tiende a cero.



Fotografía VII.12.- Arreglo de muestras en el disco.

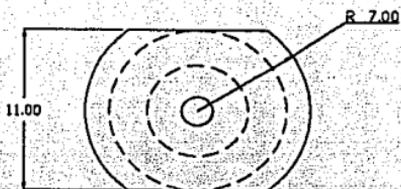


Fotografía VII.13.- Longitud de la espiga.

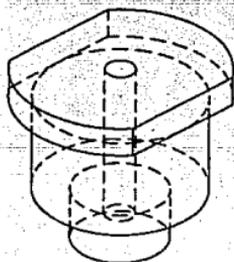
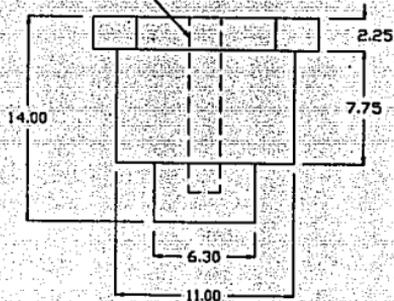


Fotografía VII.14.- Careado de muestras en torno CNC.

En la gráfica VII.1 se muestra el plano dimensional de la probeta de desgaste; en la gráfica VII.2 se muestran los datos de rugosidad de una probeta de bronce comercial; en las gráficas VII.3 y VII.4 se muestran datos de rugosidad del disco de acero torneado y rectificado respectivamente, el acero es del tipo D2 o acero para herramientas, y las superficies se analizaron en el aparato analizador de superficies, SurfTest 402 series 178 Surface RoughnTester Operation Manual de la marca Mitutoyo.



Barreno de  $\varnothing 2 \times 12$

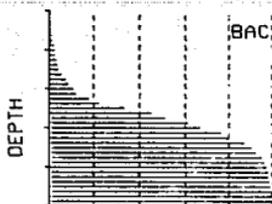
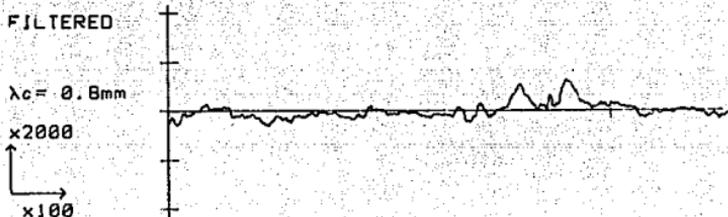


PERSPECTIVA

Acotaciones en mm.  
escala 3:1

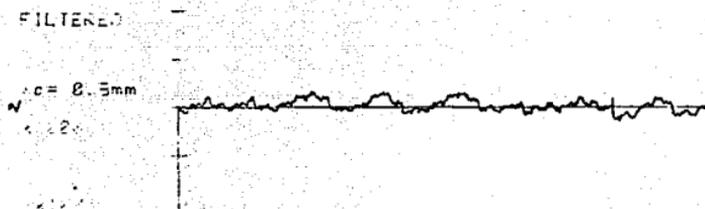
Gráfica VII.1.- Plano dimensional de la muestra sometida a desgaste.

		LP ( 5%)	0%
RANGE	25um	(10%)	0%
$\lambda_c$	0.8mm	(15%)	1%
	x5	(20%)	2%
		(25%)	2%
		(30%)	3%
Ra	0.60um	(35%)	7%
Rz (DIN)	4.3um	(40%)	10%
Rmax(DIN)	6.2um	(45%)	17%
Rq	0.82um	(50%)	33%
RL	6.3um	(55%)	51%
Rp	2.3um	(60%)	66%
R3z	2.4um	(65%)	80%
$\theta_a$	2.9°	(70%)	90%
Pc	39/cm	(75%)	95%
Sm	251.50um	(80%)	97%
S	100.50um	(85%)	98%
HSC( 5%)	10/cm	(90%)	99%
		(95%)	99%



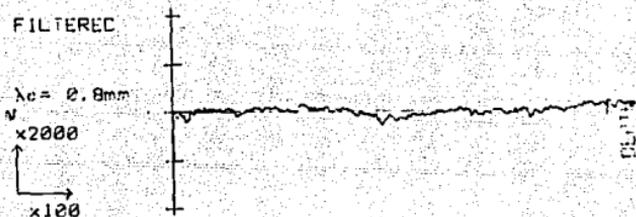
Gráfica VII.2.- Datos de rugosidad de una muestra de bronce.

		(10%)	1%
Pa	0.12 μm	(110%)	7%
Ac	0.5 μm	(15%)	4%
	×5	(20%)	7%
		(25%)	8%
Pa	0.12 μm	(30%)	11%
Kz (DIN)	2.5 μm	(35%)	12%
Rmax(DIN)	2.7 μm	(40%)	13%
Rq	0.52 μm	(45%)	14%
Rt	3.1 μm	(50%)	16%
Pp	1.4 μm	(55%)	17%
Raz	2.0 μm	(60%)	18%
Da	3.1 μm	(65%)	19%
Pc	48 μm	(70%)	20%
Sm	208.58 μm	(75%)	21%
C	32.75 μm	(80%)	22%
	17 μm	(85%)	23%
		(90%)	24%
		(95%)	25%



Gráfica VII.3.- Datos de rugosidad del disco de acero torneado.

		10%	2%
		(12%)	1%
RANGE	25um	(15%)	5%
$\lambda_c$	0.8mm	(20%)	7%
	x5	(25%)	11%
		(30%)	22%
$R_A$	0.30um	(35%)	32%
$R_z$ (DIN)	0.70um	(40%)	50%
$R_{max}$ (DIN)	2.4um	(45%)	63%
$R_q$	0.42um	(50%)	72%
$R_t$	2.6um	(55%)	86%
$R_p$	0.3um	(60%)	89%
$\sigma_a$	2.5	(65%)	95%
$P_c$	15/cm	(70%)	97%
$S_m$	647.75um	(75%)	98%
$S$	28.25um	(80%)	99%
HSCI 5x)	5/cm	(85%)	99%
		(90%)	99%
		(95%)	99%



Gráfica VII.4.- Datos de rugosidad del disco de acero rectificado.

## VIII. PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

En las siguientes páginas se presentan y analizan algunos de los resultados mas relevantes encontrados en el trabajo experimental. Así, en la gráfica 1.1 se aprecia el desgaste de probetas de aluminio girando el portamuestras a 600 rpm, carga axial de 1 kg y tomando datos cada 4 min. Las curvas 1 y 2 (de las probetas 1 y 2 respectivamente) son muy semejantes y varían de 0.086 gr. aproximadamente a una distancia de  $55 \times 10^3$  cm. hasta alcanzar un valor de 0.105 gr. a una distancia de  $320 \times 10^3$  cm. La gráfica 1.2 muestra valores de la razón de desgaste "q" partiendo de un valor de  $160 \times 10^{-8}$  g/cm a 550 mts. y disminuyendo su valor a  $45 \times 10^{-8}$  g/cm. en una distancia de desgaste de 3200 mts. Podemos decir que la gráfica de la probeta 3 ó la curva No.3 no estaba lo suficientemente alineada con las otras ó el aluminio que utilizamos no era aluminio comercial, prueba de esto la diferencia de la curva con las curvas 1 y 2.

Se realizó la misma prueba con latón comercial, teniendo un valor inicial de pérdida de peso muy semejante al aluminio comercial, la gráfica 1.3 conforme avanza la distancia de deslizamiento indica un desgaste excesivo observándose esto en la pendiente de la curva con un valor final de 0.35 a 2700 mts. (el doble de desgaste que el aluminio). Las gráficas 1.4 y de la razón de desgaste del latón muestra un valor de  $140 \times 10^{-8}$  a 550 mts. y manteniéndose casi constante a lo largo de toda la prueba; lo que muestra que el aluminio a estas características se desgasta menos que el latón. La gráfica 1.5 es una repetición de la gráfica 1.4 y aunque muestra pequeñas diferencias podemos decir que los valores son aceptables. Estas diferencias se las atribuimos a que entre ensayo y ensayo el disco de acero de debe de rectificar pues quedan inclusiones de los materiales mas blandos.

La gráfica 1.6 muestra los resultados del bronce comercial, observándose que son más pequeños que los obtenidos para el aluminio y el latón comercial; pero debido a la pendiente de su curva se aproxima a un valor de 0.18 gr. de pérdida de peso a una

distancia de deslizamiento de  $320 \times 10^3$  cm; 0.075 gr. más que el aluminio. Se aprecia mejor en la gráfica 1.7 que la pérdida de peso por cada centímetro recorrido es de  $60 \times 10^{-8}$  (gr/cm) y tiende a ser constante, esto es que el aluminio tiende a comportarse ligeramente mejor que el bronce después de tiempos largos y pequeñas cargas axiales.

La gráfica 1.8 muestra al Zinalco, bajo las mismas condiciones de prueba, obteniéndose valores de 0.08 gramos perdidos a 5500 mts. recorridos de desgaste, siendo el comportamiento igual que el aluminio y el latón, y llega a perder hasta 0.230 gr. en la curva número 3 a una distancia recorrida de desgaste de  $420 \times 10^3$  cm. lo que muestra que en estas condiciones de prueba, es decir, para un valor pequeño de la carga axial, el Zinalco<sup>MR</sup> sufre un desgaste mayor. La gráfica q-s muestra valores de  $160 \times 10^{-8}$  g/cm a 55000 cm de recorrido, disminuye el valor hasta  $70 \times 10^{-8}$  g/cm en la misma curva y después disminuye asintóticamente hasta un valor de  $50 \times 10^{-8}$  gr/cm (en la curva 2) y a una distancia recorrida de 420000 cm. Estos valores nos sirven para comparar con las gráficas anteriores, y vemos que el desgaste es mayor que en los demás materiales, en otras palabras, en el estado transitorio el Zinalco<sup>MR</sup> sufre un desgaste severo, pero en estado estable su valor disminuye casi hasta el valor del aluminio,  $45 \times 10^{-8}$  g/cm, por lo tanto en estado estable el Zinalco<sup>MR</sup> se comporta mejor que los demás materiales. Para comprobar lo citado anteriormente, la gráfica 1.10 muestra la razón de desgaste del Zinalco a un valor de 220000 cm. de distancia recorrida y sin medición alguna hasta el final de la prueba, es decir, que el material alcanzó el estado estable de desgaste a los 1600 cm. de prueba y nos proporcionó un valor pequeño, de  $13.5 \times 10^{-8}$  g/cm en la probeta 1, y casi  $16 \times 10^{-8}$  g/cm en las probetas 2 y 3. esto se repite en la gráfica 1.11 con unas rpm mayores y aunque aquí si cambian las condiciones de prueba podemos destacar el valor pequeño o que nos dió de  $9 \times 10^8$  g/cm. a 1800 mts. recorridos.

La gráfica 2.1 muestra al aluminio comercial desgastado a 600 rpm con una carga axial menor que las gráficas de la serie 1 (de

0.5 kg.) y realizando las mediciones cada 2 min. El valor de "q" a 270 mts recorridos es de  $470 \times 10^{-8}$  g/cm en la curva 3 pero es de  $160 \times 10^{-8}$  g/cm en la curva No.1. El valor es elevado comparandolo con la gráfica 1.2 y es aceptable ya que el latón en la gráfica 2.3 adquiere valores desde  $70 \times 10^{-8}$  gr/cm en la curva 3 (probeta 3) y de  $200 \times 10^{-8}$  gr/cm en la curva 2 (probeta 2) pero en estado estable el valor de las curvas se homogeniza y nos da de  $130 \times 10^{-8}$  g/cm a una distancia de  $270 \times 10^3$  cm. En estas condiciones el latón sufrió menos desgaste, en la gráfica 2.2 se aprecia que el latón sufre un desgaste constante desde 25000 cm. hasta 270000 cm. de recorrido.

Para el bronce sucede algo parecido al latón, en la gráfica 2.4 se graficó el desgaste contra la distancia de deslizamiento y se aprecia un desgaste ascendente constante donde el valor mínimo es al inicio de la prueba de 0.038 gr. y se incrementa hasta 0.024 cada evento para obtener un valor de hasta 0.25 gr. a 200000 cm; la gráfica q-s (gráfica 2.5) detecta en la transición valores de  $q = 190 \times 10^{-8}$  g/cm a una distancia de 400 mts. de desgaste, y a 1950 mts. de desgaste q adquiere el valor de  $130 \times 10^{-8}$  g/cm valores mayores a los obtenidos en la gráfica 1.7. En la gráfica 2.6 se aprecia una pérdida de peso del bronce de 0.003 gr. a una distancia de deslizamiento de 28000 cm y llegando a perder en peso hasta 0.047 g. a una distancia de 133000 cm lo que nos lleva a afirmar que el bronce se desgasta en menor proporción a estas condiciones que en la gráfica 1.6.

En la gráfica 2.7 se observan valores de  $45 \times 10^{-8}$  g/cm a 250 mts. de recorrido, esta misma curva tiene un máximo a 550 mts. de desgaste mientras que la curva de la probeta 1 tiene un mínimo de casi cero a la misma distancia y ambas curvas se igualan a 1350 mts. de recorrido con un valor de  $37 \times 10^{-8}$  g/cm, esta gráfica en estado transitorio tiene valores en sus tres curvas un poco heterogéneos pero conforme avanza la distancia de deslizamiento los valores en sus tres curvas tienden a igualarse. En 1.7 se aprecia el mismo comentario por lo tanto se puede concluir que a cargas pequeñas el desgaste de las muestras de bronce es muy

difícil de predecir, pero en estado estable el valor se homogeniza.

A pequeñas cargas (0.5 kg. de carga axial) el Zinalco<sup>MR</sup> pierde muy poco peso, esto se aprecia en las gráficas 2.8 y 2.9 (AP-S) y (q-s) respectivamente. Donde los valores de pérdida de peso a 250 mts. de deslizamiento son del orden de 0.002 gr. Cabe destacar que en esta gráfica 2.8 se aprecia claramente 3 zonas, en la primera se aprecia un desgaste severo y abarca un intervalo de 250-1200 mts. de deslizamiento, las 3 curvas presentan en la zona 2 una disminución del desgaste, llamandose desgaste poco severo y en la zona 3 el desgaste aumenta nuevamente, hasta alcanzar un valor máximo en la curva 2 de 0.024 g. a 2600 mts. de deslizamiento. A estas características el Zinalco<sup>MR</sup> se comportó mejor al desgaste que el aluminio, latón y bronce comerciales.

La serie 3 muestra gráficas típicas de estudios tribológicos a 300 rpm, 1 kg. de carga axial y tomando valores cada 4 min.; en este caso se realizaron las pruebas además de aluminio, latón, bronce comerciales y el Zinalco<sup>MR</sup> a dos materiales, bronce salmenac 773 que corresponde a un bronce SAE 660 con la siguiente composición química:

Cobre	83%
Esta o	7%
Plomo	7%
Zinc	3%
Fosforo	1.5% max.

y las siguientes propiedades mecánicas.

Resistencia a la tensión.	2460 kg/cm <sup>2</sup>
Alargamiento en 5.08 cm.	18.90%
Reducción en área.	23.44%
Dureza Brinell.	79.6

Las aplicaciones actuales de éste tipo de bronce son para uso general donde se requiere un magnífico bronce antifricción, compacto y uniforme; casquillos y cojinetes para altas velocidades. Pequeños engranes, prensa estopa, asientos de válvulas, etc. Muy poco desgaste en condiciones normales de lubricación (7).

Y para el aluminio 6061-T6 ó duraluminio que tiene la siguiente composición química:

0.4 a 0.8%	Si
0.7%	Fe
0.15 a 0.4%	Cu
0.8 a 1.2%	Mg
0.14%	Cr
0.25%	Zn
0.15%	W
0.05%	OTROS
97.36%	Al

Y las siguientes propiedades mecánicas:

Resistencia a la tensión (psi)	45000
Esfuerzo de fluencia (psi)	40000
Elongación (%)	15

Este material se utiliza actualmente en la industria con propiedades anticorrosivas excelentes, buena maquinabilidad, y por mencionar algunas aplicaciones específicas: rines de bicicleta, estructuras ligeras y resistentes, astronáutica y otras.

La utilización de estos dos materiales para realizar pruebas de desgaste son de gran ayuda ya que nos permiten comparar y obtener conclusiones más exactas que con Al, Latón y Bronce comerciales. No se quiere decir que las pruebas con estos materiales no sirvan sino todo lo contrario, nos permiten realizar un trabajo más completo.

La gráfica 3.1 nos muestra la pérdida de peso del aluminio comercial, conforme aumenta la distancia de deslizamiento. Se observa una pérdida de 0.02 gr. a una distancia de 20000 cm recorridos, conforme avanza la prueba el aluminio llega a desgastarse 0.27 gr. en la curva No. 3 y 0.18 gr. en las curvas 1 y 2, la gráfica 3.2 nos muestra el valor de "q" en (g/cm) a una distancia recorrida de 1090 mts., q equivale a  $250 \times 10^{-8}$  y  $175 \times 10^{-8}$  en las curvas 3 y 1 respectivamente, el latón en la gráfica 3.3 muestra una pérdida de peso de 0.08 aproximadamente a 260 mts. recorridos de distancia de deslizamiento, valor más alto que el aluminio, y en 1600 mts. de deslizamiento la pérdida de peso fué de 0.33 gr., a los 1080 mts. de deslizamiento el latón adquiere un valor de desgaste de 0.22 gr, valor menor que el que toma el aluminio. En la gráfica 3.4 el valor de q es igual a  $240 \times 10^{-8}$  gr/cm a los 1090 mts. valor que se encuentra entre los valores del aluminio. En la gráfica 3.5 se observa el desgaste del bronce comercial hasta una distancia de 8000 mts. tomando un valor de 0.54 gr. valor sumamente pequeño comparado con los valores de las gráficas 3.1 y 3.3. La razón de desgaste del bronce se estabiliza en  $150 \times 10^{-8}$  gr/cm. aproximadamente a 2300 mts de recorrido, es decir a partir de este punto el desgaste del bronce disminuye. El Zinalco<sup>HR</sup> se comporta conforme a la gráfica 3.7 perdiendo 0.002 gr. en 25000 cm. de deslizamiento valor más pequeño que el obtenido en las gráficas 3.1, 3.3 y 3.5 del Al, Latón, y Bronce respectivamente. Esta pérdida de peso tan insignificante del Zinalco se mantiene hasta los 1000 mts. de distancia de deslizamiento. A partir de ahí el Zinalco<sup>HR</sup> aumenta su pérdida de peso conforme avanza en una cierta distancia de deslizamiento, como si se rompiera una capa superficial y se creara un desgaste severo. Aumentámos el deslizamiento del material hasta llegar a los 1900 mts. obteniéndose un valor de 0.012 gr, valor 0.287 gr. más pequeño que el bronce comercial. La gráfica 3.8 es una repetición de la 3.7 corroborando los resultados obtenidos. La gráfica 3.9 muestra las curvas "q-s" del Zinalco<sup>HR</sup> a 300 rpm.; 1 kg. de carga axial y a cada 4 min. de tiempo teniendo una máximo en la curva 2 de casi  $14 \times 10^{-8}$  gr/cm. en 500 mts. recorridos y existe un mínimo en la curva que es una valor negativo, pensamos

que aquí el material del disco de acero se le adherió a la probeta. Los valores a 2200 mts. Fueron de  $10 \times 10^{-8}$  gr/cm.

La gráfica 3.11 muestra el desgaste del duraluminio o aluminio 6061-T6 observandose al inicio de las curvas un desgaste semejante al experimentado en el Zinalco<sup>MR</sup> con 0.002 gr. a 26389 cm. recorridos, se localiza un valor máximo de 0.01 gr. de pérdida de peso a los 105558 cm de deslizamiento; un valor 0.0035 mayor al del Zinalco<sup>MR</sup>; la razón del desgaste del duraluminio se observa en la gráfica 3.12 y se observan valores muy semejantes a los obtenidos en el Zinalco<sup>MR</sup> aunque al final los valores que se obtienen en el duraluminio son mayores a los del Zinalco<sup>MR</sup>.

Para bronce SAE 660 o salmenac 773 se graficó su pérdida de peso y su razón de desgaste con las mismas características que las anteriores y aunque la gráfica tiene distinta escala en el eje de las ordenadas vemos que a los 184726 cm. de distancia recorrida el desgaste máximo fué de 0.14g. mientras que en el Zinalco<sup>MR</sup> fué máximo de 0.0125 a la misma distancia. Con lo que podemos decir que a estas condiciones el Zinalco<sup>MR</sup> mostró ligeramente mejor comportamiento que los demás.

Las gráficas de la serie 4 fueron realizadas a 900 rpm; 1 kg. de carga axial y 4 min. de tiempo entre evento y evento. A grandes rasgos vemos que el Zinalco pierde menos peso que los demás materiales pues en la gráfica 4.1 se experimentó con latón comercial obteniéndose valores de 0.25 gr. a 75000 cm de deslizamiento y hasta 0.57 gr. a 237000 cm. de recorrido. Con el bronce (se observa su gráfica en la número 4.3) se pudo hacer la prueba hasta 633345 cm de deslizamiento dando una pérdida de peso de 0.36 gr. En la gráfica 4.5 se experimenta al Zinalco y vemos en el eje de las ordenadas valores muy pequeños, del orden de 0.08 gr. a 700000 cm de recorrido, valor incluso más pequeño que el que toma a esa distancia el bronce SAE 660 (ver gráfica 4.9) con 0.6 gr. de pérdida de peso. La gráfica 4.2 muestra al latón perdiendo  $300 \times 10^{-8}$  gramos por cada centímetro recorrido, valor obtenido a 80000 cm de deslizamiento mientras que a 250000 cm. de

deslizamiento tiende a perder  $240 \times 10^{-8}$  gr/cm. En el bronce, ver gráfica 4.4, a 80000 cm de desgaste el valor obtenido fué de  $30 \times 10^{-8}$  g/cm, y a 300000 cm de recorrido se detectó el máximo valor con  $65 \times 10^{-8}$  gr/cm. El Zinalco<sup>MR</sup> obtiene los valores más bajos con  $2 \times 10^{-8}$  g/cm a 80000 cm en su curva No. 1 y de  $12 \times 10^{-8}$  gr/cm en la curva 3 y en estado estable el valor de la razón de desgaste es de  $10 \times 10^{-8}$  gr/cm aproximadamente a 710000 cm. de distancia de deslizamiento. En la gráfica 4.8 se observan los valores obtenidos con duraluminio y aunque detecta valores casi iguales a los del Zinalco<sup>MR</sup>, al inicio de la prueba, se elevan bastante hasta alcanzar los  $33 \times 10^{-8}$  gr/cm en su curva No.2 y de  $6 \times 10^{-8}$  g/cm en la curva No.1 (esto a 158336 cm de recorrido), las curvas como se puede apreciar van aumentando poco a poco, lo que nos dice que si la curva de la gráfica 4.8 la crecieramos hasta el valor máximo en las abscisas de la gráfica 4.6, aproximadamente 800000 cm. el valor sería más elevado que el que toma el Zinalco<sup>MR</sup>. En la gráfica 4.10 los valores de q fueron del orden de  $46 \times 10^{-8}$  a  $80 \times 10^{-8}$  lo que nos dice que el bronce salmenac y el duraluminio (bronce SAE 660 y aluminio 6061-T6 respectivamente) así como el latón y el bronce eociales se desgastan más que el Zinalco<sup>MR</sup> a pequeñas cargas axiales y a rpm muy elevadas.

Las gráficas de la serie 5 se experimentaron a 600 rpm; 1.5 kg. de carga axial y un tiempo entre prueba y prueba de 10 min. El aluminio 6061-T6 (ver gráfica 5.1) obtiene buenos resultados debido a su dureza de 95 BHN aproximadamente, cabe destacar que este aluminio es una aleación 6061, además en su diagrama de equilibrio que muestra una porción rica en aluminio del sistema Al-Mg<sub>2</sub>-Si; sucede la precipitación del Mg<sub>2</sub>Si después del envejecimiento artificial (temple T6) el cual permite que estas aleaciones alcancen su resistencia total. El Magnesio y el Silicio suelen estar presentes en la razón adecuada para formar silicianuros de magnesio. Por esto el duraluminio en la gráfica 5.1 tiene una pérdida de peso de 0.001 gr. a 120000 cm. de desgaste en su curva No.3 y 0.0074 gr. en la curva No.2 y alcanza un valor hasta 0.042 gr. máximo a 920000 cm. de deslizamiento. La razón de desgaste tiene valores de  $2 \times 10^{-8}$  y  $5.5 \times 10^{-8}$  gr/cm en las

curvas 3 y 2 respectivamente de la gráfica 5.2 y el valor de  $q$  permanece a  $4 \times 10^{-8}$  g/cm a 920000 cm. de deslizamiento. Se puede observar los valores tan pequeños. El latón no puede competir con estos materiales en estas condiciones de prueba pues en la gráfica 5.3 se aprecian valores sumamente altos de aproximadamente  $250 \times 10^{-8}$  gr/cm a lo largo de la prueba y hasta 200000 cm. de distancia de deslizamiento. El bronce comercial se experimentó también y los valores de pérdida de peso y razón de desgaste ambos contra distancia de deslizamiento se aprecian en las figuras 5.4 y 5.5 respectivamente. En la primera gráfica el bronce adquiere un valor muy competitivo de 0.1 gr. a 120000 cm. de deslizamiento, se mantiene con un incremento casi constante hasta alcanzar los valores de 0.47 gr. en la gráfica No.3 y de 0.38 gr. en la gráfica No.2, misma aceptabilidad en la gráfica 5.5 donde  $q$  se mantiene entre  $60 \times 10^{-8}$  y  $85 \times 10^{-8}$  a lo largo de toda la prueba. El Zinalco<sup>MR</sup> nuevamente compite con estas condiciones de prueba, tomando valores que se pueden apreciar en las gráficas 5.6 y 5.7. En la primera gráfica la pérdida de peso mostró un valor al inicio de 0.016 gr. a 120000 cm. de deslizamiento aproximadamente y a 800000 cm. de deslizamiento alcanza valores de 0.063 gr. de peso perdido, esto en la curva No.1. Aunque los valores son mayores que los obtenidos con el aluminio 6061-T6 pues se ve en la gráfica 5.7 que a 120000 cm. de deslizamiento la razón de desgaste del Zinalco<sup>MR</sup> es de  $18 \times 10^{-8}$  gr/cm en la curva 1 y de casi  $20 \times 10^{-8}$  gr/cm en la curva No.2 pero decrecen estos valores a lo largo de la prueba hasta un mínimo apreciable en la curva No.1 de  $8 \times 10^{-8}$  gr/cm; por cuestión económica podemos sacrificar esta pequeña diferencia de 0.0086 gr. en estado transitorio y de 0.021 en estado estable pues el Zinalco<sup>MR</sup> es más barato que el aluminio 6061-T6. En las gráficas 5.8 y 5.9 se probó nuevamente con el duraluminio destacando y corroborando los valores obtenidos ya que al inicio de la prueba se detectaron valores muy pequeños y aceptables del orden de 0.01 gr. en pérdida de peso a 131900 cm y un valor de  $5 \times 10^{-8}$  g/cm. (mismo valor que en la gráfica 5.2) de la razón de desgaste a la misma distancia de deslizamiento, los valores siguen siendo aceptables hasta los 400000 cm de deslizamiento pero a partir de ahí aumentan de manera tal que llegan a obtener valores

nada aceptables con lo que podemos decir que el Zinalco si podría sustituir al aluminio 6061-T6 en algunas aplicaciones. En las últimas gráficas de esta serie, 5.10 y 5.11, se aprecian los valores que se obtienen después de ensayar con bronce salmenac 773, en la gráfica 5.10 este bronce toma valores de 0.2 gr. a 131900 cm de deslizamiento y su aumento constante hace que a 791680 cm de deslizamiento este material tenga una pérdida de peso de 1.1 g. En la grafica 5.11 el valor de la razón de desgaste se mantiene en un valor de  $140 \times 10^{-8}$  gr/cm a casi 800000 cm de deslizamiento. Aunque este material es utilizado en la industria para aplicaciones antifricción y buena resistencia al desgaste, en seco y bajo estas condiciones de prueba el Zinalco y el aluminio 6061-T6 se comportan ligeramente mejor que esta aleación.

Las gráficas de la serie 6 nos proporcionan datos de materiales a 600 rpm; 1.5 kg de carga axial y a cada 20 min. de prueba. La gráfica 6.1 muestra un bronce comercial con valores de 0.15 gr. perdidos a 260000 cm de deslizamiento y en su segundo evento tiene 0.52 gr. de pérdida de peso y de 0.31 gr. en las curvas 3 y 1 respectivamente a 520000 cm de deslizamiento. La razón de desgaste es del rango de  $50 \times 10^{-8}$  g/cm a  $60 \times 10^{-8}$  g/cm, en toda la prueba, estos valores estan impresos en la gráfica 6.2. Se puede hacer la comparación con el Zinalco en las gráficas 6.3 y 6.4; en la primera la pérdida de peso que muestra el Zinalco<sup>MR</sup> fue menor a 0.05 gr. en las curvas 1 y 3; y de 0.1 en la curva No.2 a 230000 cm. de deslizamiento; a 520000 cm. de deslizamiento el valor más alto se detecta en la curva No.2 con un valor de 0.13 gr. y en la gráfica 6.4 el valor de la razón de desgaste es de  $38 \times 10^{-8}$  g/cm. en la curva No.2 y de  $14 \times 10^{-8}$  g/cm en las curvas 1 y 3, valores tanto de pérdida de peso como de razón de desgaste menores a las obtenidas con el bronce en las gráficas 6.1 y 6.2. Otro punto importante a favor de la aleación Zinalco<sup>MR</sup> es que a estas condiciones de prueba se comporta mejor que un material que en la actualidad tiene una aplicación preponderante.

Las gráficas de la serie 7.1 muestran al aluminio 6061-T6, latón y bronce comerciales en sus valores de AP-S y q-S. En la

gráfica 7.1 el aluminio 6061-T6 ó duraluminio toma valores de pérdida de peso muy aceptables en sus 3 puntos. a 0.06 gr. en 26000 cm recorridos y 0.21 gr. a 80000 cm. recorridos; el latón a 50000 cm de deslizamiento, valor intermedio de los anteriores se desgasta 0.15 gr. y a 80000 cm. tiene un valor de 0.2 gr. valor igual que el aluminio, esto se observa en la gráfica 7.2. Mientras que en la gráfica 7.4 el bronce a 50000 cm. tiene un valor de desgaste de 0.05 g. y aumenta a 80000 cm a 0.08 gr. valores menores que en las gráficas 7.1 y 7.2. La razón de desgaste de latón toma valores de  $300 \times 10^{-8}$  g/cm en la curva No.3 y de  $230 \times 10^{-8}$  g/cm. en la curva 2; la curva No.3 se encuentra entre las dos anteriores y observamos que esto es a 50000 cm. de deslizamiento, mientras que tienden a tomar un mismo valor a los 140000 cm. de deslizamiento de  $240 \times 10^{-8}$  g/cm, datos muy elevados. El bronce a 50000 cm de deslizamiento se desgasta a razón de  $100 \times 10^{-8}$ , y a 140000 cm. permanece casi al mismo valor, existe un máximo a 220000 cm. de deslizamiento pero a 320000 cm de deslizamiento toma un valor más coherente de  $130 \times 10^{-8}$  gr/cm, datos de suma importancia pues nos dan pauta para decir que a estas condiciones de prueba el Zinalco<sup>HR</sup> se comportó mejor que los materiales experimentados en esta serie y se aprecian los datos en la gráfica 7.6 ya que el Zinalco se desgasta a razón de  $120 \times 10^{-8}$  g/cm a 50000 cm de deslizamiento. Aunque vemos que el dato es mayor que en el bronce en el Zinalco la curva decae hasta desgastarse a razón de  $28 \times 10^{-8}$  g/cm a 380000 cm. de deslizamiento.

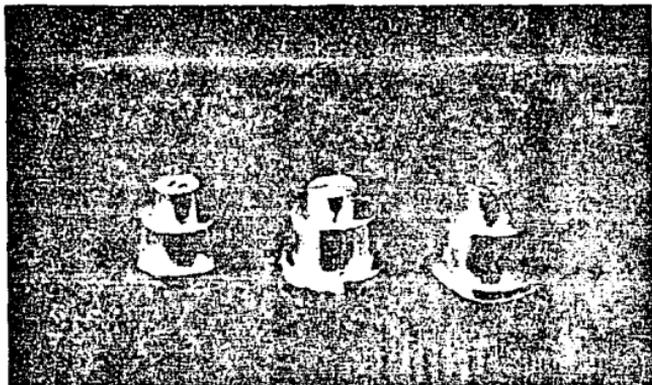
Las gráficas de la serie No.8, son de las más representativas y de las cuáles se puede obtener mucho provecho. No solo para este trabajo sino para trabajos posteriores donde se estudie el comportamiento del latón y bronce comerciales así como del Zinalco y el bronce SAE 660, este último muy utilizado actualmente. La gráfica 8.1 y 8.2 muestran la pérdida de peso y la razón de desgaste del latón a 600 rpm, carga axial de 3 kg. y a un tiempo estimado de 4 minutos entre evento y evento. Los valores calculados muestran que a 50000 cm. de deslizamiento o a los 4 primeros minutos de prueba el latón se desgastó 0.2 gr. La gráfica es en ascendencia y a los 20 minutos de prueba o 210000 cm de

deslizamiento el material en estudio había perdido 0.82 g. de peso o desgastandose a razón de  $400 \times 10^{-8}$  g/cm. en toda la prueba. la gráfica 8.3 y 8.4 muestran al bronce comercial como material de prueba y como fué obvio a los 50000 cm de deslizamiento había perdido 0.07 gr. de peso y a los 270000 cm de deslizamiento perdió solamente 0.35 gr. dando un valor aproximado de razón de desgaste igual a  $135 \times 10^{-8}$ , es decir, el comportamiento se ve que es mejor que el material anterior. Tocó el turno al Zinalco dandonos valores de 0.035 gr. de pérdida de peso a los 50000 cm de prueba y de 0.05 gr. a los 160000 cm de recorrido, calculando un valor en la gráfica 8.6 de  $60 \times 10^{-8}$  a  $80 \times 10^{-8}$  (gr/cm) de razón de desgaste a los mismos 50000 cm. de prueba y como en la serie anterior la misma gráfica muestra una descendencia cte. donde pudimos calcular aproximadamente  $33 \times 10^{-8}$  gr/cm. a los 160000 cm de deslizamiento.

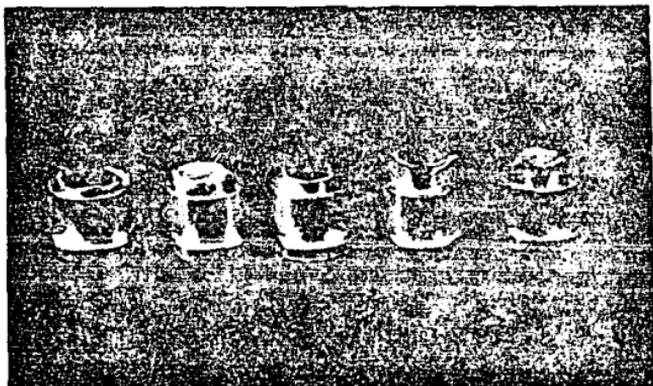
Todavía sin poder dar algun comentario pues faltaba verificar el comportamiento del bronce SAE 660 ó bronce salmenac 773 a las mismas condiciones de prueba (600 rpm, 3 kg de carga axial y 4 minutos entre evento y evento). Este se aprecia en la gráfica 8.7 y se observa una pérdida de peso de 0.08 gr. a los 50000 cm de prueba, aumentando constantemente. hasta perder 0.28 gr. a los 160000 cm y de 1.4 gr a los 520000 cm. de deslizamiento, desgastandose el material a razón de  $170 \times 10^{-8}$  gr/cm a los 50000 cm. de deslizamiento y de  $250 \times 10^{-8}$  gr/cm a los 540000 cm de deslizamiento.

Se observa que en la serie 7 y 8 el Zinalco se comportó mejor que los demas materiales ya que además de obtener valores pequeños en la transición, tienden a disminuir en estado estable.

En las siguientes fotografías se muestran las probetas antes y después del ensayo.

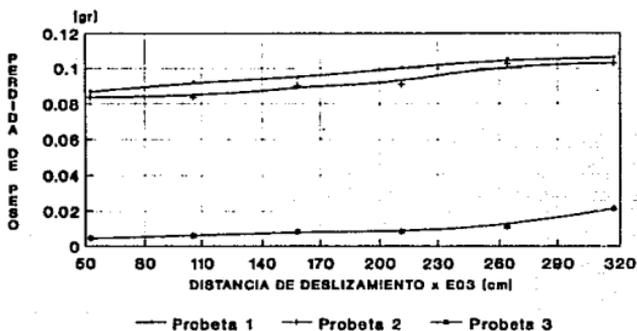


Fotografía VII.1 *Probetas de latón, Aluminio y Bronce SAE 660. Antes del desgaste.*



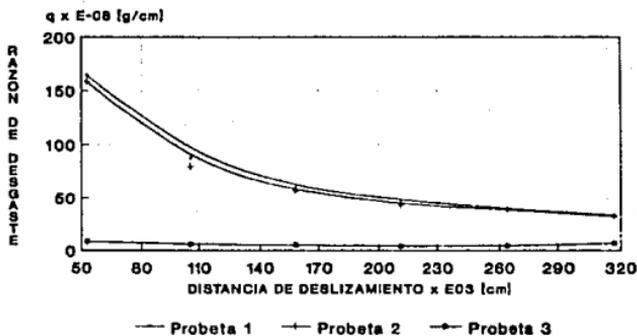
Fotografía VII.2. *Probetas de Latón, Aluminio, Bronce, Bronce SAE 660 y Zinalco.*

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ALUMINIO



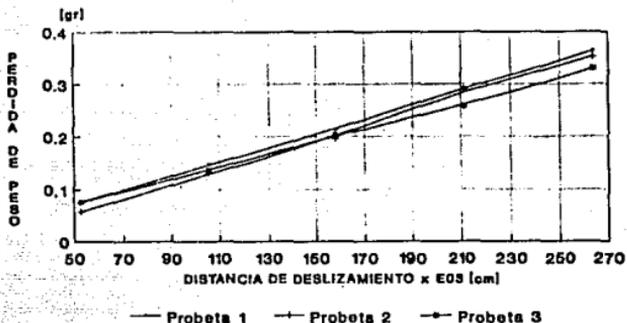
GRAFICA 1.1    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 \*    600rpm    CARGA=1kg  
 .    INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ALUMINIO 6061-T6



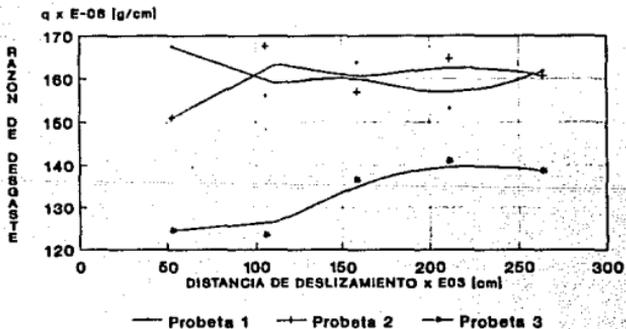
GRAFICA 1.2    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 \*    600rpm    CARGA=1kg  
 .    INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA L A T O N



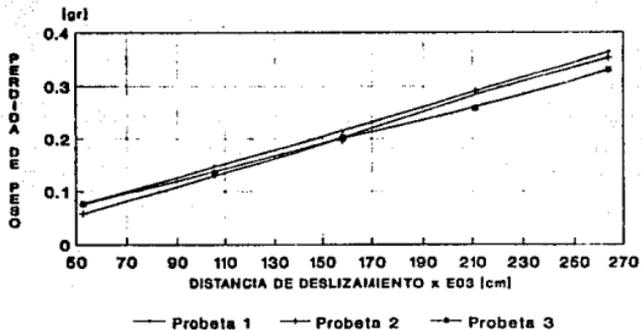
GRAFICA 1.3    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm    CARGA=1kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA L A T O N



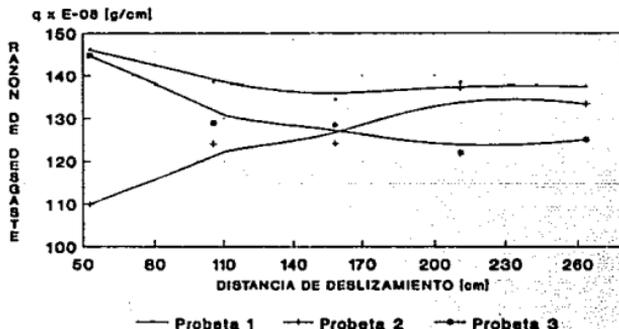
GRAFICA 1.4    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm    CARGA=1kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA L A T O N



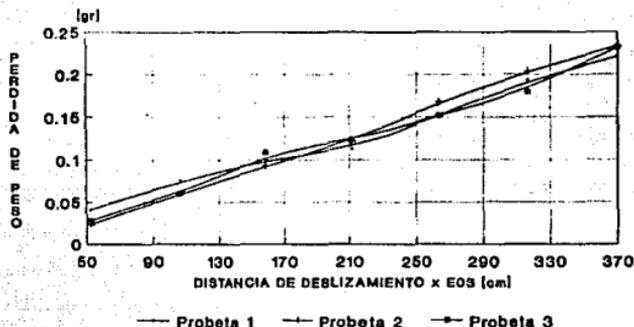
GRAFICA 1.3      PARAMETROS DE PRUEBA:  
 •                      600rpm      CARGA=1kg  
 •                      INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA L A T O N



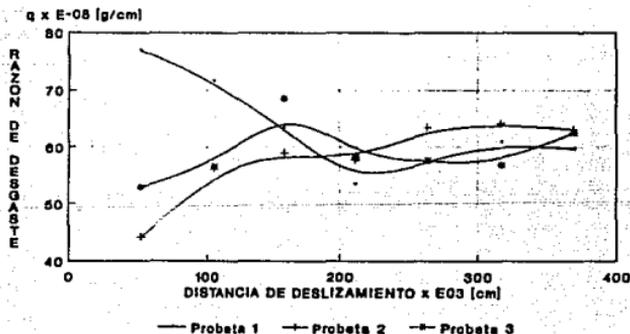
GRAFICA 1.5      PARAMETROS DE PRUEBA:  
 •                      600rpm      CARGA=1kg  
 •                      INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE



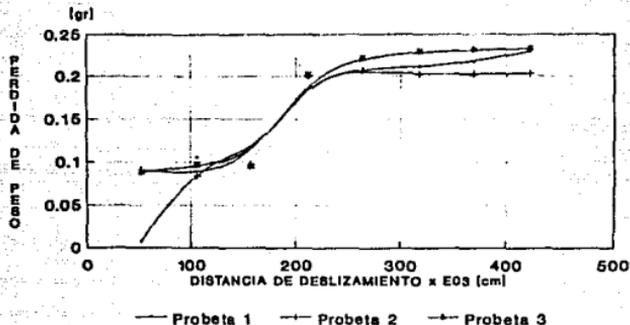
GRAFICA 1.6    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 • 600rpm    CARGA=1kg  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE



GRAFICA 1.7    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 • 600rpm    CARGA=1kg  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

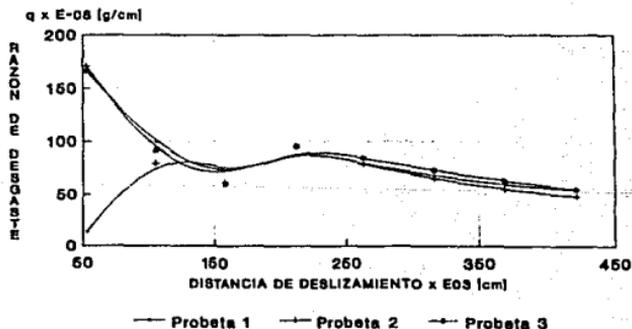
## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ZINALCO



GRAFICA 1.8

PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm CARGA=1kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

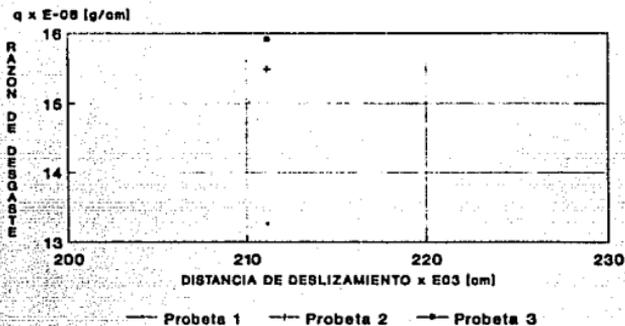
## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ZINALCO



GRAFICA 1.9

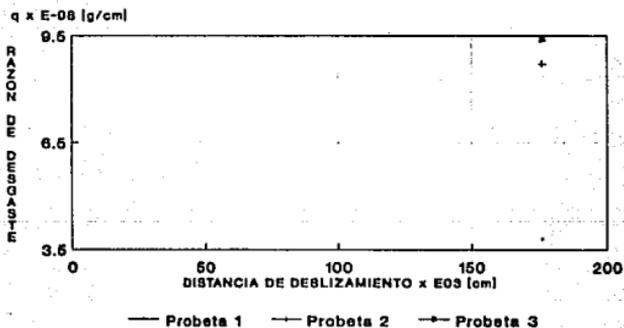
PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm CARGA=1kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ZINALCO



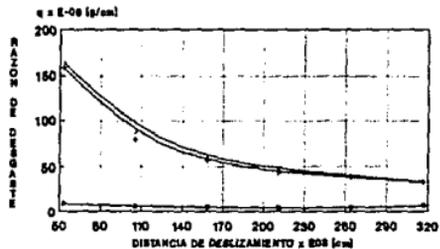
GRAFICA 1.10    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm    CARGA=1kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 16min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ZINALCO



GRAFICA 1.11    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 2000rpm    CARGA=1kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

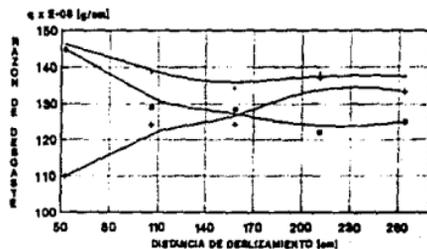
### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ALUMINIO 6061-T6



— Probeta 1 — Probeta 2 — Probeta 3

GRAFICA 18 PARAMETROS DE PRUEBA:  
• 800rpm CARGA=9g  
• INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA LATON



— Probeta 1 — Probeta 2 — Probeta 3

GRAFICA 15 PARAMETROS DE PRUEBA:  
• 800rpm CARGA=9g  
• INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

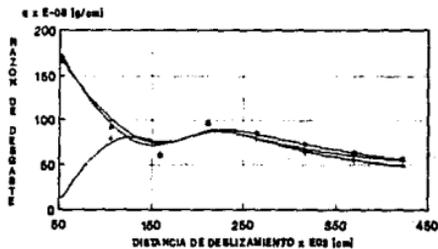
### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE



— Probeta 1 — Probeta 2 — Probeta 3

GRAFICA 17 PARAMETROS DE PRUEBA:  
• 800rpm CARGA=9g  
• INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

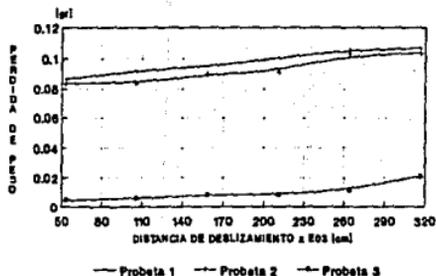
### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ZINCALCO



— Probeta 1 — Probeta 2 — Probeta 3

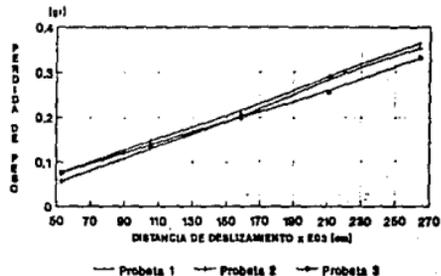
GRAFICA 19 PARAMETROS DE PRUEBA:  
• 800rpm CARGA=9g  
• INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ALUMINIO



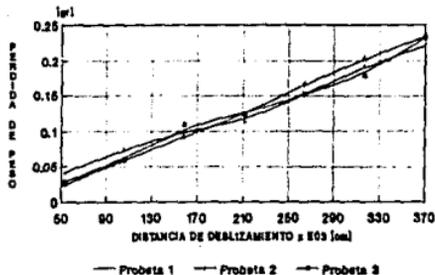
GRAFICA 11 PARAMETROS DE PRUEBA:  
• 600rpm CARGA=9g  
• INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA LATON



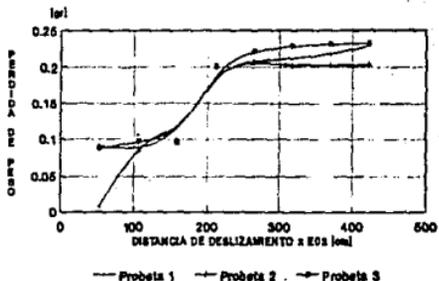
GRAFICA 12 PARAMETROS DE PRUEBA:  
• 600rpm CARGA=9g  
• INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE



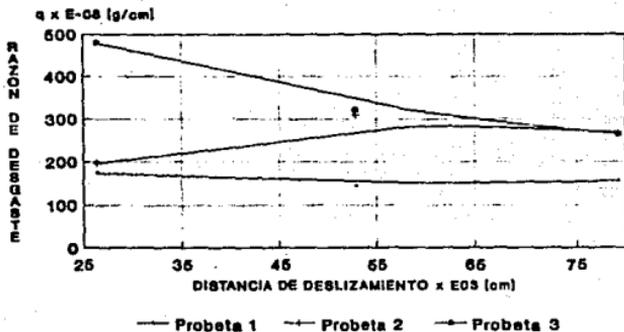
GRAFICA 13 PARAMETROS DE PRUEBA:  
• 600rpm CARGA=9g  
• INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ZINCALCO



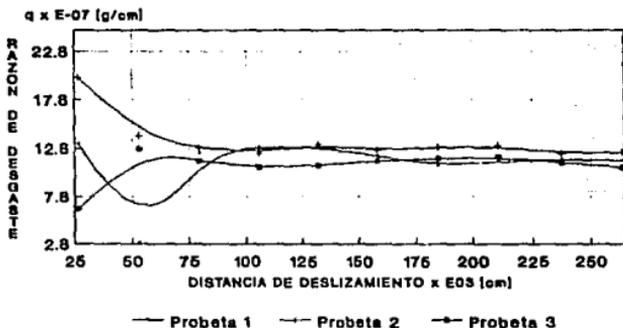
GRAFICA 14 PARAMETROS DE PRUEBA:  
• 600rpm CARGA=9g  
• INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ALUMINIO



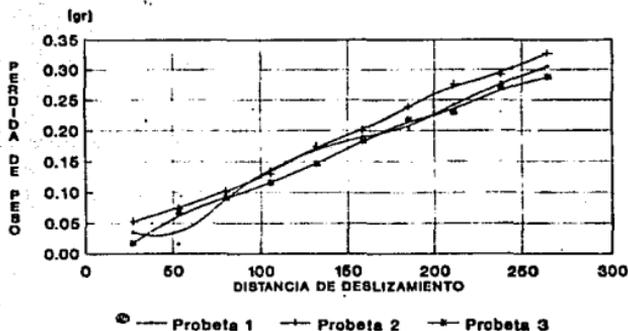
GRAFICA 2.1 PRAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm CARGA=0.5kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 2min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA LATON



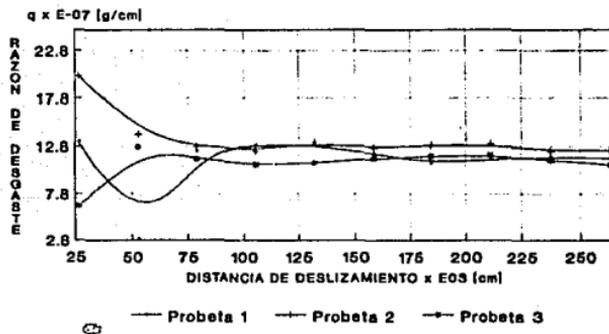
GRAFICA 2.3 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm CARGA=0.5kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 2min

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA L A T O N



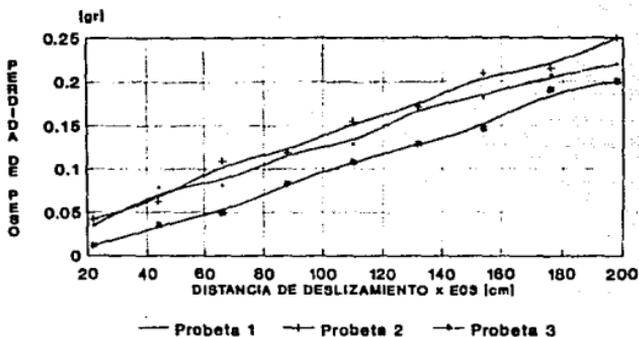
GRAFICA 2.2    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm    CARGA=0.5kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 2min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA L A T O N



GRAFICA 2.3    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm    CARGA=0.5kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 2min.

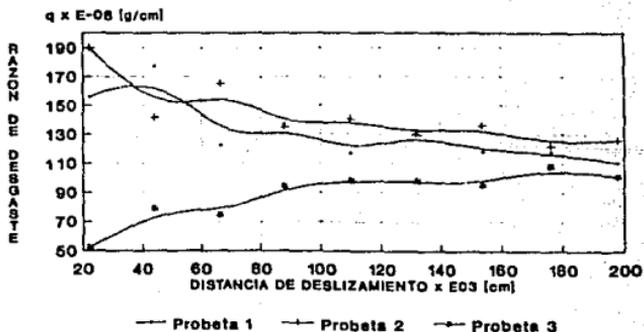
## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE



GRAFICA 2.4

PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm CARGA=0.5kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 2min.

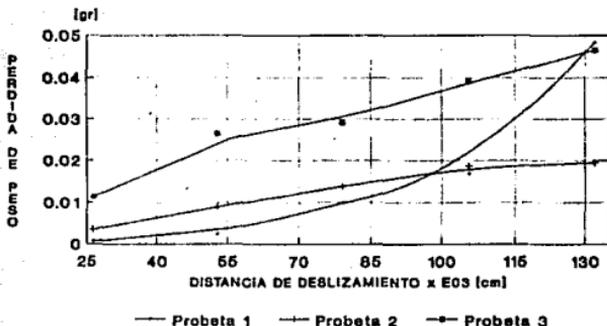
## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE



GRAFICA 2.5

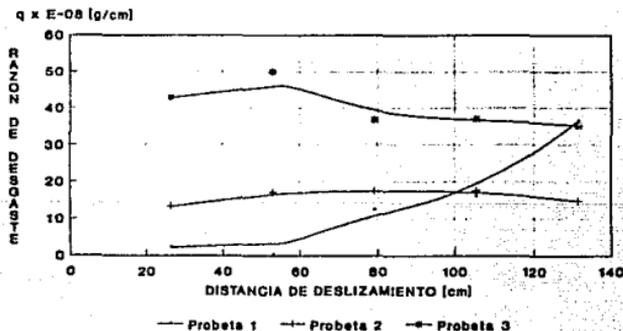
PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm CARGA=0.5kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 2min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE



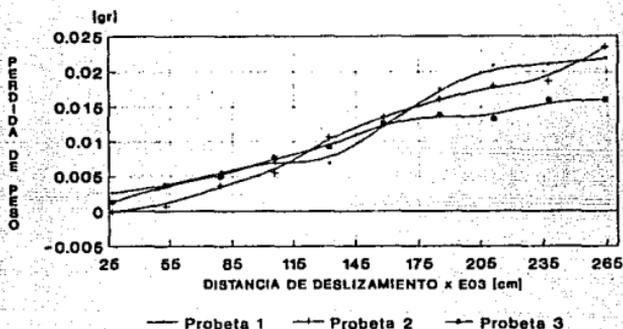
GRAFICA 2.6      PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm      CARGA=0.5kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 2min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE



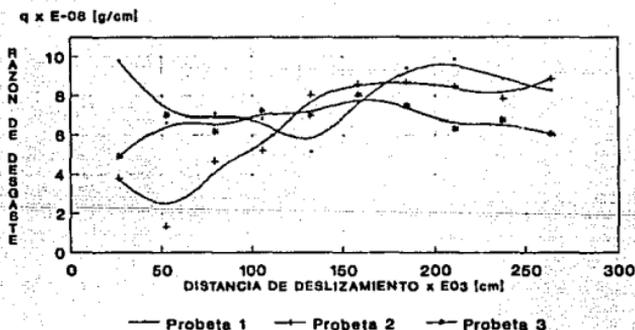
GRAFICA 2.7      PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm      CARGA=0.5kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 2min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ZINALCO



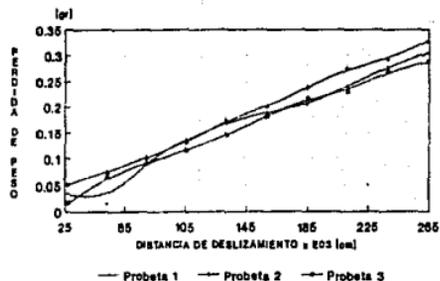
GRAFICA 2.0      PARAMETROS DE PRUEBA:  
 •                      600rpm    CARGA=0.5kg  
 •                      INCREMENTO DE TIEMPO 2min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ZINALCO



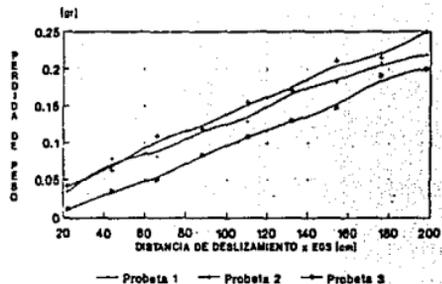
GRAFICA 2.9      PARAMETROS DE PRUEBA:  
 •                      600rpm    CARGA=0.5kg  
 •                      INCREMENTO DE TIEMPO 2min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA LATON



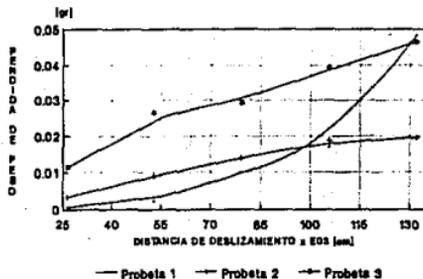
GRAFICA 2.2 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm CARGA=0.8kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 2min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE



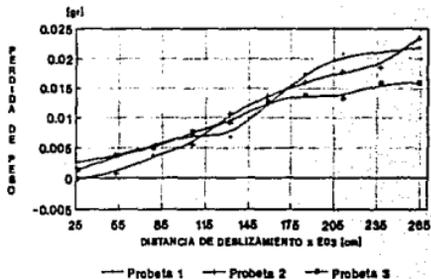
GRAFICA 2.4 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm CARGA=0.8kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 2min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE



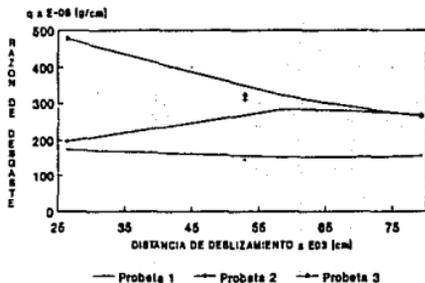
GRAFICA 2.6 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm CARGA=0.8kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 2min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ZINALCO



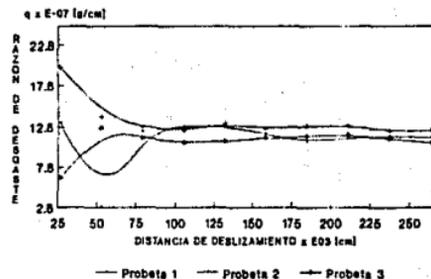
GRAFICA 2.8 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm CARGA=0.8kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 2min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ALUMINIO



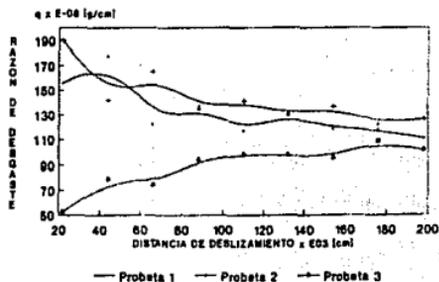
GRAFICA 2.1 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 \* 600rpm CARGA=0.5kg  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 2min

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA LATON



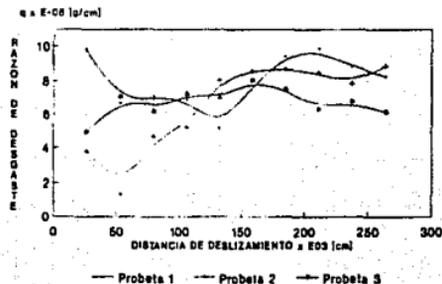
GRAFICA 2.3 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 \* 600rpm CARGA=0.5kg  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 2min

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE



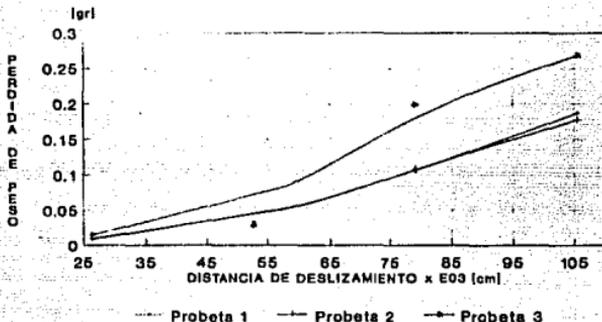
GRAFICA 2.2 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 \* 600rpm CARGA=0.5kg  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 2min

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ZINALCO



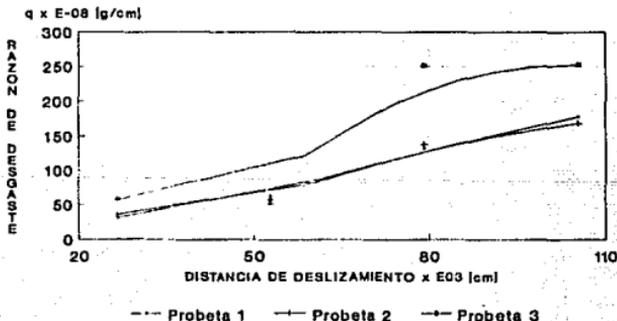
GRAFICA 2.4 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 \* 600rpm CARGA=0.5kg  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 2min

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ALUMINIO



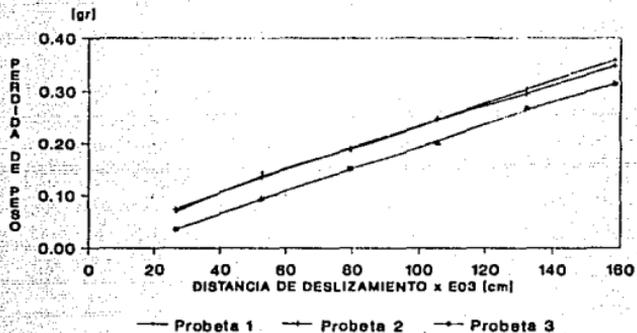
GRAFICA 3.1    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 300rpm    CARGA=1kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ALUMINIO



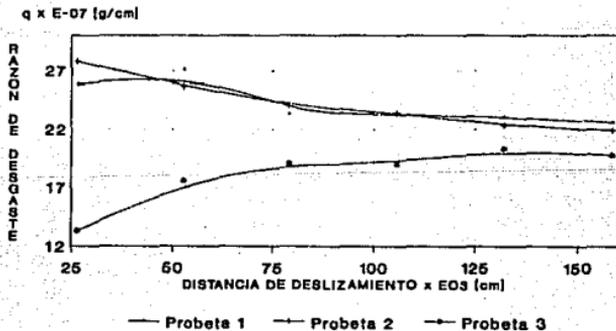
GRAFICA 3.2    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 300rpm    CARGA=1kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA L A T O N



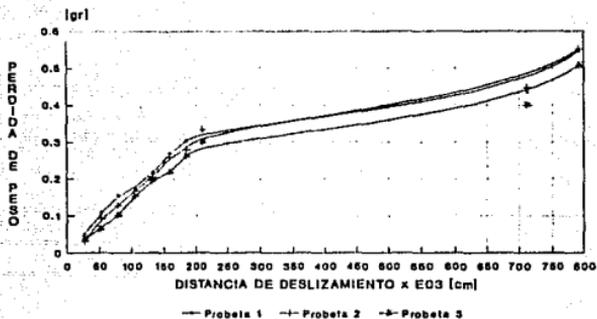
• **GRAFICA 3.3**      **PARAMETROS DE PRUEBA:**  
 • 300rpm    CARGA=1kg  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA L A T O N



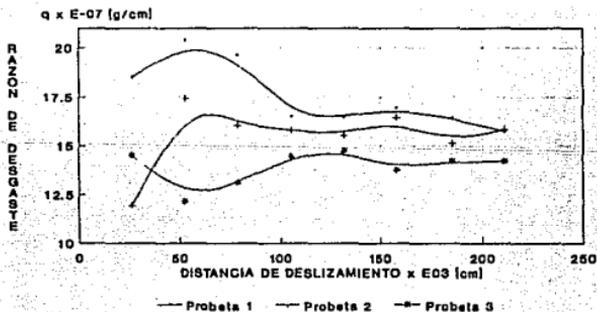
• **GRAFICA 3.4**      **PARAMETROS DE PRUEBA:**  
 • 300rpm    CARGA=1kg  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE



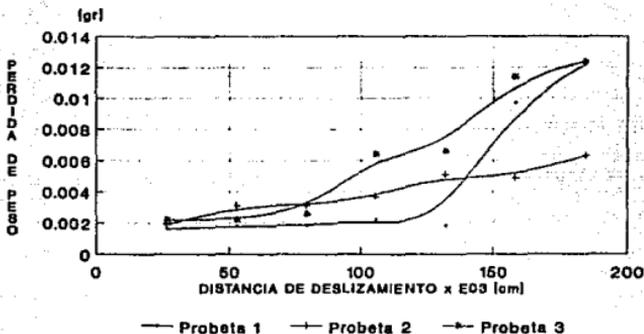
GRAFICA 3.5    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 • 300rpm    CARGA=1kg  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE



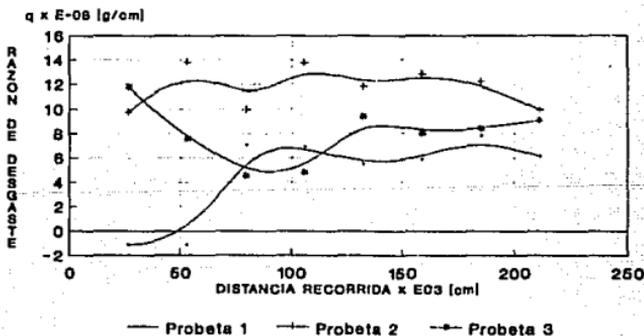
GRAFICA 3.6    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 • 300rpm    CARGA=1kg  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ZINALCO



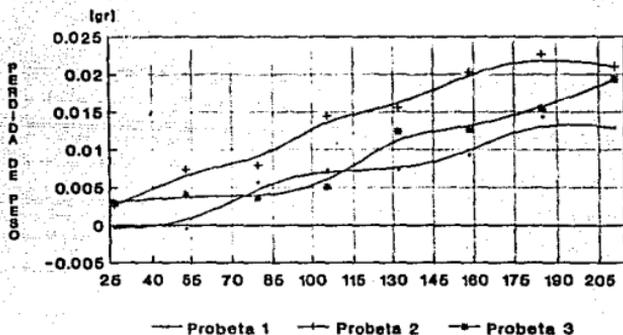
**GRAFICA 3.7**      **PARAMETROS DE PRUEBA:**  
 300rpm      CARGA=1kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ZINALCO



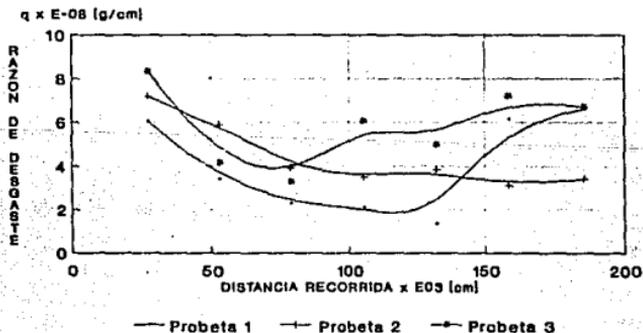
**GRAFICA 3.9**      **PARAMETROS DE PRUEBA:**  
 300rpm      CARGA=1kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ZINALCO \*



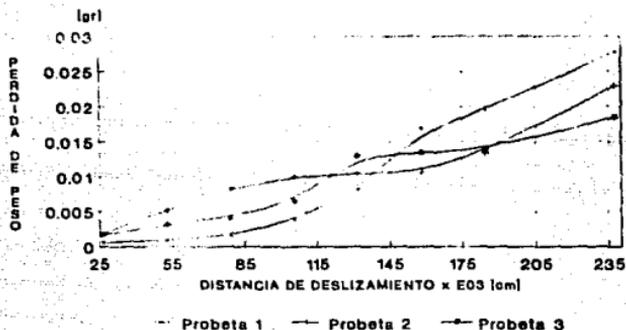
GRAFICA 3.8    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 \*    300rpm    CARGA=1kg  
 •    INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ZINALCO



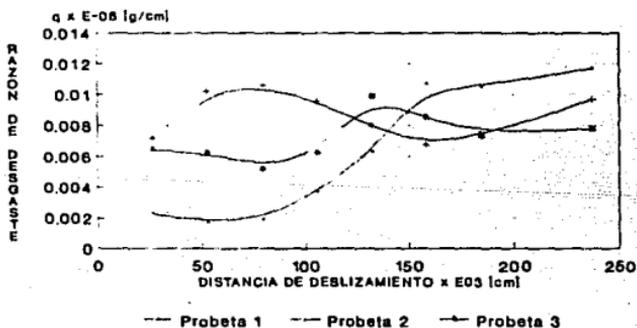
GRAFICA 3.10    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 \*    300rpm    CARGA=1kg  
 •    INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA DURALUMINIO



GRAFICA 3.11    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 300rpm    CARGA=1kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ALUMINIO 6061 T-6 (DURALUMINIO)



GRAFICA 3.12    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 300rpm    CARGA=1kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE SALMENAC 773

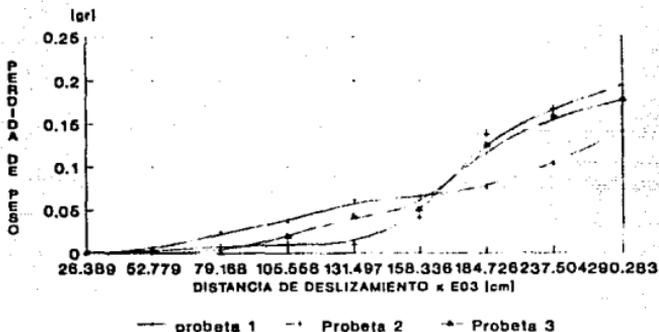
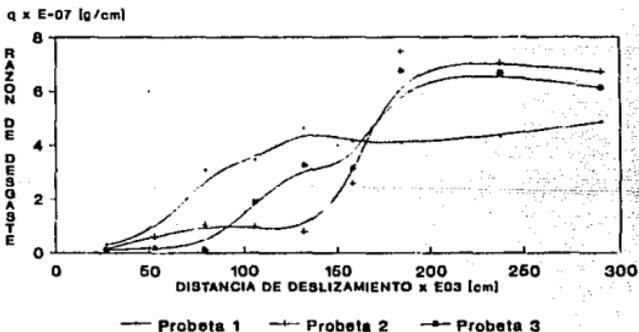


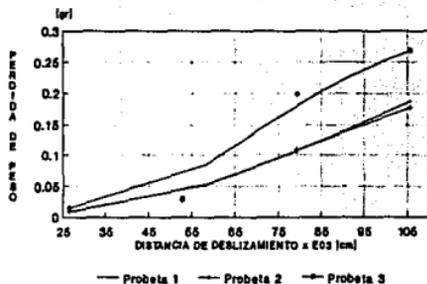
FIGURA 3.13    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 • 300rpm    CARGA • 1kg  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE SALMENAC 773



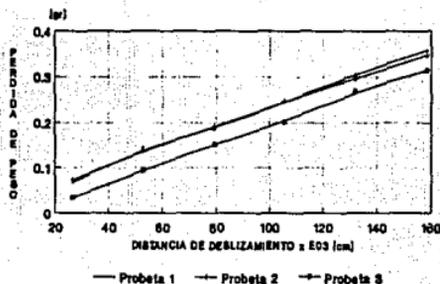
GRAFICA 3.14    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 • 300rpm    CARGA • 1kg  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ALUMINIO



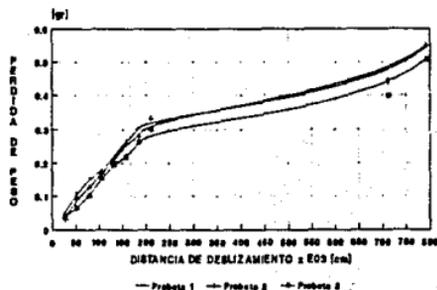
GRAFICA 3.1 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 • 300rpm CARGA=5g  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA LATON



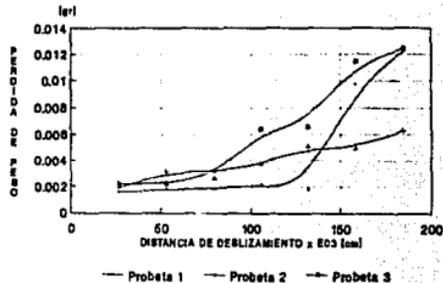
GRAFICA 3.2 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 • 300rpm CARGA=5g  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE



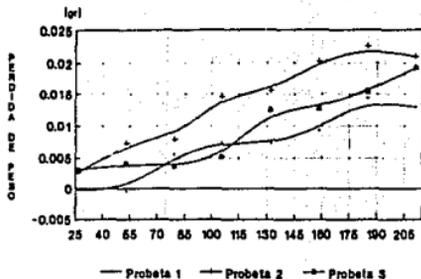
GRAFICA 3.6 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 • 300rpm CARGA=5g  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ZINCO



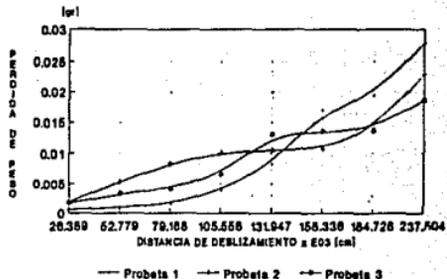
GRAFICA 3.7 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 • 300rpm CARGA=5g  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ZINALCO



GRAFICA 3.6 PARAMETROS DE PRUEBA:  
• 300rpm CARGA=1kg  
• INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ALUMINIO 6061-T6 (DURALUMINIO)



GRAFICA 3.11 PARAMETROS DE PRUEBA:  
• 300rpm CARGA=1kg  
• INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE SALMENAC 773

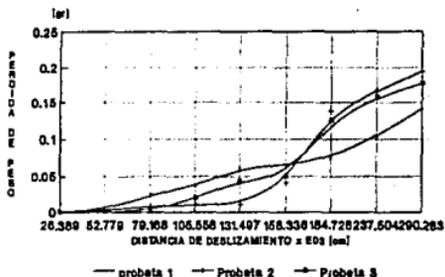
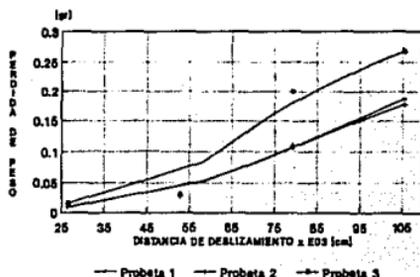


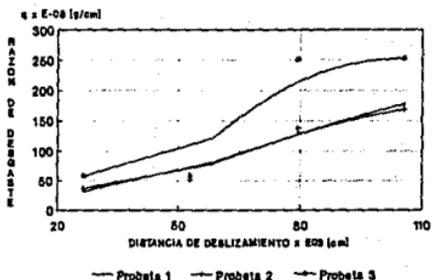
FIGURA 3.13 PARAMETROS DE PRUEBA:  
• 300rpm CARGA=1kg  
• INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ALUMINIO



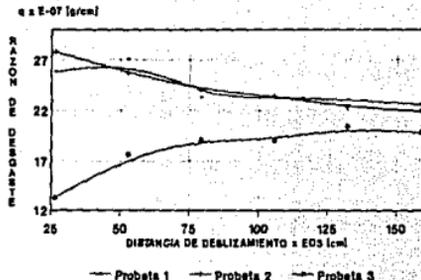
GRAFICA 3.1 PARAMETROS DE PRUEBA:  
• 300rpm CARGA=1kg  
• INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ALUMINIO



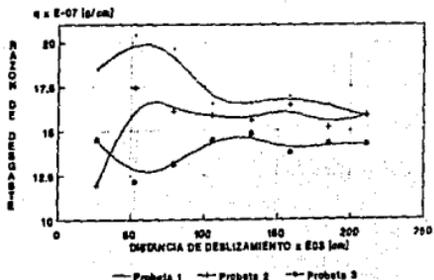
GRAFICA 3.2 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 \* 300grps CARGA=1g  
 \* INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA LATON



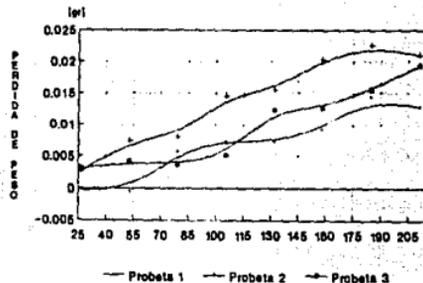
GRAFICA 3.4 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 \* 300grps CARGA=1g  
 \* INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE



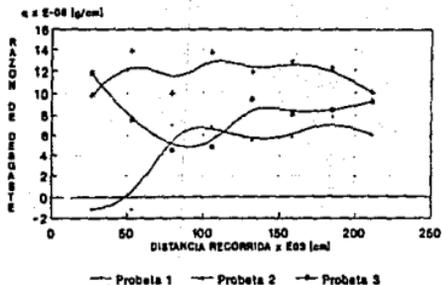
GRAFICA 3.6 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 \* 300grps CARGA=1g  
 \* INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ZINALCO



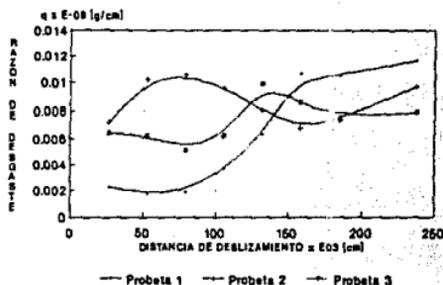
GRAFICA 3.8 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 \* 300grps CARGA=1g  
 \* INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ZINALCO



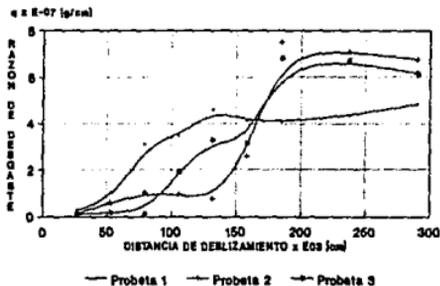
GRAFICA 3.9 PARAMETROS DE PRUEBA:  
300rpm CARGA=10g  
INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ALUMINIO 6061 T-6 (DURALUMINIO)



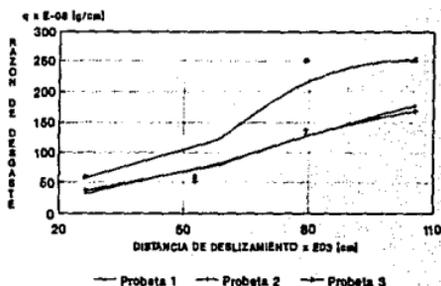
GRAFICA 3.12 PARAMETROS DE PRUEBA:  
300rpm CARGA=10g  
INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE SALMENAC 773



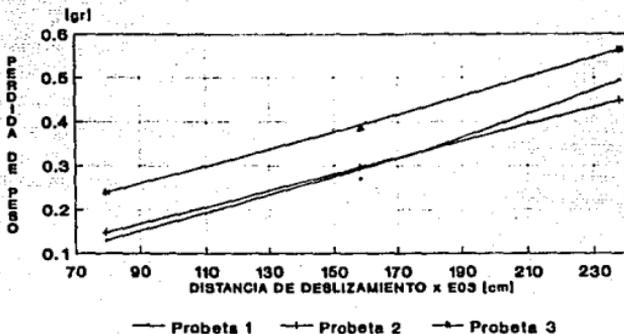
GRAFICA 3.14 PARAMETROS DE PRUEBA:  
300rpm CARGA=10g  
INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ALUMINIO



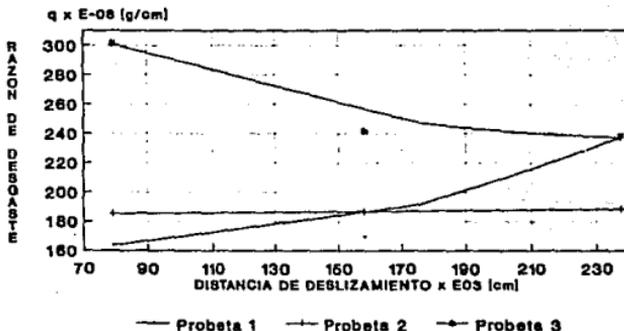
GRAFICA 3.2 PARAMETROS DE PRUEBA:  
300rpm CARGA=10g  
INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA LATON



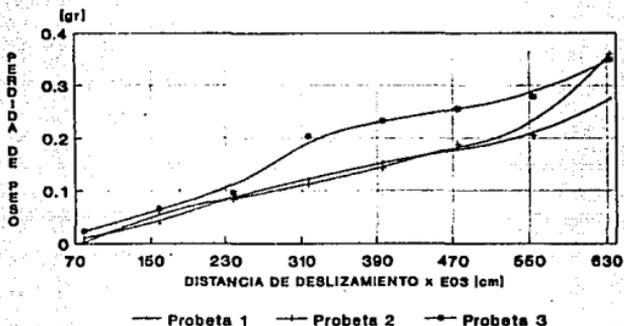
GRAFICA 4.1    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 • 900rpm    CARGA=1kg  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA LATON



GRAFICA 4.2    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 • 900rpm    CARGA=1kg  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

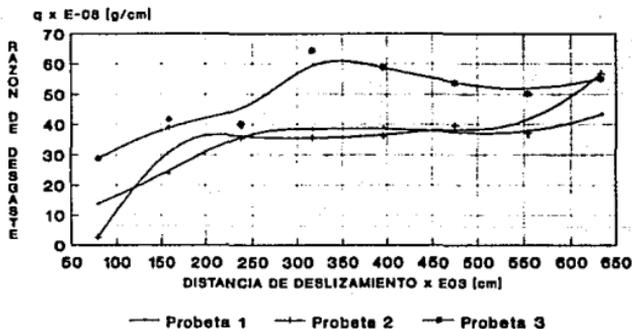
## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE



GRAFICA 4.3

PARAMETROS DE PRUEBA:  
 900rpm CARGA=1kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

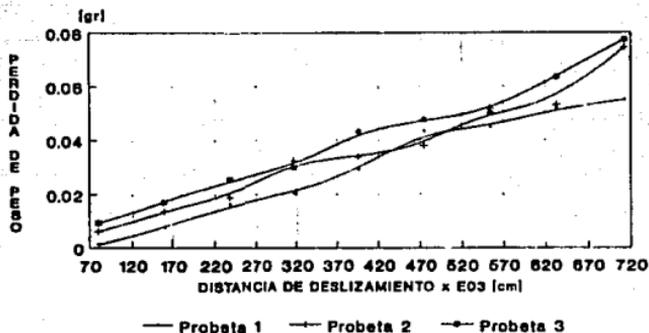
## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE



GRAFICA 4.4

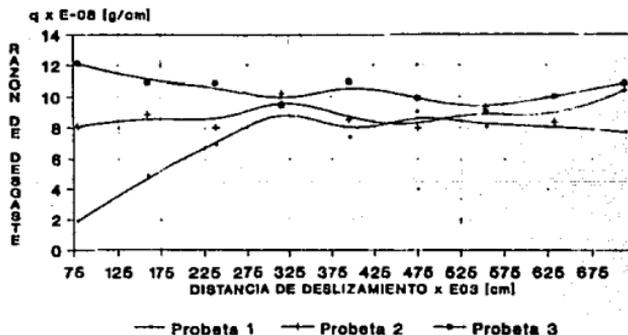
PARAMETROS DE PRUEBA:  
 900rpm CARGA=1kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ZINALCO



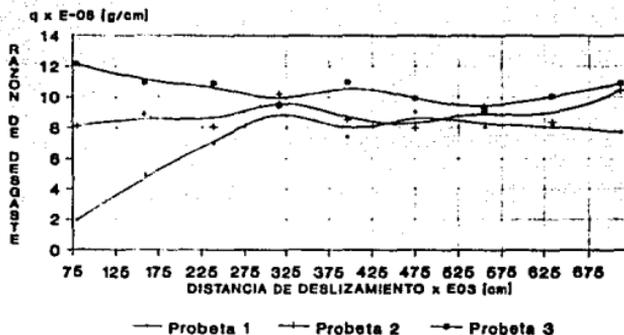
**GRAFICA 4.5**      **PARAMETROS DE PRUEBA:**  
 • 900rpm      CARGA=1kg  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ZINALCO



**GRAFICA 4.6**      **PARAMETROS DE PRUEBA:**  
 • 900rpm      CARGA=1kg  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ZINALCO

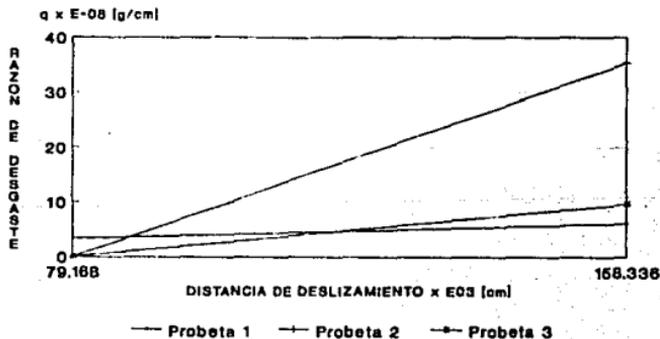


GRAFICA 4.8

PARAMETROS DE PRUEBA:

900rpm CARGA=1kg  
INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ALUMINIO 6061-T6 (DURALUMINIO)

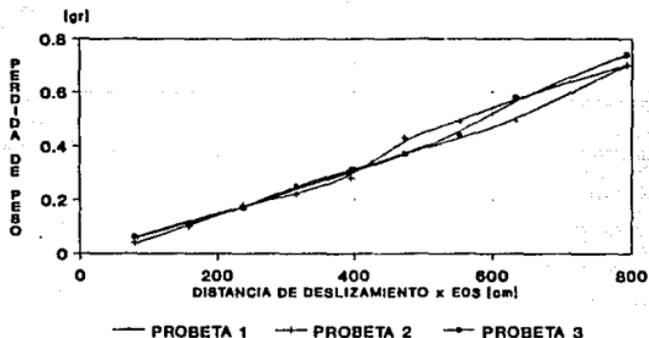


GRAFICA 4.8

PARAMETROS DE PRUEBA:

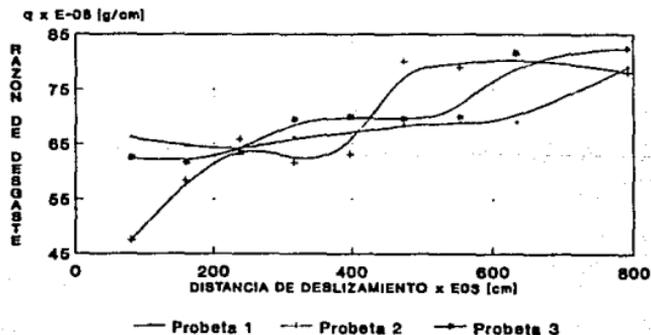
900rpm CARGA=0.5kg  
INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE SALMENAC 773



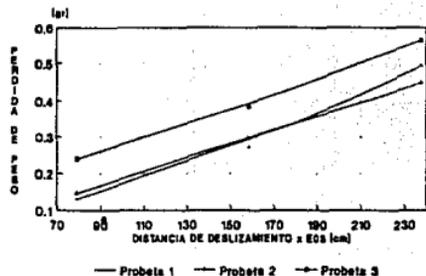
GRAFICA 4.0    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 900rpm    CARGA=1kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE SALMENAC 773



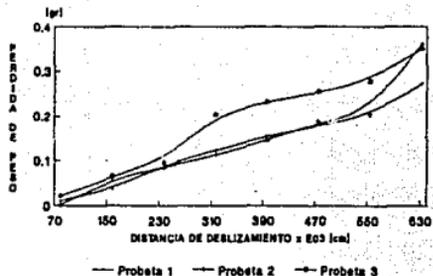
GRAFICA 4.10    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 900rpm    CARGA=1kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA LATON



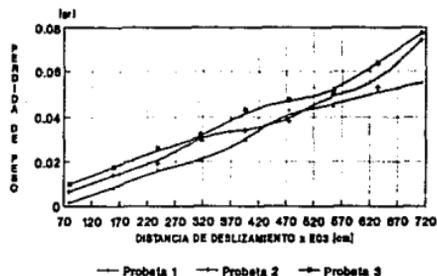
GRAFICA 4.1 PARAMETROS DE PRUEBA:  
• 800rpm CARGA=5g  
• INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE



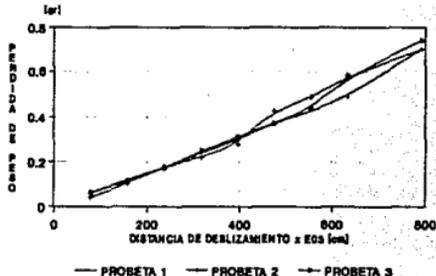
GRAFICA 4.3 PARAMETROS DE PRUEBA:  
• 800rpm CARGA=5g  
• INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ZINALCO



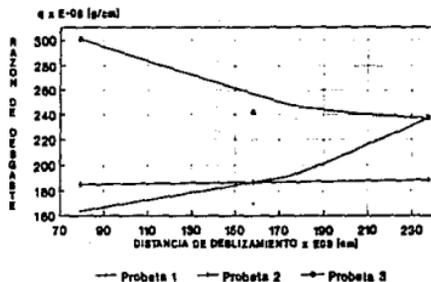
GRAFICA 4.5 PARAMETROS DE PRUEBA:  
• 800rpm CARGA=5g  
• INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE SALMENAC 773



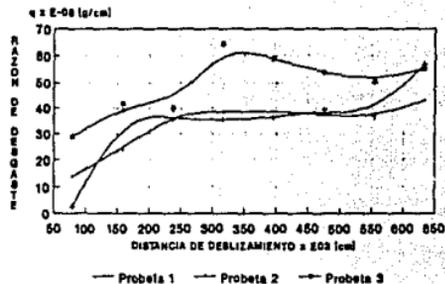
GRAFICA 4.9 PARAMETROS DE PRUEBA:  
• 800rpm CARGA=5g  
• INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA LATON



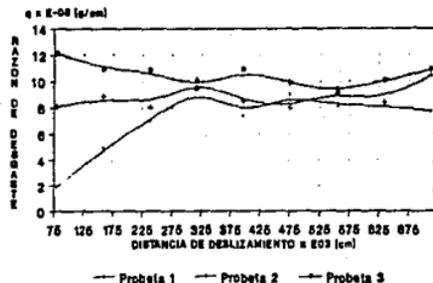
GRAFICA 4.2 PARAMETROS DE PRUEBA:  
800rpm CARGA=8g  
INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE



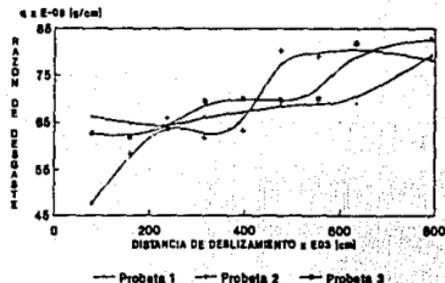
GRAFICA 4.4 PARAMETROS DE PRUEBA:  
800rpm CARGA=8g  
INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ZINALCO



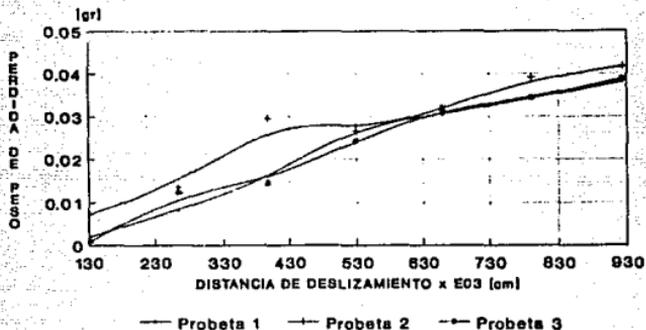
GRAFICA 4.8 PARAMETROS DE PRUEBA:  
800rpm CARGA=8g  
INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE SALMENAC 773



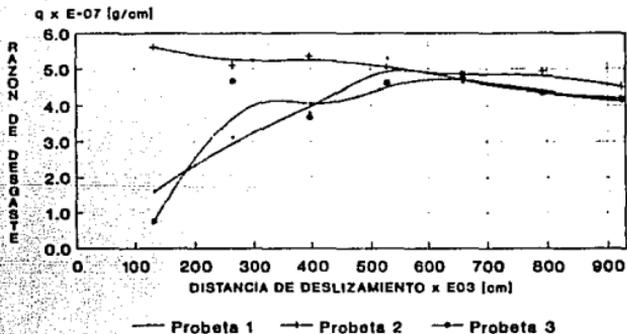
GRAFICA 4.10 PARAMETROS DE PRUEBA:  
800rpm CARGA=8g  
INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ALUMINIO 6061-T6



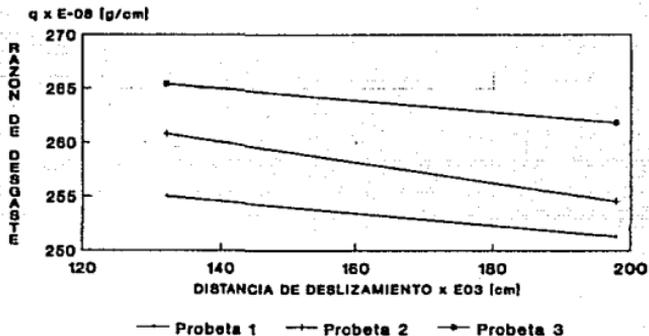
GRAFICA 5.1    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm    CARGA=1.5kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 10min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ALUMINIO 7071-T6



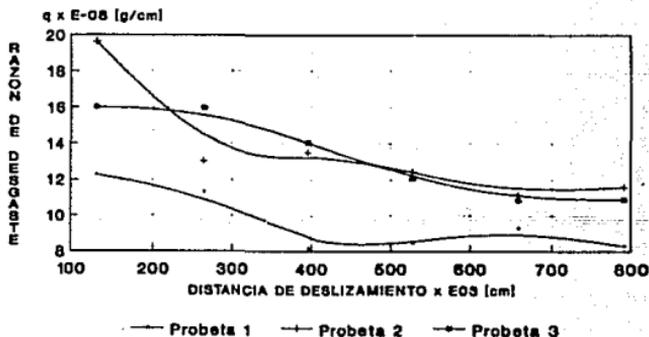
GRAFICA 5.2    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm    CARGA=1.5kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 10min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA LATON



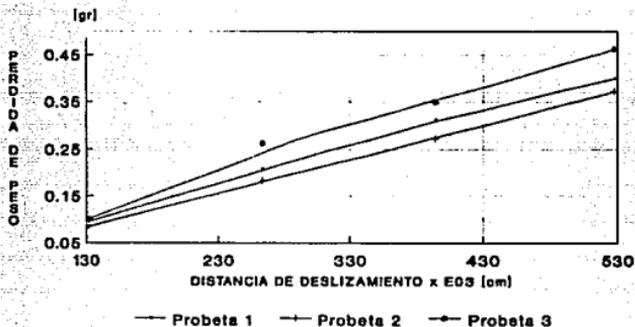
GRAFICA 5.3      PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm      CARGA=1.5kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 10min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ZINALCO



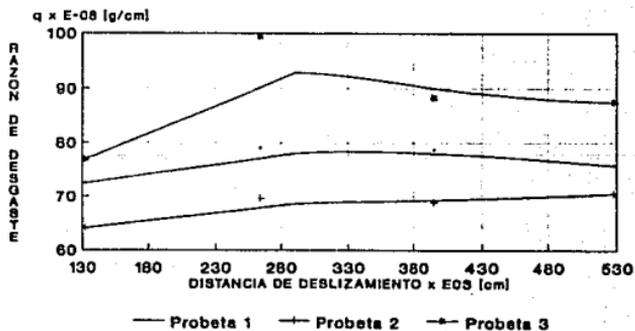
GRAFICA 5.7      PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm      CARGA=1.5kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 10min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE



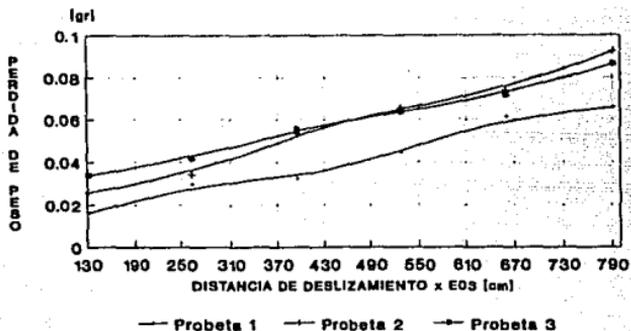
GRAFICA 5.4 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm CARGA=1.6kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 10min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE



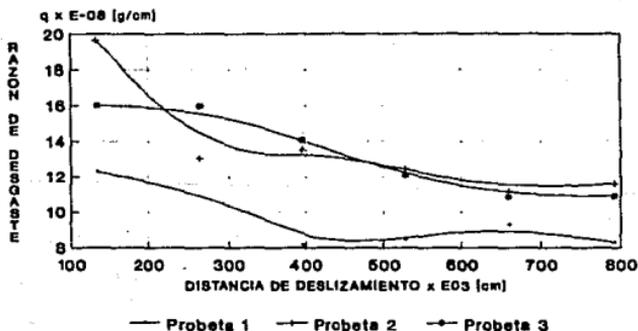
GRAFICA 5.5 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm CARGA=1.6kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ZINALCO



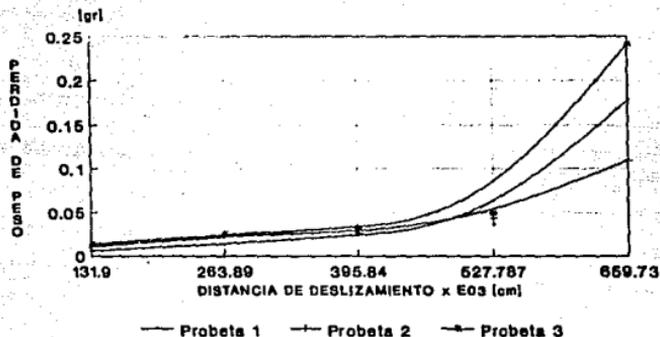
GRAFICA 5.6    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 • 800rpm    CARGA=1.5kg  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 10min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ZINALCO



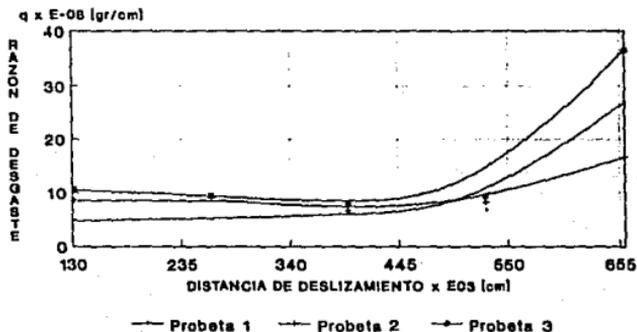
GRAFICA 5.7    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 • 800rpm    CARGA=1.5kg  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 10min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ALUMINIO 6061-T6 (DURALUMINIO)



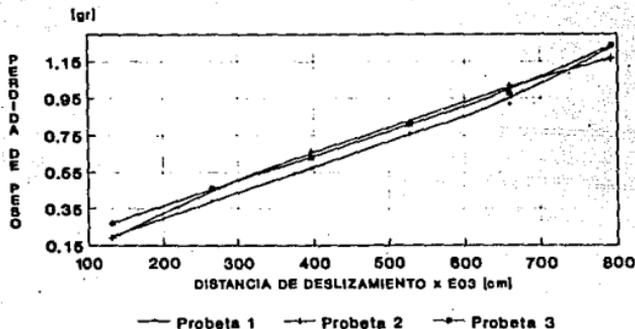
**GRAFICA 5.8**   
 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm    CARGA=1.5kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 10min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ALUMINIO 6061-T6 (DURALUMINIO)



**GRAFICA 5.9**   
 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm    CARGA=1.5kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 10min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE SALMENAC 773

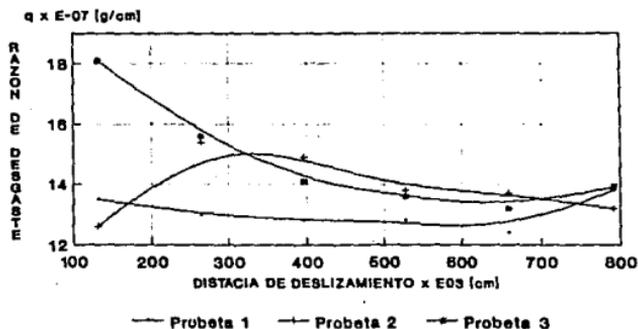


GRAFICA 5.10

PARAMETROS DE PRUEBA:

600rpm CARGA=1.5kg  
INCREMENTO DE TIEMPO 10min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE SALMENAC 773

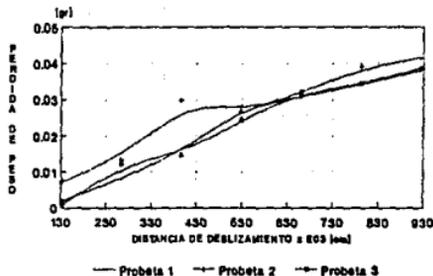


GRAFICA 5.11

PARAMETROS DE PRUEBA:

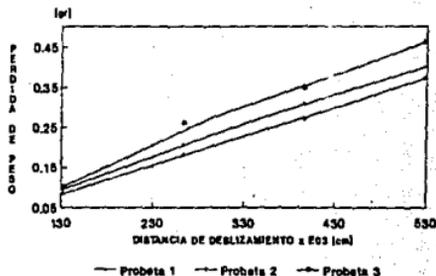
600rpm CARGA=1.5kg  
INCREMENTO DE TIEMPO 10min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ALUMINIO 6061-T6



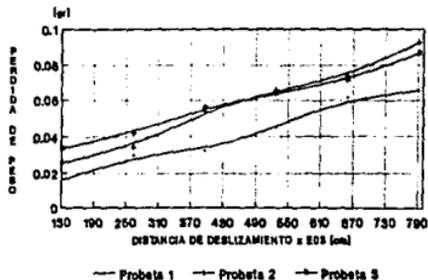
GRAFICA 6.1 PARAMETROS DE PRUEBA:  
800rpm CARGA=1.9kg  
INCREMENTO DE TIEMPO 10min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE



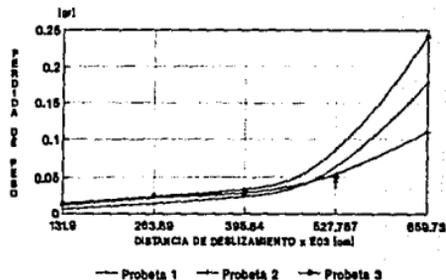
GRAFICA 6.4 PARAMETROS DE PRUEBA:  
800rpm CARGA=1.5kg  
INCREMENTO DE TIEMPO 10min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ZINCALCO



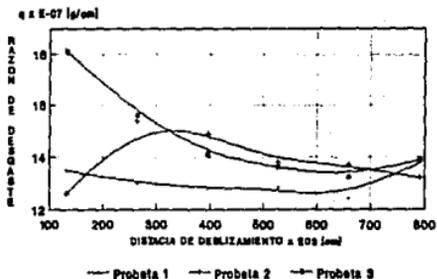
GRAFICA 6.8 PARAMETROS DE PRUEBA:  
600rpm CARGA=1.5kg  
INCREMENTO DE TIEMPO 10min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ALUMINIO 6061-T6 (DURALUMINIO)



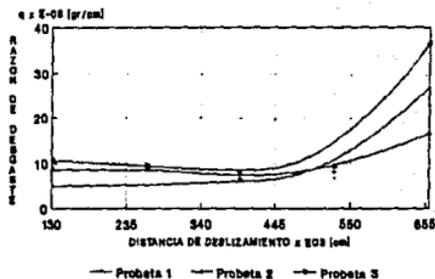
GRAFICA 6.8 PARAMETROS DE PRUEBA:  
800rpm CARGA=1.5kg  
INCREMENTO DE TIEMPO 10min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE SALMENAC 773



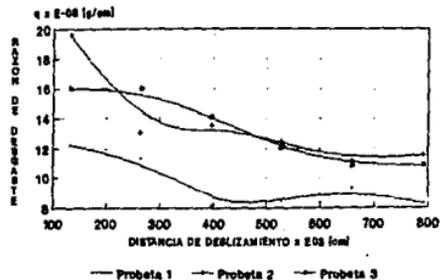
GRAFICA 8.11 PARAMETROS DE PRUEBA:  
• 600psi CARGA-1.5kg  
• INCREMENTO DE TIEMPO 10min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ALUMINIO 6061-T8 (DURALUMINIO)



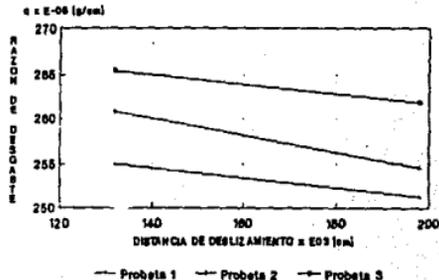
GRAFICA 8.9 PARAMETROS DE PRUEBA:  
• 600psi CARGA-1.5kg  
• INCREMENTO DE TIEMPO 10min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ZINALCO



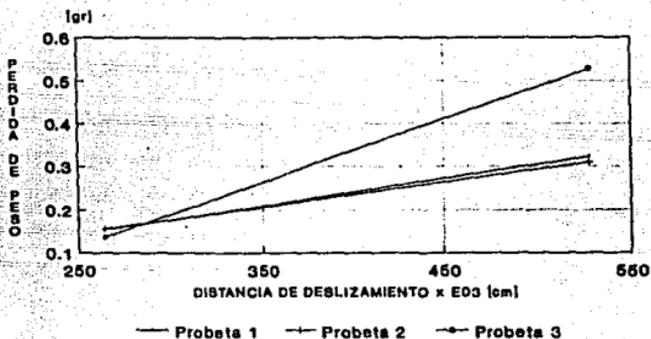
GRAFICA 8.7 PARAMETROS DE PRUEBA:  
• 600psi CARGA-1.5kg  
• INCREMENTO DE TIEMPO 10min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA LATON



GRAFICA 8.3 PARAMETROS DE PRUEBA:  
• 600psi CARGA-1.5kg  
• INCREMENTO DE TIEMPO 10min.

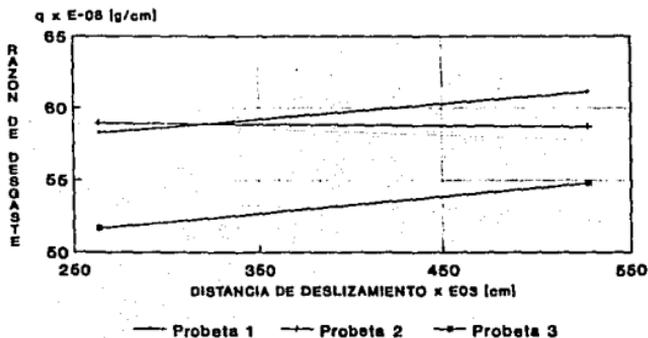
## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE



GRAFICA 6.1

PARAMETROS DE PRUEBA:  
 800rpm CARGA=1.5kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 20min.

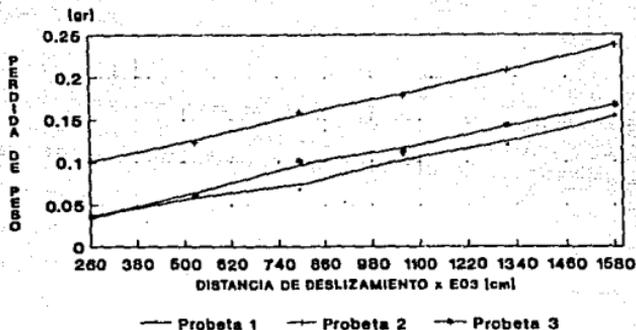
## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE



GRAFICA 6.2

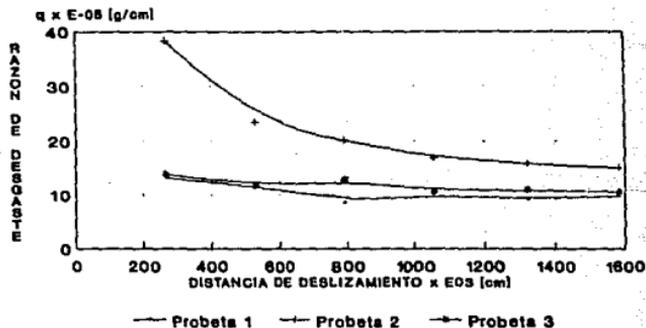
PARAMETROS DE PRUEBA:  
 800rpm CARGA=1.5kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 20min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ZINALCO



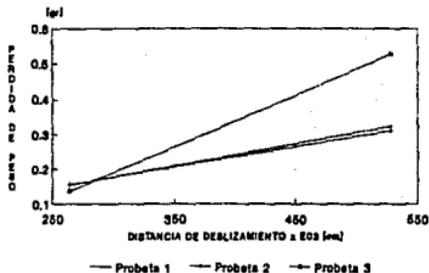
GRAFICA 6.3      PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm      CARGA=1.5kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 20min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ZINALCO



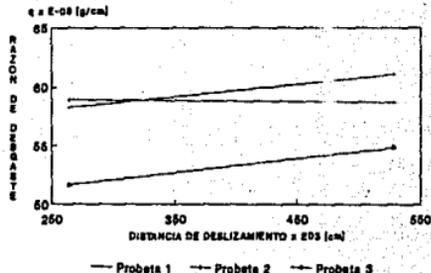
GRAFICA 6.4      PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm      CARGA=1.5kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 20min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE



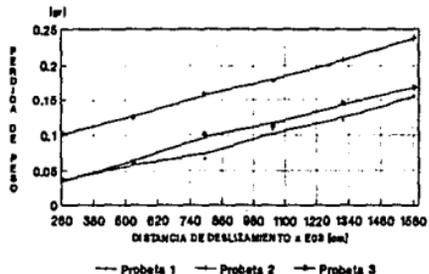
GRAFICA 8.1 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 \* 600rpm CARGA=1.5kg  
 \* INCREMENTO DE TIEMPO 20min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE



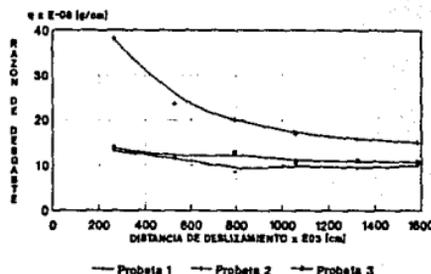
GRAFICA 8.2 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 \* 600rpm CARGA=1.5kg  
 \* INCREMENTO DE TIEMPO 20min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ZINALCO



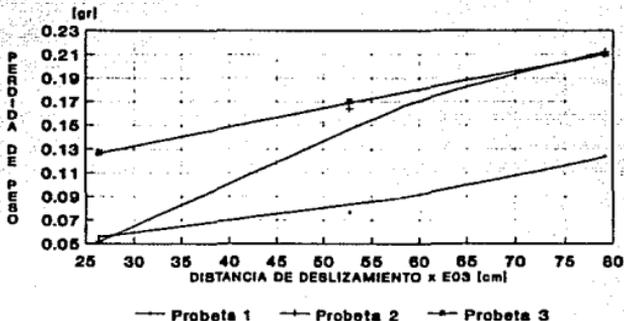
GRAFICA 8.3 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 \* 600rpm CARGA=1.5kg  
 \* INCREMENTO DE TIEMPO 20min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ZINALCO



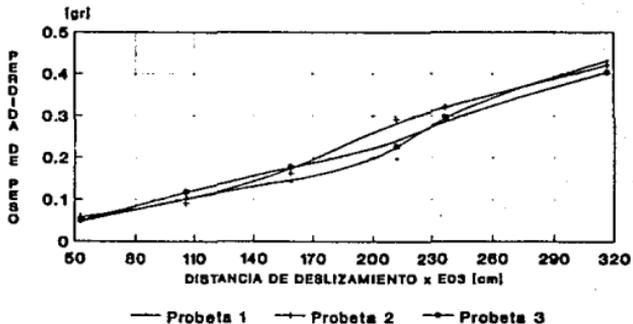
GRAFICA 8.4 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 \* 600rpm CARGA=1.5kg  
 \* INCREMENTO DE TIEMPO 20min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ALUMINIO 6061-T2



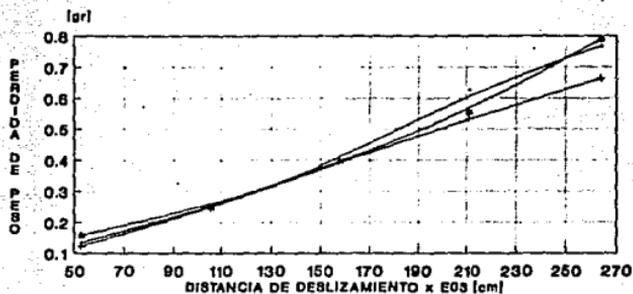
GRAFICA 7.1      PARAMETROS DE PRUEBA:  
 • 600rpm      CARGA=2kg  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 2min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE



GRAFICA 7.4      PARAMETROS DE PRUEBA:  
 • 600rpm      CARGA=2kg  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA LATON

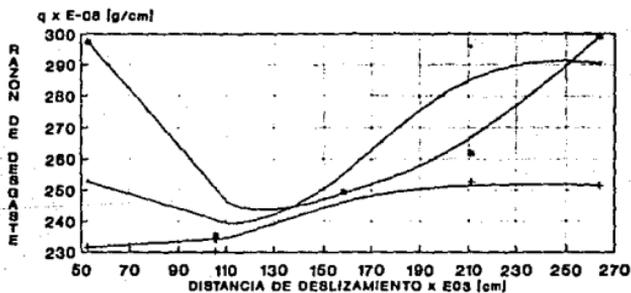


— Probeta 1    —○— Probeta 2    —□— Probeta 3

GRAFICA 7.2

PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm    CARGA=2kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA LATON

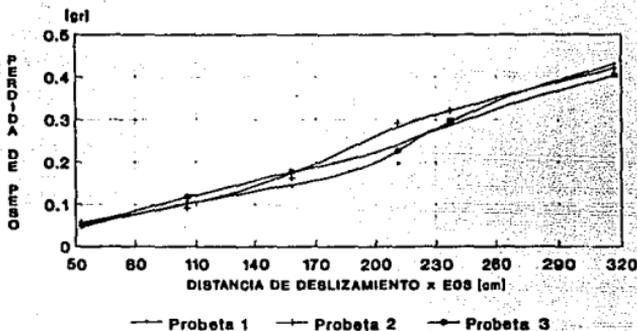


— Probeta 1    —○— Probeta 2    —□— Probeta 3

GRAFICA 7.3

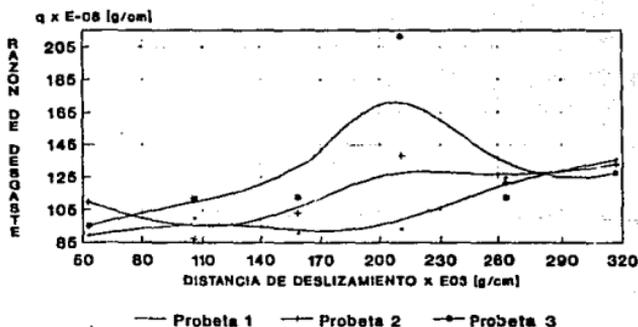
PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm    CARGA=2kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE



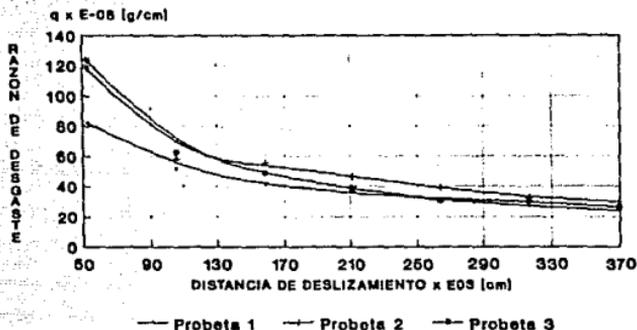
GRAFICA 7.4    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm    CARGA=2kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE



GRAFICA 7.5    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm    CARGA=2kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

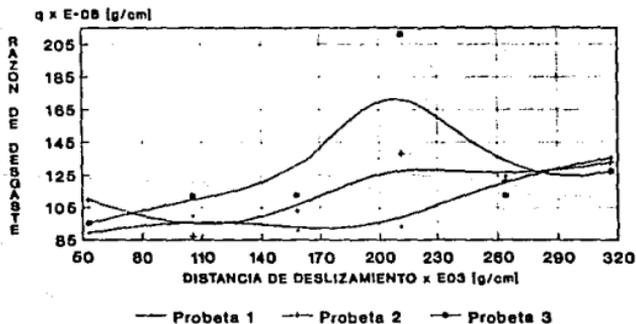
## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ZINALCO



GRAFICA 7.6

PARAMETROS DE PRUEBA:  
 800rpm CARGA=2kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

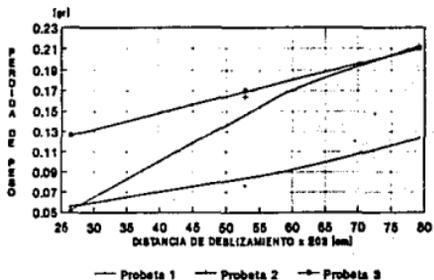
## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA B R O N C E



GRAFICA 7.5

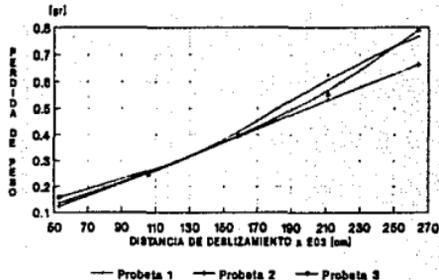
PARAMETROS DE PRUEBA:  
 800rpm CARGA=2kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ALUMINIO 6061-T2



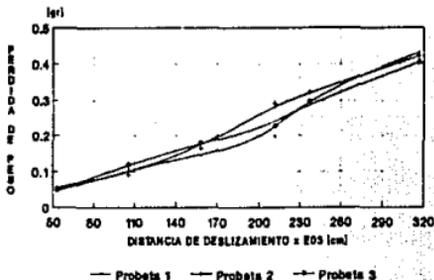
GRAFICA 7.1 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 \* 800gpm CARGA-2kg  
 \* INCREMENTO DE TIEMPO 2min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA LATON



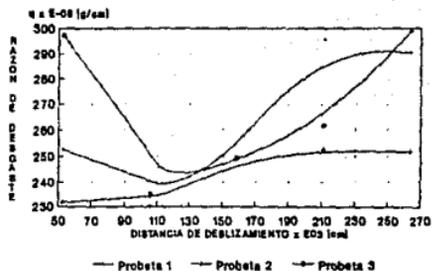
GRAFICA 7.2 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 \* 800gpm CARGA-2kg  
 \* INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE



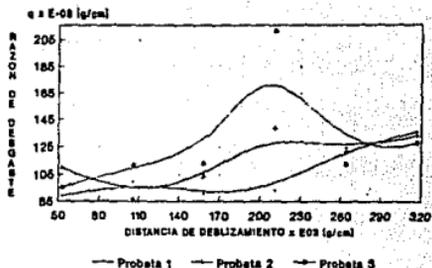
GRAFICA 7.4 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 \* 800gpm CARGA-2kg  
 \* INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA LATON



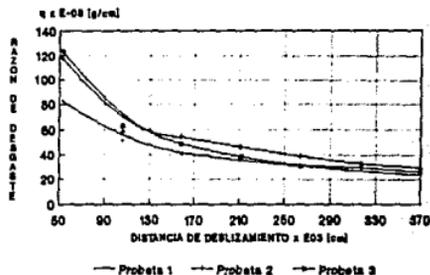
GRAFICA 7.3 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 • 600rpm CARGA=2kg  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE



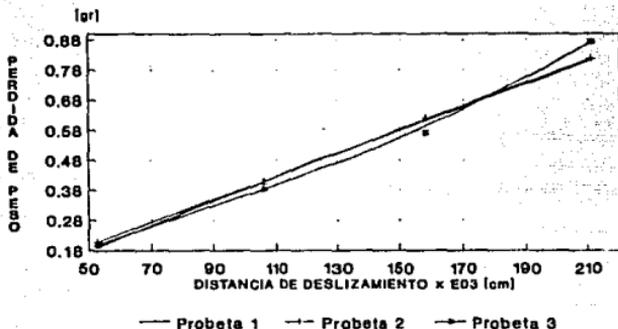
GRAFICA 7.6 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 • 600rpm CARGA=2kg  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ZINALCO



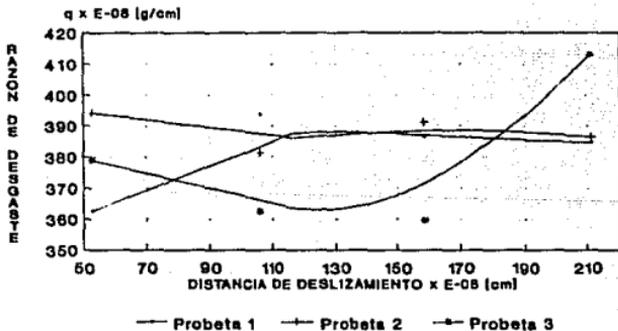
GRAFICA 7.8 PARAMETROS DE PRUEBA:  
 • 600rpm CARGA=2kg  
 • INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA LATON



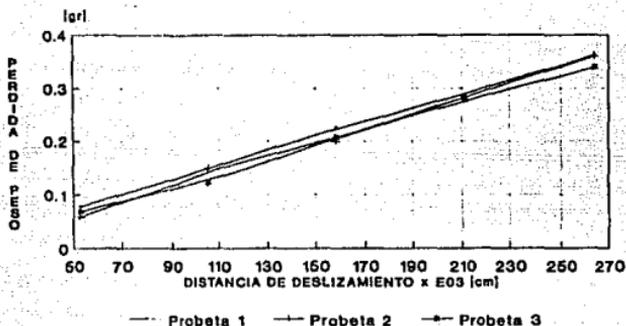
GRAFICA 5.1    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm    CARGA-3kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA LATON



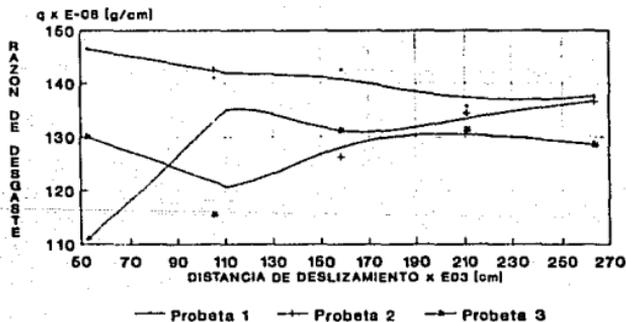
GRAFICA 5.2    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm    CARGA-3kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE



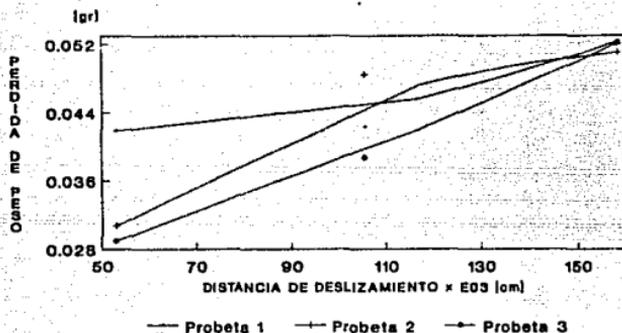
GRAFICA 8.3    PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm    CARGA=3kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE



GRAFICA 8.4    PARAMETROS DE OPERACION:  
 600rpm    CARGA=3kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

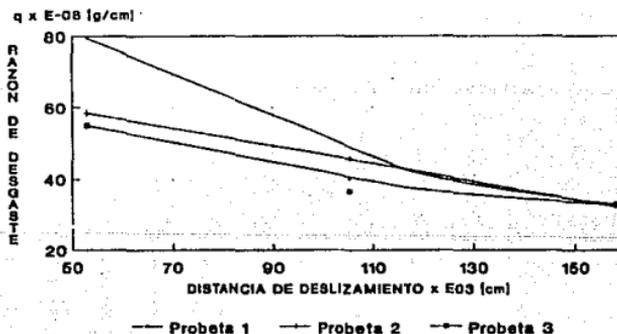
## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ZINALCO



GRAFICA 8.5

PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm CARGA-3kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

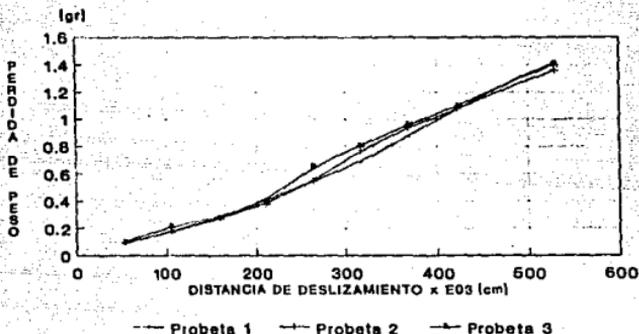
## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ZINALCO



GRAFICA 8.6

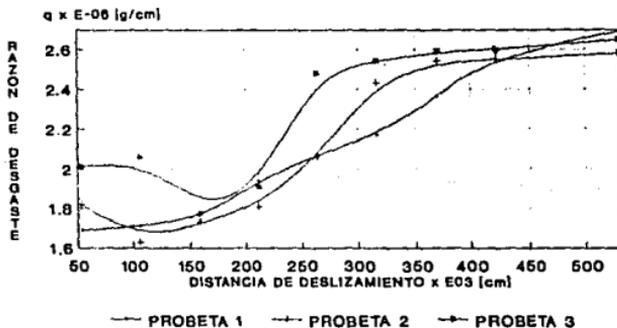
PARAMETROS DE PRUEBA:  
 600rpm CARGA-3kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE SALMENAC 773



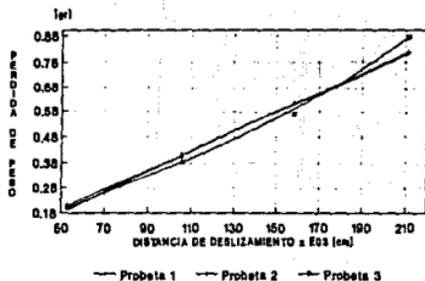
**GRAFICA 8.7**    **PARAMETROS DE PRUEBA:**  
 600rpm    CARGA=3kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE SALMENAC 773



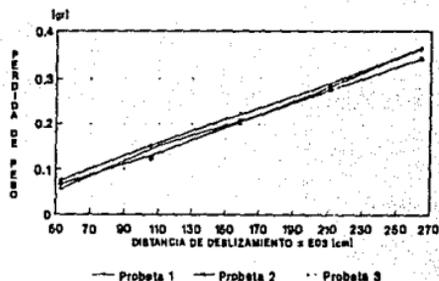
**GRAFICA 8.8**    **PARAMETROS DE PRUEBA:**  
 600rpm    CARGA=3kg  
 INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA LATON



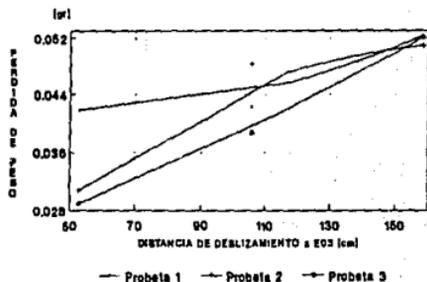
GRAFICA 8.1 PARAMETROS DE PRUEBA:  
800rpm CARGA=3kg  
INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE



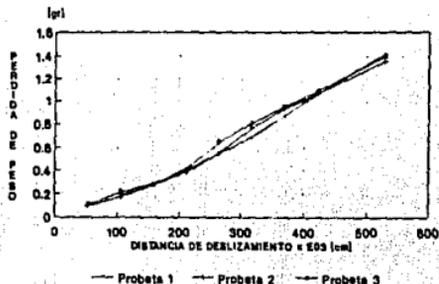
GRAFICA 8.2 PARAMETROS DE PRUEBA:  
800rpm CARGA=3kg  
INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA ZINALCO



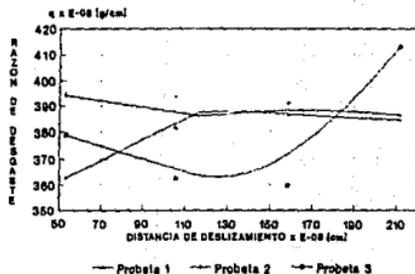
GRAFICA 8.3 PARAMETROS DE PRUEBA:  
800rpm CARGA=3kg  
INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### PERDIDA DE PESO vs DISTANCIA BRONCE SALMENAC 773



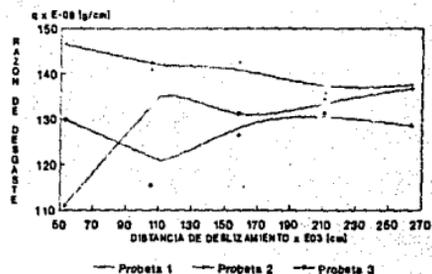
GRAFICA 8.4 PARAMETROS DE PRUEBA:  
800rpm CARGA=3kg  
INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA LATON



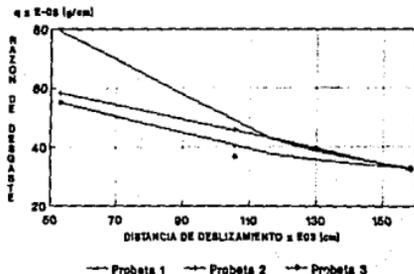
GRAFICA 8.2 PARAMETROS DE PRUEBA:  
• 600rpm CARGA-3kg  
• INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE



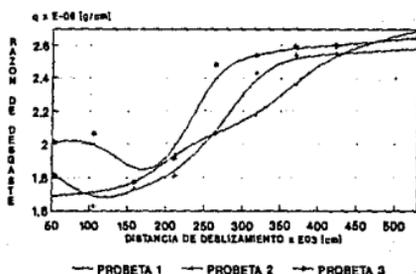
GRAFICA 8.4 PARAMETROS DE OPERACION:  
• 600rpm CARGA-3kg  
• INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA ZINALCO



GRAFICA 8.5 PARAMETROS DE PRUEBA:  
• 600rpm CARGA-3kg  
• INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

### RAZON DE DESGASTE vs DISTANCIA BRONCE SALMENAC 773



GRAFICA 8.6 PARAMETROS DE PRUEBA:  
• 600rpm CARGA-3kg  
• INCREMENTO DE TIEMPO 4min.

## IX. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, se pueden establecer las siguientes conclusiones.

1. En vista a que el tema en estudio no tiene mucho desarrollo, se pudo conjuntar un trabajo bien documentado, el cuál nos facilitó la práctica y el desarrollo experimental, así como establecer algunos parámetros de prueba.
2. El factor de desgaste y el coeficiente de fricción son variables dependientes.
3. La clasificación de los procesos de desgaste se ha tratado de explicar por muchos autores, pero en realidad no se ha determinado una clasificación general y completa que pueda estudiar con más facilidad esta materia.
4. La preparación de la superficie de las probetas a ensayar juega un papel importante para los datos obtenidos, por lo tanto debemos de realizar las pruebas con la mayor limpieza posible.
5. El metodo utilizado para calcular la razón de desgaste es un metodo con fiable ya que las gráficas obtenidas muestran resultados lógicos y reales.
6. En un proceso de desgaste actuan varios mecanismos de desgaste.
7. La máquina utilizada está equipada para realizar pruebas de cualquier material. Y es utilizada para pruebas de desgaste por deslizamiento.
8. Podríamos proponer otras aplicaciones, como por ejemplo; analizar que tanto se desgastaría una barrena al entrar en la

perforación de pozos, o verificar el desgaste en las plantas termoelectricas de los tubos que componen el generador de vapor o simplemente estudiar el comportamiento al desgaste de elementos de maquinaria, y otra de las aplicaciones sería analizar el comportamiento del lubricante utilizado y ver si se podría mejorar.

9. El proceso de fabricación de los materiales influye en los datos obtenidos por eso es recomendable analizar muestras de materiales distintos pero con el mismo proceso de fabricación.
10. Podemos decir que se pueden graficar otras variables, como pérdida de volumen contra distancia de deslizamiento, Tiempo contra volumen desgastado, velocidad contra razón de desgaste o coeficiente de fricción contra temperatura, en fin podemos analizar varias curvas. Pero en nuestro caso fué más importante graficar la razón de desgaste y la pérdida de peso contra la distancia de deslizamiento debido a que se aprecia en forma directa cuál material se comporta mejor.
11. Se recomienda que al tratar de comparar estos resultados se debe tener en cuenta que las condiciones de trabajo y que el proceso de desgaste sea el mismo pues no se pueden comparar con otros mecanismos de desgaste.
12. El metodo utilizado se corroboró repitiendo algunas pruebas lo que determina un procedimiento adecuado ya que las gráficas varían muy poco.
13. El Zinalco en estado estable tiende a comportarse mejor que los demas materiales.
14. Se observa que el Zinalco se comportó mejor que los demás materiales a cargas pequeñas y a elevadas rpm.

15. A 1 kg. de carga axial, 4 min de tiempo entre evento y evento y 600 rpm. El Zinalco se desgasta ligeramente mas que que el aluminio y el latón pero en estado estable llega a compensar estos valores.
16. La adherencia de los materiales, no fué la misma en todos los casos debido a la energía superficial, esta depende de la orientación cristalina y los enlaces metálicos.
17. por lo visto en los puntos 16 y 17 el Zinalco se comporta ligeramente mejor que los materiales estudiados en casi todas las pruebas. Ahora corresponde evaluar estos resultados bajo condiciones de lubricación o bien sustituir piezas en aplicaciones antifricción o piezas que están sometidas a desgaste excesivo y evaluar los resultados con el presente trabajo.

## X. BIBLIOGRAFIA

- [1] Karl-Heinz Zum Gahr.  
Friction and wear of material.  
Editorial Elsevier.
- [2] Dudley D. Fuller.  
Teoría y práctica de la lubricación.  
Ediciones Interciencias.  
1961.
- [3] Wladyslaw Roman Pawlak.  
Aspectos científicos en la tribología.  
Instituto de técnicas de producción de la Universidad Autónoma  
de Nuevo León, Unidad Linares.
- [4] N. P. Suh and P. Sridharan.  
Relationship between the coefficient of friction and the wear  
rate of metals.  
Department of Mechanical Engineering,  
Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.  
(U.S.A.)  
(Received May 9, 1975)
- [5] Nam. P. Suh.  
An over of the delamination theory of wear.  
Department of Mechanical Engineering.  
Massachusetts Institute of Technology.  
Cambridge, Mass. (U.S.A.)  
(Received January 2, 1977)
- [6] Jastrzebsk.  
Naturalza y Propiedades de los materiales para Ingeniería.  
ed. Interamericana.  
1979

- [7] Almena folletos e información.  
cobre, latón, bronce.
- [8] Revista Mexicana de Física.  
Publicada por la sociedad mexicana de física.  
Número 3, volumen 31, Mayo 1985.  
Capitulo Propiedades y Usos del Zinalco.  
G. Torres Villaseñor, J. Negrete y L. Valdés.  
Instituto de Investigaciones en Materiales.  
Universidad Nacional Autónoma de México.
- [9] A D. Sarkar.  
Desgaste de Metales.  
Ed. Noriega Limusa.  
Primera edición 1990.
- [10] Metals Handbook.  
Ninth edition, Volumen 8.  
Mechanical Testing.  
American Society For Metals.
- [11] Friction and Lubrication.  
F.P. Bowden and D. Tabor  
London, Methuen 1967
- [12] Bharat Bhushan, B K Gupta.  
Handbook of tribology.  
McGraw-Hill.  
1991.
- [13] P. Rusek.  
Introducción a la tribología.  
IIIa. Reunión Nacional de Análisis de Esfuerzos.
- [14] Gabriel Torres Villaseñor.  
Zinalco 11 años de investigación.

- [15] Serope Kalpakjian.  
Manufacturing Engineering and Technology.  
A Addison Wesley 1990.
- [16] J. J. Caubet.  
Teoría y práctica industrial del rozamiento.  
Bilbao, España.  
1971.
- [17] Harry Mazal, S.A.  
Departamento de Ingeniería y servicio.  
Mexico D.F.
- [18] Grupo Falmex Galvotec.  
Zinalco<sup>MR</sup> Un nuevo material para la industria.
- [19] Doland R. Askeland.  
La ciencia e ingeniería de los materiales.  
Grupo editorial Iberoamericana.
- [20] Sydney H. Avner.  
Introducción a la metalurgia física.  
Mc. Graw Hill.
- [21] Dieter Ellwood George.  
Mechanical Metallurgy.  
Mc Graw Hill.  
New York 1987.