

113
2ej



U N A M

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO TRIBOLÓGICO EN RECUBRIMIENTOS
EL CASO NIQUELADO QUÍMICO COMPUESTO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A N

**MARTÍN LÓPEZ TREJO
MARCO ANTONIO RUIZ MORALES**

FACULTAD DE



INGENIERÍA

DIRECTORES DE TESIS: ING. LUIS FLAVIO ROMERO PÉREZ

M.C. ARTURO BARBA PINGARRÓN

MÉXICO, D.F.

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**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 esta 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.

A quien día con día dirijo mis oraciones:

Dios

A quienes me dieron la vida, sus cuidados y paciencia:

Mis padres

A quienes me enseñaron el valor de los conocimientos:

Mis profesores

**A quienes han compartido conmigo; tristezas y alegrías
a lo largo de mi vida:**

Mi familia

Marco Antonio Ruiz Morales

Al ser omnipotente en quien creo sobre todas las cosas ...

Dios

**A mis padres con inmenso cariño y gratitud que con su ejemplo
y generosidad me han guiado brindandome su apoyo
incondicional**

**A mis hermanos por sus consejos y apoyo en todas
circunstancias**

**A todos los profesores que he tenido porque han desarrollado
en mi la capacidad de conocer mejor el mundo que me rodea**

**A todas aquellas personas que con su actitud contribuyen
al desarrollo de México**

Martín López Trejo

AGRADECIMIENTOS

Queremos dar las gracias a todas aquellas personas que en forma directa o indirecta nos prestaron su ayuda y facilitaron el trabajo tanto teórico como práctico en la realización de la presente.

Al Ingeniero Luis Flavio Romero Pérez, que en los momentos más difíciles nos alentó para seguir adelante, además por sus valiosos consejos y apoyo con material Bibliográfico.

Al Ingeniero Ubaldo E. Márquez Amador por las facilidades que nos brindo en la utilización de equipo, material e instalaciones de los talleres de Ingeniería Mecánica y Laboratorios de pruebas Mecánicas, Metalografía y Mediciones.

Al M. en C. Arturo Barba Pingarrón quien nos invitó a participar en este proyecto, delimitando y fijando el objetivo principal así como contenidos generales.

A nuestros maestros y a la Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.

Con sincero respeto y gratitud.

Martín López trejo

Marco Antonio Ruiz Morales.

INTRODUCCIÓN

I-FUNDAMENTOS DEL DESGASTE

1.1 Introducción al desgaste	1
1.1.1 Fricción	
1.1.2 El rozamiento desde el punto de vista de la estructura atómica	
1.1.3 El rozamiento desde el punto de vista de la Estructura Cristalina.	
1.1.4 Propiedades Tribológicas de las superficies	
1.1.5 Metrología de Superficies	
1.2 Clasificación de los Procesos de desgaste	29
1.2.1 Clasificación general	
1.2.2 Fenómenos básicos en Tribología	
1.3 Fenómenos durante el desgaste	33
1.3.1 Problemas en el Rozamiento	
1.3.2 Teoría de Soldaduras	
1.3.3 Aportación y límites de la teoría de soldaduras	
1.4 Desgaste por deslizamiento	42
1.4.1 Desgaste inicial	
1.4.2 El coeficiente de rozamiento	

II-NIQUELADO QUÍMICO CON ADICIÓN DE PARTICULAS

DURAS

2.1 Nociones sobre Niquelado Químico	51
2.1.1 Fundamentos	

2.2 Propiedades principales 53

2.2.1 Composición y constitución

2.2.2 Uniformidad

2.2.3 Adherencia

2.2.4 Estructura

2.2.5 Propiedades Físicas generales

2.2.6 Propiedades Mecánicas

2.2.7 Dureza y resistencia al desgaste

2.2.8 Esfuerzos internos

2.2.9 Propiedades eléctricas y magnéticas

2.2.10 Soldabilidad

2.2.11 Propiedades Químicas

2.2.11.1 Porosidad

2.2.12 Resistencia a la Oxidación

2.2.13 Resistencia a la Corrosión

2.3 Niquelado Químico Compuesto 69

**2.3.1 Incorporación de partículas en niquelados electrolíticos
compuestos y niquelados químicos compuestos.**

2.3.2 Sistemas de Recubrimiento

**2.3.4 Procedimiento Experimental para la deposición de
recubrimientos químicos Compuestos.**

2.3.5 Materiales que se pueden agregar

**2.3.5.1 Recubrimientos químicos compuestos a base de
Níquel**

2.3.5.2 Electrólisis Compuestos Ni-SiC

2.3.5.3 Electrólisis Ni- Diamante

2.3.5.4 Recubrimiento Químico de Ni-Cr ₃ C ₂	
2.4 Características que proporciona el Recubrimiento	84
2.4.1 Estructura del Electroless Composite	
2.4.2 Acabado Superficial	
2.4.3 Dureza y Resistencia al desgaste	

III-EXPERIMENTACION

3.1 Preparación de las Probetas	88
3.1.1 Elección del Material	
3.1.2 Maquinado de Probetas	
3.2 Elaboración de Recubrimientos	92
3.3 Valoración Inicial de las probetas Recubiertas	94
3.3.1 Espesor	
3.3.2 Microdureza	
3.3.3 Estado de Superficie	
3.4 Ensayo de Desgaste	102
3.4.1 Elección de la prueba de desgaste	
3.4.2 Características de la prueba de desgaste	
3.4.3 Planteamiento Experimental	
3.5 Análisis de resultados	109

IV- CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS PARA POSTERIORES

TRABAJOS

4.1 Conclusiones	120
4.2 Sugerencias para pruebas posteriores	122

BIBLIOGRAFIA



INTRODUCCION

INTRODUCCIÓN

El estudio de los fenómenos asociados con la fricción, desgaste y lubricación es trascendental, debido a que la interacción que existe en los elementos mecánicos trae como consecuencia; consumos de energía mayores, incrementando los costos de producción.

Del 80% al 85% de las piezas en las máquinas están sujetas a un contacto deslizante durante su trabajo y por lo tanto al cabo de cierto tiempo deben ser cambiadas. Por esta razón, al disponer los materiales para la manufactura de las piezas debe ponerse especial atención en: acabado superficial, propiedades físicas, estructura de la superficie exterior y las condiciones que pueden cambiar las propiedades iniciales, lo cual significa una mayor vida útil de las piezas mecánicas y un ahorro considerable de energía por concepto de fricción, desgaste y lubricación.¹

El desgaste es un fenómeno muy complicado y no se puede explicar sin el conocimiento de diversas disciplinas científicas; por ejemplo, se deben estudiar las características de la capa exterior de las piezas esto es: química y física de las superficies que estarán en contacto, se deben plantear modelos matemáticos de los procesos de fricción, lubricación y desgaste y posteriormente evaluar los procesos mediante pruebas convenientes de tal modo que represente el comportamiento en el caso práctico.

La tribología, palabra cuyas raíces griegas son: Tribos, (rozamiento, frotamiento), y logos (tratado). Esta ciencia fue definida por primera vez en el

¹ IIIa. Reunión Nacional de Análisis de esfuerzos
Introducción a la Tribología.

reporte del comité del ministerio Británico de Ciencia y educación el 9 de Marzo de 1966, en donde se definió como: "La ciencia y tecnología que estudia las superficies que están en contacto y movimientos relativos, así como los fenómenos que de ello se derivan".²

Por lo tanto, la fricción, el desgaste y la lubricación son las áreas preponderantes de estudio de dicha ciencia.

Cerca de quince mil artículos sobre Tribología se publican cada año, la mayoría de estos artículos nos ayudan al mejor conocimiento de las leyes que dominan los fenómenos entre dos superficies, pero hay pocos artículos que se pueden aplicar directamente en el diseño, aprovechamiento, o mantenimiento. Por otra parte muchos trabajos se publican en el área de la lubricación y los lubricantes, esto es bien comprensible cuando el diseño no es propio y desde el punto de vista comercial es mejor cambiar lubricante y no diseño. El lubricante puede cubrir las fallas de construcción.

En busca de mejores condiciones para las superficies sometidas a un contacto y movimiento relativo, en donde irremediamente se producirá el desgaste, un desgaste no deseado que representa para la economía pérdidas importantes por las razones anteriormente citadas, se ha iniciado un estudio teórico-práctico, participando especialistas de diversas disciplinas científicas abocado a encontrar mejores soluciones a la problemática que nos plantea el desgaste en elementos mecánicos.

² Ponencia "La aplicación de la tribología para instrumentar un ahorro de energía" en el IV Congreso Nacional de Ahorro de Energía, Guanajuato, Jal. Nov. 1993

Los recubrimientos hasta años recientes no representaban una alternativa viable para producir superficies aptas que resistieran un contacto deslizando aplicando una carga, ahora podemos contar con casos concretos que sin duda alentaran cada vez más las investigaciones al respecto.

El presente trabajo tiene por objetivo realizar un estudio comparativo con respecto al fenómeno de desgaste, de los resultados obtenidos en Laboratorio, de una serie de pruebas efectuadas sobre recubrimientos tanto de Niquelado químico simple como de Niquelado químico con adición de partículas duras de Óxido de Aluminio.



CAPITULO PRIMERO

FUNDAMENTOS DEL DESGASTE

1.1 Introducción al desgaste	1
1.2 Clasificación de los procesos de desgaste . . .	29
1.3 Fenómenos durante el desgaste . . .	33
1.4 Desgaste por deslizamiento	42

I.-FUNDAMENTOS DEL DESGASTE

1.1.1. FRICCIÓN

La fricción se define como la resistencia al movimiento de un cuerpo, cuando éste se desplaza sobre otro.

La palabra fricción se deriva del latín "fricare", que significa rozamiento o frotamiento. Cuando este fenómeno se presenta entre un gas y un sólido, se le conoce como fricción aerodinámica; la que se origina debido a la interacción de un líquido con un sólido se le denomina fricción líquida; por último, a la producida por los procesos de disipación de energía interna, se le llama fricción interna.

La fricción desempeña un papel fundamental, ya sea en nuestras actividades diarias como en los procesos industriales o de manufactura. En el primer caso, es la responsable de que un cuerpo inicie su movimiento, cambie de dirección y subsecuentemente que se detenga o frene. En el segundo caso, la ausencia de la fricción impediría la acción de los rodillos de los sistemas o equipos mecánicos empleados en los procesos de molienda; así como también que no hubiera efecto de soldadura que se induce por este principio.

La fricción producida por el funcionamiento de la maquinaria produce disipación y pérdida de mucha energía. Se ha estimado que en los E.U. hay un consumo de aproximadamente 10% de aceite para superar o librar los efectos de este fenómeno.⁵ Esto significa que hay que suministrarle, constantemente, energía extra al sistema mecánico, para que siga trabajando.

⁵ Art. "Necesidad de la Enseñanza de la Tribología en México", Manuel Vito Torres, p4

Los conocimientos empíricos del fenómeno de la fricción, fueron utilizados por los ingenieros de las antiguas civilizaciones de la humanidad. Sin embargo, *un estudio científico de este importante fenómeno no se hizo sino hasta el Renacimiento por Leonardo Da Vinci (1452-1519)*. Desgraciadamente, dichos estudios se descubrieron después de 300 años de la muerte de este personaje.

En 1785, José Marie Coulomb (1736-1806), encontró las siguientes leyes de la fricción.

1. La fricción estática puede ser mayor que la fricción cinética.
2. La fricción es independiente de la velocidad de deslizamiento.
3. La fuerza de fricción es proporcional a la carga aplicada.
4. La fuerza de fricción es independiente del área de contacto.

La fricción es frecuentemente representada por el coeficiente de fricción, μ , el cual se ha definido como la relación entre la fuerza F y la carga aplicada N o sea:

$$\mu = F / N$$

FRICCIÓN SECA

La fricción seca existe cuando entre dos superficies de contacto, no existen otras partículas de humedad, contaminación, moléculas de grasa y lubricante etc. Prácticamente, para las condiciones que existen en el ambiente no se puede obtener la fricción seca, pero sólo fricción seca técnicamente.

Para la práctica de Ingeniería siempre se experimenta con los problemas de fricción seca o seca técnicamente, (frenos, embragues de fricción, equipo astronáutico). Sin embargo, en cálculos de las máquinas siempre se usan los valores de fricción seca, pero hay que saber que cada vez que medimos el

coeficiente de fricción para las mismas superficies podemos obtener los resultados diferentes. Los cambios en el coeficiente de fricción μ durante el trabajo de la máquina puede influir principalmente sobre el comportamiento y la durabilidad.

A continuación se muestran las hipótesis de fricción seca:

TEORIAS MECÁNICAS

Amontons $T = \mu N$

Coulomb $T = A + \mu N$

Teorías que se relacionan sólo a las rugosidades de superficie. El coeficiente μ no depende de N , y A no depende del área de contacto real.

Bowden $T = A_s \tau_c + A_c \rho_s$

Teoría de creación y rompimiento de las uniones. La fuerza de fricción es la suma de la resistencia al corte de las uniones adhesivas y la resistencia al empuje del material deformado plásticamente.

TEORIAS MOLECULARES

$$\begin{aligned}\text{Tomlinson} \quad \mu &= E / n \rho n_0 \\ k &= n n_0 / L\end{aligned}$$

La resistencia a la fricción viene de la resistencia de atracción molecular.

$$\begin{aligned}\text{Dieriagin} \quad T &= \mu(N+N_0) \\ N_0 &= \rho_0 A_r\end{aligned}$$

Explica sólo la influencia de rugosidades moleculares.

TEORÍA MECÁNICO MOLECULARES

$$\text{Kragielski} \quad \mu = T / N = \alpha A' / N + \beta$$

La fricción es la suma de las resistencias de rugosidades, de conexiones adhesivas y de atracción molecular. las constantes : α (depende del límite de corte), β (depende de la influencia de carga normal al límite de corte).

Donde :

T - Fuerza de fricción, A_c - área del corte transversal de ranura en el material deformado plásticamente, N - carga normal, μ - coeficiente de fricción, A - Fuerza de adhesión, τ_c - Límite al corte de las uniones adhesivas A_r - área de contacto real, A'_r - Proyección del área de contacto real sobre el plano en dirección de movimiento, ρ_s - resistencia media a la extrusión de material, E - energía media necesaria para romper una conexión, n - número de las moléculas en contacto, ρ_0 - Valor medio de la fuerza que empuja las moléculas, x_0 - Trayectoria unitaria de las moléculas, L - distancia entre los centros de moléculas, ρ - Valor medio de las fuerzas entre moléculas.³

1.1.3 EL ROZAMIENTO DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA ESTRUCTURA ATOMICA

Desde el punto de vista del rozamiento, lo que nos interesa ante todo es:

- La previsión, en función del esquema atómico, de lo que ocurrirá cuando dos átomos pertenecientes a un mismo cuerpo o a dos cuerpos diferentes se pongan en presencia; este encuentro se hará, con frecuencia, en condiciones severas de temperatura y de presión; en efecto, en las superficies de contacto de los dos cuerpos, el rozamiento se reparte sobre un número restringido de áreas muy pequeñas, que estarán sometidas a tensiones elevadas y a temperaturas microlocalizadas que pueden alcanzar 1500°C [18];

³ IIIª REUNION NACIONAL DE ANALISIS DE ESFUERZOS, Curso: Introducción a la tribología, p66

FUNDAMENTOS DEL DESGASTE

- La comprensión de las estructuras a las que van a aplicarse nuestras sollicitaciones, la previsión de la reacción y la amplitud de las deformaciones que tolerará el edificio.

Debemos, por lo tanto, analizar sobre todo:

- Cómo reaccionan, uno sobre otro, dos átomos de dos cuerpos diferentes;
- Cómo se solidarizan dos átomos de un mismo cuerpo;
- Cómo los átomos edifican la estructura propia del material.

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

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

Recíprocamente, puede preverse que 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.

Con respecto al rozamiento, recordemos:

- a) que los metales son generalmente muy electropositivos con pocos electrones en el nivel exterior (1 para el cobre y la plata);
- b) que ciertos metales, no obstante, pueden entrar en combinaciones en los dos sentidos, dando lugar a compuestos metálicos o no; por ello, encontraremos al estaño como metal de revestimiento, produciendo, por rozamiento contra el acero, compuestos intermetálicos frágiles que favorecen la resistencia al gripado.

c) que existen cuerpos electronegativos de seis o siete electrones de valencia y por lo tanto, susceptibles de combinarse con los metales, y que entre ellos se hallan:

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

A priori, cuando los sistemas cristalinos de dos sistemas diferentes se ponen en presencia, pueden esperarse *atracciones electrónicas*:

- Si los átomos de uno y otro cuerpo se atraen más que los de un mismo cuerpo;
- Si ninguno de los dos componentes no tiene un carácter electronegativo demasiado evidente.

Este tipo de compuestos reviste en el campo del rozamiento una importancia particular porque se les vuelve, a encontrar en los antifricción; por otra parte, mientras que el compuesto químico podrá, generalmente, abandonar la superficie en fricción sin daño, o desgarre (como los óxidos, los sulfuros, los cloruros, los jabones, etc.), la experiencia muestra que un compuesto electrónico será susceptible de perjudicar la superficie en fricción. [4]

Las atracciones son materiales cuya estructura cristalina comprende los átomos de dos o más materiales diferentes cuya asociación no es química y que tienen características típicamente metálicas, tales como la conductibilidad eléctrica y la conductibilidad térmica. [11]

Las aleaciones cubren una gama muy vasta de cuerpos, de límites imprecisos y que, por un extremo, se distinguen apenas de los compuestos químicos y, por el otro, vienen a confundirse con las mezclas estrictamente mecánicas.⁴

Otra posibilidad en cuanto a formación de compuestos entre dos materiales sometidos a fricción por deslizamiento, la encontramos en las *soluciones sólidas*, que representan una serie de cuerpos que nos conduce cada vez más lejos de los compuestos químicos hacia las mezclas mecánicas puramente estadísticas.

En ellas, el tipo de enlace es indudablemente metálico y, sobre todo, las proporciones relativas de los componentes pueden variar casi de 0 a 1.

Puede esperarse la formación de *soluciones sólidas* cuando los átomos de los dos cuerpos en fricción se atraen con la misma intensidad que los átomos de un mismo cuerpo; pueden entonces considerarse dos casos:

- Cuando los átomos de los dos materiales ocupen volúmenes comparables, la estructura cristalina de la aleación se construye utilizando indiferentemente los átomos de uno u otro componente; no hay más que la distribución estadística y global que corresponde a las proporciones de los componentes, siendo ésta una solución sólida desordenada.

En ciertos casos y con la condición necesaria, pero no suficiente, de que las proporciones estén en una relación simple característica, por ejemplo, 1 por 1 ó 1 por 3, pueden existir alternancias periódicas en la sucesión reticular de los átomos, es decir, un ritmo: la aleación toma el nombre de solución ordenada.

⁴ TEORIA Y PRACTICA DEL ROZAMIENTO, J. Coubet, p32

La probabilidad de obtener soluciones sólidas de sustitución disminuye al crecer la diferencia de los radios atómicos; se hace casi nula cuando esta diferencia alcanza el 15%; pero esta probabilidad crece al disminuir el carácter electropositivo y electronegativo de los componentes.

- Cuando los átomos de los dos cuerpos presentan caracteres electropositivos y electronegativos poco marcados, y son de volumen atómico muy diferente, se llega a aleaciones en cuya estructura cristalina de grandes átomos penetran los átomos de pequeño volumen que caminan a través de aquélla y se colocan en posiciones intermedias: se dice entonces que se tienen soluciones sólidas intersticiales.

Cuando dos cuerpos de estructura diferente rozan uno contra otro, las condiciones de temperatura y de presión microlocalizada hacen, según se ha visto, que se asocien átomos superficiales; según la naturaleza del par de fricción obtendremos, entonces, en las caras en contacto toda la gama posible que va de los compuestos químicos a las mezclas mecánicas, pasando por los compuestos electrónicos, las soluciones sólidas desordenadas y las soluciones intersticiales.

Esquemáticamente pueden imaginarse los casos siguientes:

- la estructura que surge en las caras de contacto es sólida y está bien sujeta a la dermis subyacente por una variación progresiva del tipo de estructura; en este caso el resultado es claro: coeficiente de rozamiento muy elevado y gripado.

Podemos obtener esto, por ejemplo, frotando hierro sobre aluminio; Bradley y Jay han analizado:

FUNDAMENTOS DEL DESGASTE

1. Cuando tenemos 0 a 18% de aluminio en el hierro, obtenemos una solución sólida desordenada.

2. A partir del 18% los átomos de aluminio comienzan a colocarse en ciertas posiciones que, cuando están todas ocupadas, corresponden a la fórmula Fe_3Al , que se alcanza a partir del 25% de aluminio.

3. Alcanzado este primer orden, los átomos siguientes del componente de aporte empiezan a disponerse según un nuevo orden que corresponde a la fórmula $FeAl$, que se alcanza para el 50% de átomos de aluminio en el hierro.

De este modo, de la cara exterior a la dermis, el rozamiento Al sobre Fe va a crear una cadena continua de soluciones sólidas y, para que prosiga el movimiento, será preciso provocar arrancamientos:

- La estructura está bien sujeta, pero es frágil; el par puede entonces ser aceptable; puede ser además, un par del tipo precedente, cuyos compuestos resultantes habrán sido fragilizados por la unión de un tercer elemento.

Así, nuestra fricción de aluminio sobre hierro podrá hacerse viable en presencia de azufre; esto es lo que explica el correcto funcionamiento sobre el aluminio del acero sulfinizado:

- Si la presencia de un tercer elemento permite fragilizar las estructuras de las caras en contacto, pero, si la estructura ternaria resultante presenta enormes diferencias con la dermis subyacente, la capa que surge así del rozamiento se desprende continuamente.

Ocurre que la aparición estructural del tercer elemento equilibra el consumo mecánico; de esta observación se deriva la técnica de los aditivos iónicos que el rozamiento consume mecánicamente:

- el par de rozamiento pueda hacerse viable gracias a la introducción de un cuerpo que dé con uno, al menos, de los elementos del par, un compuesto estable bien sujeto al que le hace surgir, pero que se desprenda más fácilmente que el metal subyacente: es el caso del oxígeno, del azufre, del cloro, del fósforo.[14]

1.1.3 EL ROZAMIENTO DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA ESTRUCTURA CRISTALINA

A partir del estado líquido, enfriemos un metal: en las proximidades de una temperatura dada aparecen gérmenes de solidificación; los átomos de estos gérmenes se disponen según la ordenación específica del metal.

Formados los primeros cristales, obedeciendo a diversos tropismos, crecen en direcciones tentaculares las dendritas; prosiguiendo el enfriamiento y disminuyendo la distancia interatómica media, decrece el volumen específico, resultando un gradiente de deformación que tuerce estas dendritas.

En el cristal, los átomos se disponen en planos reticulares que tienen la misma orientación; al curvar el gradiente de deformación las dendritas, los planos reticulares son sometidos a tensiones, a medida que progresan sus cambios de dirección; parecen hacerlo a golpes en algunos minutos cada vez, y cada uno de estos cambios de orientación introduce un elemento de discontinuidad, una anisotropía que caracteriza a los cristales.

Cuando se juntan los cristales que parten de microestructuras diferentes y que progresan poco a poco, aparece una nueva solución de continuidad, estos cristales no tienen la misma dirección de plano reticular, ya no se trata esta vez de algunos minutos de arco: la posición angular relativa es cualquiera; se han formado (granos) separados por una zona llamada (límite de grano) sobre cuya naturaleza todavía se discute; los átomos de estas uniones no pertenecen a ninguno de los sistemas adyacentes de planos reticulares.

Ante todo, frotar una superficie es hacerla objeto de severas sollicitaciones que pueden alcanzar hasta varias décimas de milímetro de profundidad; todo defecto de la estructura representa un punto débil para estas sollicitaciones; es el defecto más acentuado el que limita el máximo de las sollicitaciones posibles y, desafortunadamente, no hay ninguna medida común entre la resistencia teórica que ofrecería una estructura monocristalina perfecta y la que se espera de las estructuras reales.

Vamos a encontrarnos ante dos posibilidades diferentes de deformación de capas superficiales del metal: por una parte el interior de los granos, por otra parte los granos unos con respecto a otros; se admite, no obstante, que la rigidez del cristal es menos elevada que la de las uniones de grano, pero está hoy demostrado que, cuando la temperatura aumenta, la rigidez de las uniones de granos disminuye más rápidamente que la de los cristales; por consiguiente, bajo las sollicitaciones del rozamiento, resulta un comportamiento totalmente diferente de la unión de granos y de los planos reticulares.

Las variaciones de volumen específico pueden hacer que, al final del enfriamiento, se encuentre aprisionado un poco de líquido en un espacio demasiado grande para el volumen que ocupará cuando se solidifica a la

FUNDAMENTOS DEL DESGASTE

temperatura ambiente; resulta así un vacío o microquedad, causa grave de decohesión; la unión de granos, defecto principal de la estructura, elemento principal de anisotropía y de heterogeneidad, será el camino preferente:

- de corrosiones químicas;
- de difusiones.

Es en la unión de los granos donde se encontrarán las inclusiones de sulfuro y de plomo en los aceros para chavetas.

Las uniones de los granos son igualmente la sede de una anisotropía química por empobrecimiento específico de líquido madre.

Para resolver el problema del rozamiento, en la medida en que se concentra en la epidermis y en la dermis del metal, pueden emplearse métodos de tratamiento llamados < de superficie >; se va a intentar mejorar la calidad de la piel, acercarla a las características teóricas, muy superiores, a los valores reales corrientes que corresponden a una cierta densidad e intensidad de defectos.

Un metal puede existir en varios estados cristalinos diferentes; se trata de estados alotrópicos, cada uno de los cuales corresponde a condiciones definidas de temperatura; por ejemplo, el hierro puede existir a la vez en el estado α cúbico centrado llamado < ferrita > y en el estado γ cúbico de cara centrada llamado < austenita >; los metales ferrosos son siempre los materiales básicos de la construcción mecánica, y el 95% de los pares de rozamiento están formados por materiales ferrosos que frotan entre ellos o sobre otro cuerpo; la presencia de zonas contiguas a estados estructurales diferentes

(algunos en estado estable, otros en estado metaestable) añaden a la superficie solicitada un nuevo elemento de heterogeneidad.

Además, las uniones de granos y las diversas imperfecciones crean microtensiones, donde la energía libre de los átomos es superior a la media, siendo, pues, allí donde aparecerán los primeros microestructura de la nueva fase.

Los calentamientos microlocalizados debidos a la fricción pueden provocar por microfusión y recristalización cambios puntuales de estados alotrópicos.

Puesto que siempre los rozamientos tienen un aspecto puntual, es esencial estudiar cómo se deforma un elemento de la estructura con respecto a sus vecinos.

Las sollicitaciones de una superficie en fricción son de diversas naturalezas; esquemáticamente se la puede descomponer en sollicitaciones normales y en sollicitaciones tangenciales; las primeras, debidas a las cargas de apoyo, se traducen en un campo de tensiones que pueden entrañar profundos cizallamientos; las otras provocan muy particularmente el deslizamiento por capas de granos y arrancamientos.

Bajo el conjunto de estas sollicitaciones el metal se pliega, al principio elásticamente, después se acomoda o se deteriora por lesiones sucesivas, cuya acumulación provoca el endurecimiento.

Las deformaciones propias de los cristales obedecen, al conjunto de reglas siguiente, las cuales ya han sido demostradas experimentalmente en otras investigaciones:

- El plano de deslizamiento es el plano de mayor densidad atómica.

- La dirección de deslizamiento es la dirección de mayor densidad lineal atómica.[3]

Existe un cizallamiento t_0 , hasta el cual la deformación es elástica y a partir del cual comienza el campo de las deformaciones plásticas y los deslizamientos irreversibles, tomado este valor t_0 en verdadera magnitud sobre el eje de mayor densidad atómica.

Bajo el efecto de un principio de deslizamiento el cristal reacciona, se adapta a la sollicitación, se consolida e incluso se recupera.

La explicación de estos fenómenos de defensa es completa en teoría, difícil de interpretar experimentalmente; recordemos simplemente este hecho que es indudable: una tensión que produce un cizallamiento ligeramente superior al cizallamiento crítico de Schmid $< t_0 >$, da lugar a una deformación plástica dada y no a la destrucción del metal; la deformación se hace infinitamente lenta, se bloquea prácticamente en un cierto valor, aunque la tensión este siempre aplicada.

En la práctica se ha llegado a ciertas conclusiones respecto a la deformación cristalina.

Un cristal sometido a sollicitaciones mecánicas puede:

- perder un átomo arrancado de su red: es una vacancia;
- tener uno de sus planos reticulares que, por simple deslizamiento o por movimiento combinado helicoidal de rotación y de deslizamiento, se introduce entre otros dos planos: es una dislocación;
- curvar sus planos reticulares en una superficie alabeada: es una distorsión.

FUNDAMENTOS DEL DESGASTE

Los cristales que tienen un número importante de planos o ejes de densidad atómica próxima son susceptibles de un número equivalente de deformaciones diferentes; corren peligro de muchas lesiones y apenas resisten mejor para una dirección de tensión que para otra; desgraciadamente, el hierro está en este caso, pues éste está presente en el 95% de los pares de rozamiento.

- Los cristales que no tienen más que un sólo plano de deslizamiento, o bien una sola dirección, son más difíciles de dañarse porque tienen, probablemente, tendencia a orientarse en la dirección de la aplicación de las tensiones; puede decirse (Paudrat) que tales cuerpos se adaptan bien al rozamiento; es el caso del azufre.

1.1.4 PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS DE LAS SUPERFICIES

Las superficies de las piezas se crean en diferentes procesos de fabricación, pero la última forma y propiedades físicas de superficie se construyen en las últimas etapas de producción, en las etapas de maquinado. Los productores cuidan mucho de la forma, tamaños y rugosidades de las superficies importantes. La superficie maquinada se construye como una superficie tangencial a las cumbres de las localizaciones siguientes durante el proceso del tope de la herramienta.

Como propiedades tribológicas de las superficies se comprenden todas las propiedades de las superficie o superficies que se relacionan a los procesos de fricción, lubricación y desgaste, por ejemplo: rigidez (estática y dinámica) de las superficies, resistencia a la fatiga, resistencia al flujo, resistencia al desgaste abrasivo y adhesivo, coeficiente de fricción, etc.

Porque los indicadores oficiales; R_{max} (rugosidad máxima) R_z (rugosidad media) y R_a no tienen buenas conexiones con las propiedades tribológicas en la Ingeniería moderna, frecuentemente se usan indicadores no oficiales: $f(y)$ - distribución de las ordenadas (rigidez de las superficies, resistencia eléctrica), r_λ (diagnóstico del desgaste), $f(v)$ - distribución de los valles (resistencia a la fatiga) y otros. El desarrollo (computarización) del proceso de análisis de la superficie acabada facilita realmente los cálculos de los indicadores oficiales y no oficiales. *La forma geométrica de la superficie influye mucho en las propiedades tribológicas pero no exclusivamente.* Al menos como la geometría influye también en las diferentes propiedades físicas de la superficie

FUNDAMENTOS DEL DESGASTE

y dentro de la pieza, como son los esfuerzos residuales, endurecimiento, estructura metalográfica, anisotropía de la estructura. De las propiedades tribológicas se decide no sólo la superficie sino también la capa exterior de la superficie que tiene las propiedades físicas diferentes del núcleo de la pieza. La conclusión hipotética de la capa exterior se presenta en la Fig. 1.1

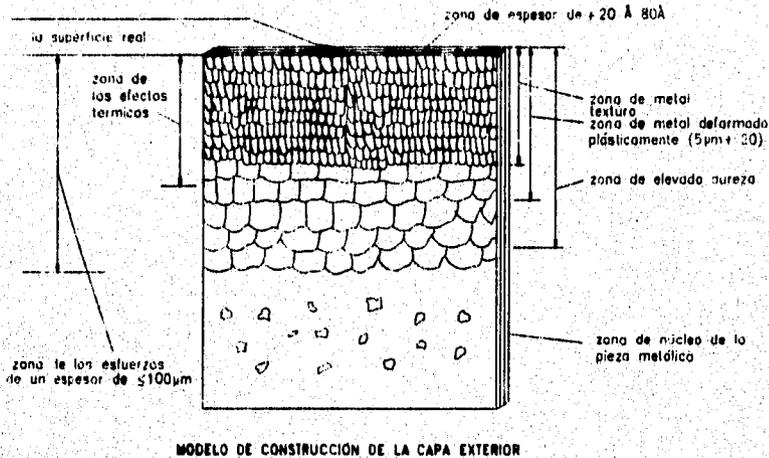


Fig. 1.1

Todos los procesos de manufactura y aprovechamiento los podemos dividir en dos clases: Procesos que actúan térmicamente y procesos que actúan mecánicamente.

Vamos a hablar de los dos modelos de construcción de la capa exterior convenientemente. Primero: el modelo "caliente". Según este modelo, durante el proceso la capa exterior de la pieza se calienta y las capas interiores permanecen frías. La capa exterior tiene en este momento los esfuerzos de compresión, en la capa exterior se crean las deformaciones elásticas y plásticas. Después de un rato, el calor penetra a las capas interiores de la pieza mientras que la capa exterior se enfría al mismo tiempo. En este momento en la capa exterior se construyen los esfuerzos de tensión. Más tarde la temperatura del núcleo de la pieza regresa al estado anterior, pero los esfuerzos de tensión permanecen en la capa exterior. Los esfuerzos de tensión pueden ser mayores debido al efecto que tiene el calor sobre los cambios estructurales. La martensita se cambia a la bainita. En este momento la estructura cristalina de la capa exterior se cambia. El volumen del cristal de martensita es mayor que el del cristal de la bainita. Los esfuerzos pueden ser tan grandes que rompen inmediatamente la pieza metálica o pueden permanecer en la capa exterior. Los valores de estos esfuerzos alcanzan a los valores de la última resistencia del material. Segundo: el modelo "frío". Según, este modelo durante el proceso sobre la capa exterior actúan las presiones que la deforman plásticamente. Las capas interiores del núcleo de la pieza se libran de las deformaciones de la capa exterior. En la capa exterior se crean los esfuerzos de compresión y debajo de la capa exterior los esfuerzos de tensión. En las figuras 1.2 y 1.3 se muestran las gráficas típicas de los esfuerzos que se crean durante los procesos de manufactura. Los resultados se refieren a los esfuerzos que actúan en lo profundo de la superficie manufacturada.[1]

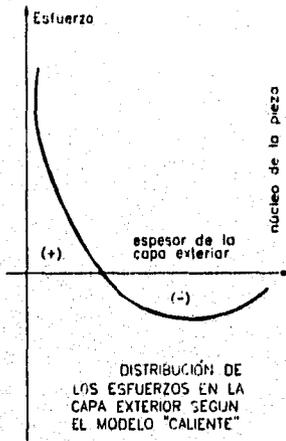


Fig. 1.2

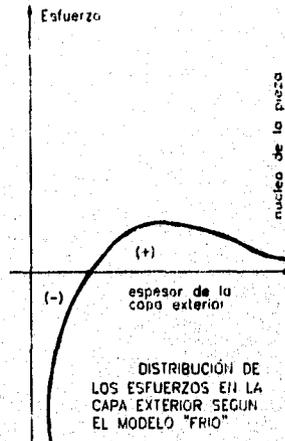
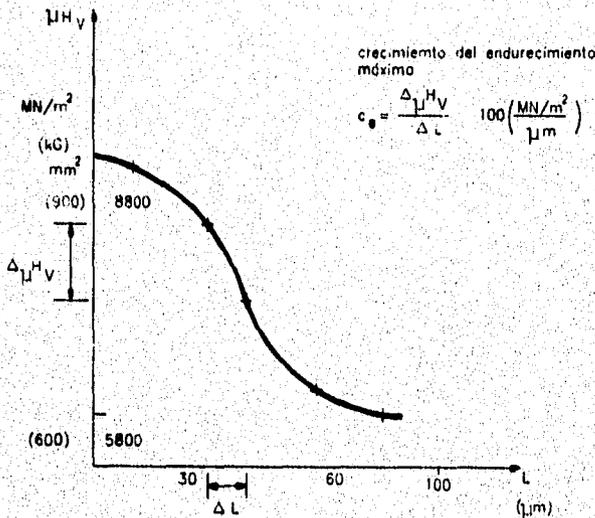


Fig. 1.3

Los esfuerzos originados y dejados por los procesos de manufactura en la capa exterior se llaman esfuerzos residuales. Si los esfuerzos que actúan en la capa exterior los explicamos usando como base la mecánica de sólidos, entonces la materia es parecida a una red gigantesca con cubos regulares. La concentración de los esfuerzos es el resultado de la forma de la pieza y no de la forma y el tipo de conexiones entre cubos unitarios. Los esfuerzos del tipo (I) se muestran gracias a los métodos o instrumentos que indican los valores de toda o de casi toda la pieza. Pero la estructura cristalina de la materia como la conocemos ahora se parece a otra construcción. La existencia de otros átomos causa cambios en la red cristalina.

Durante el proceso de producción se transforman y se crean de nuevo otras propiedades físicas de la capa exterior.

El endurecimiento. La calidad que caracteriza la capa exterior es muy importante (especialmente el crecimiento del endurecimiento) e indica rápidamente el lugar posible de la falla por fatiga. Todos los procesos de endurecimiento (templado), los procesos térmicos químicos, los procesos de manufactura cambian continuamente el nivel de endurecimiento. La medida propia para el endurecimiento se refiere a la microdureza. En la fig. 1.4, se muestra la gráfica de la microdureza (Vickers) para el acero AISI 1045. [1]



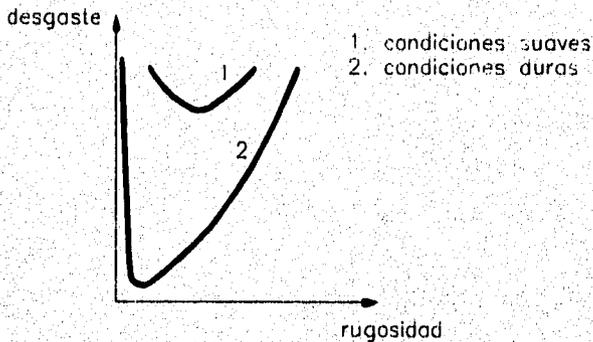
ENDURECIMIENTO DEL ACERO AISI 1045

Fig. 1.4

Los procesos de fabricación crean la anisotropía de la estructura - la textura. Las líneas de textura representan las direcciones de los máximos desplazamientos.

El conocimiento de textura es importante para predecir cambios en las propiedades de la capa exterior en diferentes direcciones de movimiento y en diferentes condiciones.

Rugosidad contra el desgaste y la fatiga. Los típicos resultados industriales indican que la relación entre el desgaste y rugosidad tiene una forma compleja, fig. 1.5.



INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD AL DESGASTE
TÍPICO DE LA PIEZA (DESGASTE ABRASIVO,
ADHESIVO, OXIDACIÓN).

Fig. 1.5

El valor del desgaste depende mucho de las condiciones de la fricción y para las condiciones duras el valor óptimo de R_a es mayor que para las condiciones suaves. La estructura de los rastros después del maquinado tienen también su influencia en el proceso de desgaste, fig. 1.6.

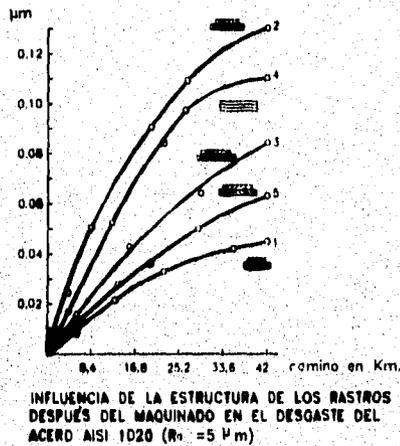


Fig. 1.6

Las rugosidades actúan como concentradores de esfuerzos cambiando la resistencia a la fatiga. Aún para el acero AISI 1045 que no tiene tanta sensibilidad la concentración de esfuerzo en los cambios pueden alcanzar 30% de la resistencia inicial.

FUNDAMENTOS DEL DESGASTE

Hay numerosos problemas en los cuales la capa exterior tiene gran influencia sobre la durabilidad de las piezas. Especialmente en todos los casos cuando los procesos de desgaste se concentran en la región de la capa exterior. Esto se relaciona a rodamientos, engranajes, ruedas de locomotora, etc.; o sea a todas las teorías relacionadas a los procesos de la fatiga con los esfuerzos del corte. Dentro de estas teorías podemos obtener los resultados más seguros usando las hipótesis de los máximos esfuerzos del corte τ_{max} y de la energía de desplazamiento.

La hipótesis de los esfuerzos maximales del corte pueden ser expresados

$$\tau = \max \Delta \sigma_{x,y,z} / 2 = \max(\max \sigma_{x,y,z} - \min \sigma_{x,y,z}) / 2$$

La solución de este problema para todas las parejas típicas de contacto: (esfera - esfera, esfera - plano, cilindro - cilindro, cilindro - plano, etc.) mostró que el punto de los esfuerzos maximales del corte está bajo de la superficie en contacto aunque los principales esfuerzos normales maximales están exactamente sobre la superficie del contacto.[10]

1.1.5 METROLOGIA DE SUPERFICIES

Si observamos la figura 1.7, vemos en ella el aspecto de las irregularidades de una superficie y comprendemos que se hayan propuesto numerosos métodos para calificarlas.

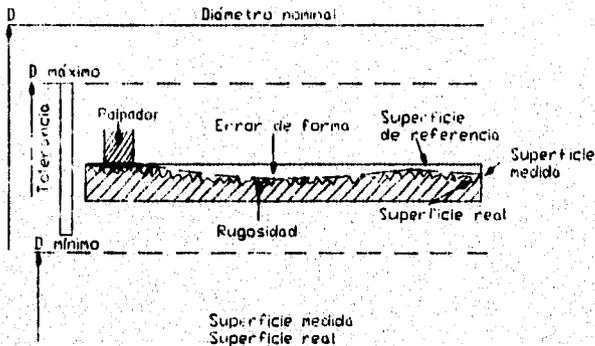


fig. 1.7

a) el criterio más simple es el de la mayor profundidad de los surcos a partir de la línea envolvente palpada, es decir, P ; es insuficiente porque no precisa ni la densidad ni la agudeza de los surcos;

b) el ingeniero general Nicolau ha propuesto, como superficie de referencia, la que se obtendría idealmente rellenando los surcos con el metal tomado de los asperezas; [14] esta superficie media de Nicolau sería, en definitiva, el límite de la que tomaría el cuerpo tratándolo mediante rodillos, de modo que los surcos se rellenaran exactamente con la materia sobrante; si en la Fig. 1.8 se asigna la distancia de cada punto de la superficie a la línea envolvente palpada, a una función $f(x)$, esta profundidad media de rugosidad se escribe:

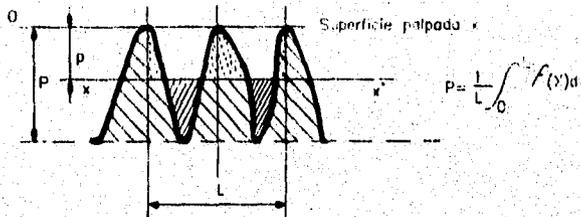


Fig. 1.8

LOS APARATOS DE METROLOGIA

Pueden dividirse esquemáticamente en tres grupos:

- Los aparatos que registran los desplazamientos de un estilete
- Los aparatos ópticos;
- Los aparatos neumáticos;
- Además, la medida puede hacerse directamente sobre la superficie a estudiar, o sobre una reproducción obtenida de modo apropiado.

Los aparatos de desplazamiento de un estilete. Un zafiro de punta extremadamente fina, del orden de una o dos micras de radio, es arrastrado a lo largo de una línea de la superficie a una velocidad de unas 25 micras por segundo; en el perfilómetro se amplifica su movimiento vertical por un medio mecánico registrándolo en una banda que se desenrolla a velocidad regulable; el registro da la distancia extrema de los vértices de los picos y de los valles, lo que se ha llamado P; con el perfilómetro, basado en el mismo principio, amplificado por vía electrónica y donde puede obtenerse la lectura por un

osciloscopio, puede obtenerse, esta vez, la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de la distancia.

Los aparatos ópticos. En el procedimiento del corte óptico se examina al microscopio el corte de la pieza por un plano luminoso extremadamente fino y oblicuo; este procedimiento se adapta bien al control de las superficies de rugosidad fina, semejantes a las que se obtienen en las rectificaciones corrientes del orden de 1 o 2 micras. [4]

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 basa en la utilización máxima del ancho del papel utilizado para graficar. La selección de la ampliación horizontal se regula para obtener un grabado claro de las asperezas individuales sobre el perfil.

Los perfilogramas, deben ser obtenidos de varias secciones de la superficie, esas secciones deben ser las más representativas 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 están presentes sobre el perfilograma, la longitud del perfilograma de cada sección es disminuida para excluir esto, y el número de secciones es incrementado.

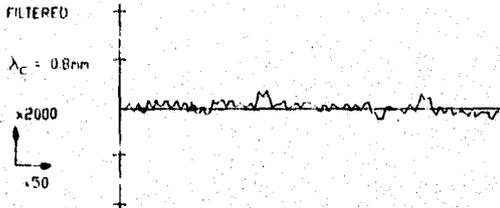


Fig.1.9

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. Fig. 1.9 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.⁶

⁶ TESIS "Estudio Tribológico de Materiales El caso del Zinco", Luis Flavio R. P., pgs 166-167

1.2 CLASIFICACION DE LOS PROCESOS DE DESGASTE

Por su carácter muy complicado los procesos de desgaste no cuentan con una teoría unificada, así mismo durante el proceso de aprovechamiento no se presenta un tipo en particular, sin embargo es necesario establecer una clasificación de sus mecanismos a fin de llegar a una comprensión clara que nos conduzca a establecer en determinado momento cual de estos es determinante por su intensidad.

1.2.1 CLASIFICACIÓN GENERAL DESGASTE POR OXIDACIÓN

Frecuentemente el desgaste por oxidación aparece tanto en la fricción de deslizamiento como en la rodadura cuando la intensidad de formación de capas de óxidos es mayor que la intensidad de destrucción del material por abrasión. La absorción del oxígeno y su difusión en las regiones deformadas plásticamente y elásticamente facilita la formación de algunas soluciones y uniones químicas del metal con oxígeno, lo cual ayuda a la separación de óxidos más frágiles del material mencionado. En materiales ferrosos se forman tres capas de óxidos de hierro: FeO_2 , FeO_3 , FeO_4 .

DESGASTE POR FATIGA

En cuanto a durabilidad de las piezas mecánicas podemos señalar que el desgaste por fatiga que nos interesa principalmente es el superficial. Este tipo de fatiga es causada por contactos puntuales y lineales (zonales). Las fórmulas empíricas para cálculos de la durabilidad superficial tienen la forma:

$$N = (C/P)^a$$

donde

- N - número de ciclos durante la vida de la pieza.
- c - constante dependiente del diseño y manufactura de la pieza.
- p - carga.

En la práctica la fatiga superficial se le ha subdividido en: pitting, spalling (descamación) y fretting.

DESGASTE POR PITTING

Aparece sobre todo en la 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. En el proceso se distinguen 3 etapas: 1. La fatiga superficial del material e inicio de microgrietas.

2. El desarrollo y propagación de grietas como resultado de la acción el descubierto por aceite o grasa. La extracción por medio del lubricante de

FUNDAMENTOS DEL DESGASTE

algunas partículas metálicas que perdieron su cohesión con material propio. El pitting es muy característico para rodamientos y engranajes donde sucede principalmente la fricción de rodadura. Por eso es muy importante escoger un aceite o grasa de buenas propiedades. Los aceites con baja tensioactividad causan precipitadamente las grietas del pitting. Los aceites con mucha viscosidad causan grandes momentos torsionales y bajan el coeficiente de eficiencia.

DESGASTE POR DESCAMACION

El desgaste por descamación (spalling) es característico en la fricción de rodadura sin aceite o grasa.

Durante la carga cíclica, aumentan y crecen continuamente en la superficie las deformaciones y esfuerzos interiores, los cuales causan la formación de microgrietas en la capa exterior de metales.

Finalmente las moléculas del metal se separan de la pieza y crean "escamas" (descamación). El desgaste por descamación está acompañado por el desgaste por oxidación.

DESGASTE POR FRETING

Aparece al contacto de dos superficies que interactúan casi sin movimiento con las cargas cíclicas. Este tipo de desgaste es muy complicado y contiene diferentes tipos de desgaste (por oxidación, por abrasión, por fretting, corrosión).[1]

1.2.2 FENÓMENOS BASICOS EN TRIBOLOGIA

Para el correcto funcionamiento de equipo y maquinaria se deben cambiar los elementos desgastados excesivamente. El papel del Ingeniero va más allá de simplemente sustituir la pieza, sino debe determinar la causa del desgaste, es decir, especificar el mecanismo por el cual dicha pieza fue desgastada.

En el desgaste abrasivo la superficie gastada es clara y limpia se notan rastros de las partículas duras que han actuado sobre la superficie.

En el desgaste Adhesivo la superficie tiene partículas pegadas y áreas jaladas que afectan grandemente la rugosidad. Se notan partículas de otro material. El proceso pasa rápidamente y puede causar la soldadura fría de dos elementos en contacto. Desgaste típico para la fricción seca.

En el desgaste por scuffing presenta las formas del desgaste adhesivo y abrasivo. Las partículas que se pegan a la superficie tienen dureza alta y actúan como abrasivo. Al desgaste scuffing acompaña el rompimiento de la capa lubricante.

El desgaste por fatiga de la superficie, puede influir en la fatiga voluminosa. Las superficies de grietas principales son oscuras y limpias. La última parte de la grieta es clara y tiene rugosidad grande. Esto nos señala el lugar en el cual la grieta empezó, con lo cual tomaremos la decisión de cambiar el diseño o la manufactura. Si durante el proceso de aprovechamiento existió la lubricación, las grietas de fatiga van del interior a la superficie y luego, gracias al efecto de Rebinder, penetrar al interior de la pieza dejando sobre la superficie puntos oscuros (pitting). La diferencia entre pitting y spalling es clara porque cuando

las superficies desgastadas por pitting tienen puntos oscuros, las superficies desgastadas por spalling tienen la red de grietas y partículas de tipo laminar que se desprenden.

1.3 FENÓMENOS DURANTE EL DESGASTE

1.3.1 PROBLEMAS EN EL ROZAMIENTO

En los primeros instantes de la fricción, los esfuerzos exagerados acondicionan el metal en el sentido de una extensión de las áreas de apoyo, lo que puede llamarse "periodo de adaptación".

- En estas áreas de apoyo, la carga no se reparte efectivamente más que sobre un pequeño número de aristas o de picos, que son enrasados, decapitados por el desplazamiento relativo de las dos piezas en fricción; los fenómenos serán aquí plásticos;

- La temperatura alcanza el punto de fusión de uno de los dos metales de forma fugitiva y puntual, estas elevaciones de temperatura microlocalizadas engendran instantáneamente fenómenos físicos (fusión, difusión, temple), fenómenos químicos (soluciones sólidas, formaciones de compuestos iónicos, oxidaciones), transformaciones alotrópicas, soldaduras, arrancamientos y una trituración de la estructura cristalina que desemboca casi en un estado amorfo de la epidermis;

- El contacto de las dos superficies, al no poder ser puntual, porque las presiones serían enormes, origina deformaciones hertzianas que interesan las capas profundas; tendremos por lo tanto, dos clases de accidentes plásticos; por una parte el enrasado de los picos y de las aristas en la superficie; por otra, la fatiga y el endurecimiento por tensiones rítmicas de las capas profundas;

- La rotura de las microsoldaduras epidérmicas y la fatiga cíclica de la dermis disipan energía y crean resistencias al movimiento; los valores relativos de estas resistencias y de la carga de apoyo definen los coeficientes de rozamiento; éstos son de diversas clases según sea el deslizamiento, se gire o se ruede, puesto que la parte respectiva de los cizallamientos epidérmicos o de las pérdidas por histéresis varía profundamente según se considere uno u otro de estos tres casos;
- Estas resistencias originan una cierta cantidad de calor que no se reparte de igual modo entre los dos cuerpos; se verá intervenir, por una parte, características físicas, tales como la densidad, la conductibilidad térmica y la capacidad calorífica; por otra, las velocidades relativas de los dos cuerpos con respecto a la zona de apoyo (intervención de la noción de flujo), de modo que la elección de la pieza que deba estar mejor ventilada es extremadamente importante;
- Añadamos, finalmente, que la presencia de tal o cual modo de lubricación aporta elementos de mejora que no hacen, generalmente, más que superponerse al esquema inicial sin perturbación fundamental; observemos, no obstante, que en este caso será preciso estudiar, no solamente la acción física y físico-química del lubricante sobre el metal, sino también la manera según la cual perturba, despega o corroe las capas de óxidos o de cualquier otro cuerpo químico del cual aquél pueda estar revestido (sulfuros, fosfatos, etc.).

1.3.2 TEORIA DE SOLDADURAS

La formulación del esquema de la teoría de soldaduras se debe a Bowden, Tabor y a su escuela, que resumiendo experiencias nos dice lo siguiente:

Las superficies se ponen en contacto por sus asperezas; en éstas, se producen inmediatamente deformaciones plásticas; para repartir una carga global P , no interviene por consiguiente, la superficie geométrica S , sino solamente una superficie reducida s que soporta efectiva y plásticamente a la carga, Fig. 1.10.

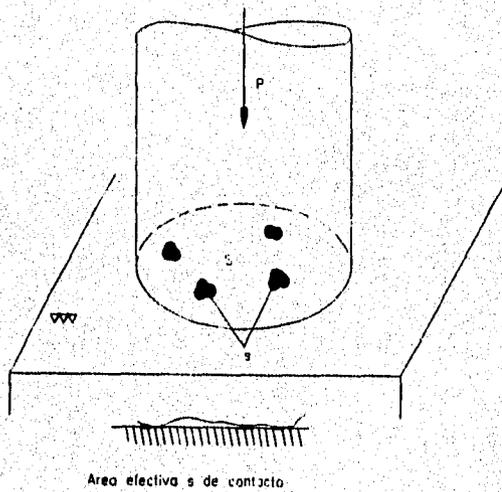


Fig.1.10

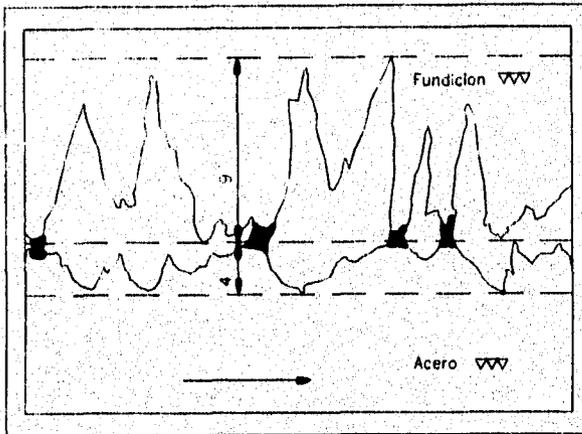


Fig.1.11

Si R es el límite elástico del cuerpo más blando, la ecuación de reparto de la carga se escribe:

$$P = \sigma R$$

Por efecto del movimiento, las elevaciones de temperatura combinadas con estas grandes presiones, provocan filiaciones cristalinas que, por el momento, llamaremos por comodidad "soldaduras", Fig 1.11.

El movimiento, para continuar, deberá cizallar estas soldaduras; si t es su carga de rotura por cizallamiento, la fuerza resistente tangencial que se opone al movimiento se escribirá:

$$T = st$$

El coeficiente de rozamiento

$$\operatorname{tg} \varphi = T/P = st/sR = t/R$$

Pueden presentarse los siguientes casos:

a) Si la resistencia al cizallamiento de las soldaduras es superior a la resistencia al cizallamiento del cuerpo más blando, la rotura tiene lugar en el interior de este cuerpo, y se obtiene la ley siguiente: el coeficiente de rozamiento de un cuerpo es la relación entre su resistencia al cizallamiento y su límite elástico.

Cada quantum de movimiento, ocasiona un transporte del cuerpo más blando sobre el cuerpo más duro y, al cabo de poco tiempo, el rozamiento del cuerpo A sobre el cuerpo B se convierte en el rozamiento del cuerpo B sobre el mismo: este fenómeno recibe comúnmente el nombre de "rozamiento por soldadura", Fig 1.12.

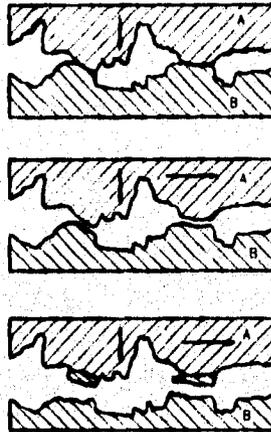


Fig.1.12

b) Si la resistencia al cizallamiento de la soldadura es superior a las resistencias al cizallamiento de uno y otro cuerpo en presencia, el movimiento para continuar, deberá arrancar partículas del cuerpo más blando; no obstante, estadísticamente y al azar de las diversas formas de asperezas, podrá igualmente aparecer un transporte menos importante del cuerpo más duro sobre el más blando; este caso no es más que una variante del caso citado anteriormente; recibe también el nombre de "rozamiento por soldadura".

c) Si las soldaduras entre las caras son más frágiles que el cuerpo más blando, son ellas las que experimentarán los desgarramientos necesarios para la continuación del movimiento; no habrá ni transporte de un metal sobre el

otro, ni lesión de ninguna de las dos superficies; el coeficiente de rozamiento tendrá un valor muy inferior al de los dos casos precedentes; es teóricamente el tipo más favorable; es comúnmente llamado "rozamiento por chollamiento".[4]

1.3.3 APORTACIÓN Y LIMITES DE LA TEORÍA DE SOLDADURAS

Las numerosas experiencias en las que se basa la formulación de la teoría de las microsoldaduras, dan a ésta, una plena validez, lo cual ha marcado un sensible progreso en el análisis de los fenómenos del rozamiento, del gripado y del desgaste:

a) ha permitido una elección a priori de parejas de metales que pueden frotar correctamente uno sobre el otro, imponiéndoles dos características:

- por una parte, tener estructuras cristalinas que no puedan dar filiaciones continuas y homogéneas, como el cromo y la plata;
- por otra, no dar, en caso contrario, más que compuestos intermetálicos frágiles, como el hierro y el estaño;

b) ha permitido análogamente explicar por qué otras parejas deben prohibirse, puesto que dan filiaciones cristalinas homogéneas y sólidas bajo el efecto combinado de la temperatura y de las deformaciones plásticas; éste es el caso del hierro y del aluminio:

c) la teoría de las microsoldaduras ha venido a ser la fuente de un gran número de hipótesis fecundas en los dominios más diversos; por ejemplo:

- si dos metales, como el hierro y el aluminio, dan filaciones cristalinas y no son adecuados para formar un par de fricción admisible, puede pensarse mejorarlos por la adición de un cuerpo C entre las caras, que fragilizará estas soldaduras; en nuestro ejemplo, C puede ser el azufre, y la teoría de Bowden explica así por qué se puede hacer frotar el aluminio sobre el hierro sulfinado;

- Debe ser posible continuar el movimiento, si hay consumo químico de las soldaduras a medida que se producen, y es así como la teoría puede explicar el papel de los aditivos de engrase, tales como el azufre, el fósforo y el cloro.

Por el contrario, la teoría de las microsoldaduras tienen los dos límites principales siguientes:

1. No se podrá admitir como plenamente satisfactoria y absolutamente completa, más que una hipótesis que permita prever de antemano un coeficiente de rozamiento dado y, por el contrario, definir las condiciones de marcha, dando matemáticamente las características del rozamiento previamente elegido; la teoría de las microsoldaduras no permite ninguna de estas dos previsiones, por que su aplicación cuantitativa no da cuenta de todos los resultados de la experiencia.

2. Cuando dos cuerpos rozan en un vacío "inmediato", es decir, cuando están colocados sin previa preparación en un recinto, en el que se llega poco a poco a un vacío extremo, los coeficientes de rozamiento se doblan, triplican, cuadruplican con respecto a su valor al aire libre.

Pero, si se hacen frotar dos cuerpos en el vacío, esta vez después de haberlos desgasificado previamente con cuidado, se llega a valores de

FUNDAMENTOS DEL DESGASTE

coeficientes de rozamiento verdaderamente aberrantes, pudiendo llegar hasta 100.(18)

1.4 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.

A continuación se describen las propiedades que afectan la fricción y el desgaste de los materiales en contacto deslizante; [7]

Propiedades microgeométricas

La superficie rugosa y la textura de la pieza, características que dependen del método de fabricación, corresponden a las propiedades microgeométricas del material.

Propiedades macrogeométricas

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.

Propiedades del medio ambiente

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 las propiedades del ambiente tal

como lubricantes, humedad, temperatura, composición y presión parcial de los gases atmosféricos.

Propiedades metalúrgicas y triboquímicas

Por otra parte, las propiedades metalúrgicas y triboquímicas resultan ser de gran importancia a fin de conformar pares de desgaste que se comporten adecuadamente.

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, de la fuerza producida. *la forma de deformación, las propiedades de los cuerpos en contacto, el elemento interfacial y las condiciones de deslizamiento que determinan los mecanismos de desgaste.*

En el contacto por deslizamiento, el desgaste puede ocurrir debido a la adhesión, fatiga de la superficie, reacción triboquímica y abrasión.

Considérese una pieza mecánica que experimenta rozamientos, durante su vida útil podrán corroborarse tres etapas:

a) en una primera etapa, que podría denominarse "rodaje", el desgaste se efectúa muy rápidamente, pero a velocidad regularmente decreciente, no compromete el funcionamiento, pero obliga a tomar grandes precauciones:

- vigilar el calentamiento
- incremento lento de la carga
- puesta en velocidad progresiva
- lubricante perfectamente limpio y abundantemente renovado
- eventualmente presencia de un aditivo

b) Un segundo periodo que puede llamarse "marcha normal" representa, de hecho, la vida de la máquina; durante ésta el desgaste es débil, o al menos constante;

c) Una tercera etapa, llamada de "envejecimiento y muerte" se caracteriza por un nuevo comienzo del desgaste; pero esta vez con una aceleración creciente, y por incidentes cada vez más frecuentes y más graves hasta el fin de la pieza.[14]

1.4.1 DESGASTE INICIAL

Resulta ser muy ilustrativo graficar la pérdida de volumen o peso con la distancia de deslizamiento.

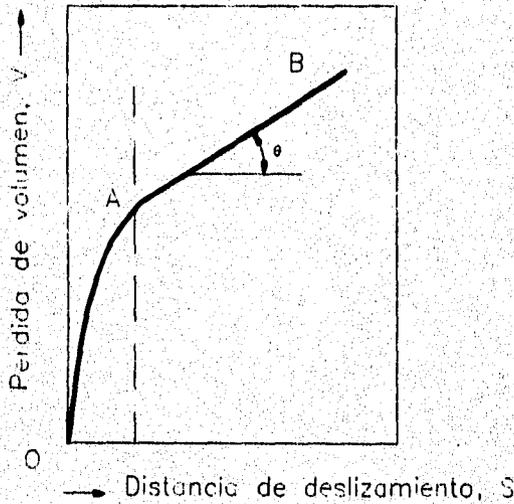


Fig.1.13

FUNDAMENTOS DEL DESGASTE

El punto O corresponde al inicio del rozamiento entre dos superficies, es decir, cuando la distancia de deslizamiento es cero. Como lo muestra la curva claramente, inicialmente la pérdida de peso es curvilínea y la relación de pérdida de peso o volumen por unidad de distancia de deslizamiento disminuye hasta que se une suavemente en A con la recta AB. La cantidad de pérdida de volumen en el régimen determinado por OA es el desgaste en el arranque inicial y AB es el estado estacionario. *La pendiente del estado estacionario es lineal y se utiliza para expresar la razón de desgaste de un material por unidad de distancia de deslizamiento.*

En general podemos decir que: a una carga y velocidad dadas se tiene una razón de desgaste constante para cada material. [9]

Al entrar en contacto dos superficies con movimiento relativo se tiene que el material más blando del par fluye plásticamente de tal forma que el área de contacto aumenta hasta un tamaño de equilibrio proporcional a la carga aplicada, cuando ambos materiales son duros los puntos altos son eliminados por algún mecanismo y de nuevo las ondulaciones superficiales adquirirán una apariencia plana a medida que se incrementa el área de contacto real. Esto es, las superficies han alcanzado un estado de equilibrio y se han acoplado, [39] durante esta etapa el flujo es más pronunciado aún con cargas moderadas, provocando un incremento en la dureza de la interfase. Debajo de la superficie también se forma una zona endurecida por trabajo.

Dados los elementos del desgaste inicial de acoplamiento también conocido como estado inestable o transitorio, desde un punto de vista cualitativo, ahora se tratará desde un punto de vista cuantitativo. En el instante

del desgaste, la proporción de volumen eliminado por unidad de distancia de deslizamiento, debe ser función del volumen de metal disponible en las uniones. En términos generales:

$$dV / dS = - n V \quad \dots\dots\dots(1)$$

En esta ecuación el término V representa al volumen, S la distancia de deslizamiento y n es una constante que depende, posiblemente, de la carga aplicada. El signo negativo describe una situación en la que el volumen original en las uniones disminuye con la distancia de deslizamiento.

Integrando la ecuación (1)

$$\ln V = - nS + C$$

donde C es la constante de integración,

$$\text{ó} \quad V = \exp(-nS + C) \quad \dots\dots\dots(2)$$

Si V_0 es el volumen generado en las uniones cuando la distancia de deslizamiento es cero, entonces se considera $S = 0$ en la ecuación (2).

$$V_0 = \exp(C)$$

Por lo tanto, de acuerdo con la ecuación (2), el volumen residual a una distancia de deslizamiento S es

$$V = V_0 \exp(-nS)$$

El volumen eliminado V_r , a la distancia de deslizamiento S es

$$V_r = V_0 - V = V_0 - V_0 \exp(-nS)$$

ó

$$V_r = V_0 [1 - \exp(-nS)] \quad \dots\dots\dots(3)$$

Ahora V_0 es el volumen generado por una carga y debe ser, como primera aproximación, igual a la suma total de las áreas reales de contacto A_r , multiplicadas por el valor medio del cambio en la deformación δ . Este último se considera como la distancia media en que los promedios de las líneas centrales de los dos cuerpos se aproximaron durante la compresión causada por la carga normal.

Así,

$$V_0 = A_r \delta \dots\dots\dots(4)$$

Al combinar las ecuaciones 3 y 4, se obtiene el volumen eliminado durante el desgaste inicial de acoplamiento en función de la distancia de deslizamiento S .

$$V_r = A_r \delta [1 - \exp(-nS)] \dots\dots\dots(5)$$

El término A_r se relaciona con la carga y la presión de flujo σ_f del material, así que

$$V_r = W \delta / \sigma_f [1 - \exp(-nS)] \dots\dots\dots(6)$$

Probablemente δ se puede estimar a partir de las huellas en las superficies. Sin embargo, se desconoce n y es probable que sea una función de la carga, de la tensión de fluencia del material que se desgasta y de la rugosidad de la superficie de uno o de ambos miembros del par metálico.[9]

1.4.2 EL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO

El coeficiente de rozamiento, puede atribuirse principalmente a los siguientes fenómenos:

- Rompimiento de las microsoldaduras creadas por el efecto combinado de la elevación de temperatura y las altas presiones, provocando un consumo de energía, que depende de las estructuras cristalinas iniciales, de su evolución, de los efectos de temple, de la dispersión, etc.;
- puesto que el movimiento engendra deformaciones elásticas, la recuperación de éstas se efectúa con un consumo de energía debido a la histéresis;
- sobre esta base de deformaciones elásticas, la energía gastada para poner en deformación plástica las pequeñas asperezas depende enormemente del efecto de choque y de la elevación de temperatura;
- finalmente, el reborde frontal que se crea en la primera sollicitación ante el cuerpo que desliza crece en función de la velocidad y de la longitud recorrida, sin que el fenómeno esté aún perfectamente explicado.

De manera formal resulta ser difícil de valorar el coeficiente de rozamiento, puesto que varía en función del tiempo, de la velocidad, de la temperatura, del gradiente de aplicación de la carga, del estado de superficie y del ambiente. [15]

Variación del coeficiente de rozamiento en función del tiempo

El coeficiente de arranque o coeficiente de rozamiento estático es más elevado que el coeficiente en marcha o dinámico; se tiene una representación

intuitiva de esto imaginando que es preciso gastar, para iniciar un movimiento, una cierta energía que servirá para separar las piezas una altura igual a las redes acumuladas de asperezas.

Variación del coeficiente de rozamiento con la velocidad

• Desde el momento en que se ha probado que el apoyo y el deslizamiento de un cuerpo sobre otro hacen entrar las asperezas en el campo plástico, está claro que es preciso esperar que influya la velocidad en el coeficiente de rozamiento:

- desde el momento que se ha probado que se forma un reborde frontal cuando aparece una sollicitación tangencial entre un cuerpo que desliza y su pista, y que este reborde se desplaza, debe admitirse también que la velocidad interviene en el esfuerzo tangencial resistente, opuesto al desplazamiento.

Existen al menos otros dos casos en que interviene el factor velocidad:

- este factor regula, de acuerdo con la forma y la separación de las asperezas, el intervalo de tiempo que media entre dos pasadas consecutivas en un punto dado de la superficie: si la pasada precedente ha descarnado la estructura cristalina en este punto (por ejemplo arrancando la capa de óxido), este intervalo de tiempo decide el que la zona descarnada puede o no reconstruir su capa protectora;
- finalmente, siempre de acuerdo con la topología de la superficie , la velocidad regula el ciclo de los calentamientos y enfriamientos sucesivos, que provoca la fricción en un punto dado; estas variables deciden, a su vez, la aparición y la amplitud de fenómenos conexos: temple, difusión, etc.

Variación del coeficiente de rozamiento en función de la temperatura

a) la elevación de temperatura provoca un descenso del módulo de Young y cambia los límites de los campos elásticos y plásticos del metal;

b) como corolario, la capa de óxido que recubre la superficie, y desempeña en el rozamiento el papel de capa protectora, se encuentra fragilizada por el reblandecimiento de la capa inferior; resulta de ello una sensibilidad mucho mayor para la pegadura epidérmica;

c) del mismo modo que vienen a fijarse por adsorción, sobre superficies frías, moléculas pertenecientes al ambiente, existe un fenómeno inverso cuando la temperatura se eleva. Bowden ha puesto en claro el esquema siguiente:

- cuando un par está lubricado por un ácido graso, sus características de rozamiento pueden deteriorarse inmediatamente si la temperatura se eleva hasta el punto de fusión del ácido ;
- pero esto no tiene lugar cuando, antes de haber alcanzado su punto de fusión, el ácido se ha combinado ya con el metal subyacente y con su óxido para dar un jabón; en este caso, permanecerá viable en todas las zonas de temperatura que se extienden del punto de fusión del ácido graso al punto de fusión de su jabón.[4]



CAPITULO SEGUNDO

NIQUELADO QUÍMICO CON ADICIÓN DE PARTICULAS DURAS

- 2.1 Nociones sobre Niquelado Químico ...51
- 2.2 Propiedades Principales ...53
- 2.3 Niquelado Químico Compuesto ...69
- 2.4 Características que proporciona el
recubrimiento ...84

EL-NIQUELADO QUÍMICO CON ADICIÓN DE PARTICULAS DURAS

2.1 NOCIONES SOBRE NIQUELADO QUÍMICO

La deposición de metales, inicialmente generó el interés por el desarrollo de recubrimientos con fines decorativos, así como métodos para esta aplicación. Sin embargo, con el paso del tiempo se ha generado el nacimiento y evolución de nuevas necesidades, como protección contra la corrosión y el desgaste.

Debido a que la corrosión y el desgaste constituyen la mayor fuente de pérdidas en la industria, se ha desencadenado el desarrollo de nuevos tipos de recubrimientos que van cubriendo los requerimientos actuales. En el caso de los recubrimientos metálicos se pueden mencionar los siguientes tipos de procesos:

RECUBRIMIENTO QUIMICO DE NIQUEL:

o *Recubrimiento de Níquel en el cual el depósito se realiza por medio de una reacción química (sin corriente eléctrica). Producida por una sustancia reductora.*

ELECTORRECUBRIMIENTO COMPUESTO (ELECTROCOMPOSITE):

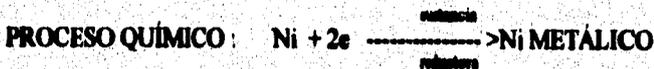
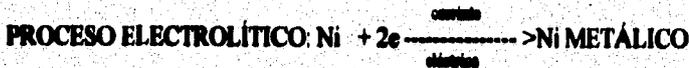
Recubrimiento metálico en el cual, para poder realizar el depósito se requiere de la aplicación de corriente directa, y además el recubrimiento contiene partículas duras.

RECUBRIMIENTO QUÍMICO COMPUESTO :

Recubrimiento idéntico al ELECTROLESS NICKEL pero con incorporación de partículas duras en el baño. Por ejemplo, Al₂, Cr₂O₃, SiC, teflón, diamante, etc.

2.1.1 FUNDAMENTOS

En la electrodeposición de metales, la solución acuosa es utilizada casi invariablemente, fundamentalmente por que gran parte de las sales de metal son altamente solubles en el agua, además porque las soluciones poseen una buena conductividad eléctrica. Para llevar a cabo la deposición electrolítica de níquel, se requiere corriente continua, que lleve a cabo la reducción de iones de níquel a níquel sobre el cátodo. En cambio en el proceso Químico autocatalítico, la reducción se logra empleando sustancias químicas reductoras.



Así en el niquelado químico se emplea un agente reductor que provoca la reducción de una sal de níquel que se encuentra en una solución acuosa, generalmente caliente, y de este modo se deposita níquel sobre una superficie catalítica.

2.2 PROPIEDADES PRINCIPALES

Los recubrimientos químicos de Ni sin tratamiento térmico; tal como se depositan son uniformes, duros, relativamente frágiles, fácilmente soldables, autolubrificantes, sin poros y muy resistentes a la corrosión.²⁰

2.2.1 COMPOSICIÓN Y CONSTITUCIÓN.

Los depósitos son aleaciones Ni-P en contenidos de fósforos que pueden variar de 3 hasta 18-20 % en peso, dependiendo de las condiciones del proceso. En su mayoría los recubrimientos contienen entre 7 y 15 % de P. Se han realizado análisis de espectrografía y adsorción atómica, estos han mostrado además trazas de cobalto, aluminio, cobre, hierro, manganeso, plomo y silicio.

Un análisis típico de elementos intersticiales muestra las siguientes cifras:

Carbono	0.04 %
Oxígeno	0.0023 %
Nitrógeno	0.0047 %
Hidrógeno	0.0016 %

El contenido de P del depósito determina muchas de las propiedades del mismo. Este se concentra en función de la cantidad de hipofosfito de sodio y consecuentemente del pH del baño. La figura 2.1 muestra esta relación para soluciones ácidas.

²⁰ Ducan, R. N., "Corrosion Control with Electroless Nickel Coatings" Memoria de la VII Conferencia Interamericana en tecnología de Materiales p.131-138., México, 1981.

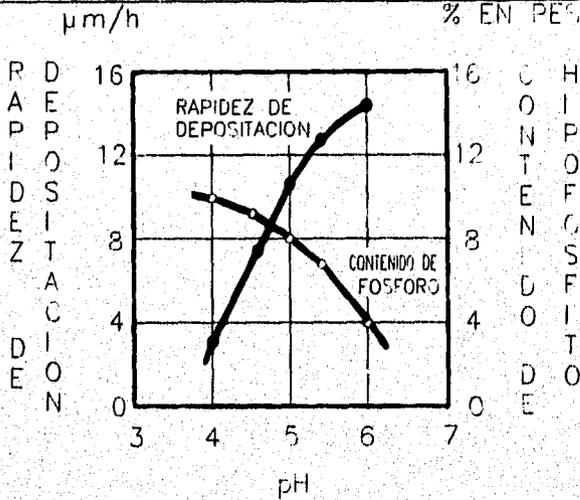


Fig 2.1 Efecto del pH de la solución sobre la velocidad de deposición y el contenido de fósforo en el depósito. [20]

En cuanto a los diagramas de fases Ni-P, estos no han sido muy estudiados. A continuación se muestran dos esquemas del diagrama Ni-P en las figuras 2.2, 2.3 y la solubilidad de P en Ni en detalle en la Figura 2.4 Además, se ha determinado la temperatura eutéctica con exactitud, (875 °C).²¹

²¹ Hansen, M., "Constitution of Binary Alloys", Mc Graw Hill New York, 1958.

NIQUELADO QUÍMICO

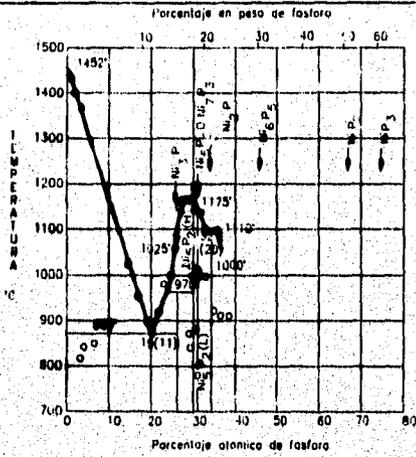


Diagrama de equilibrio Ni-P

Fig. 2.2

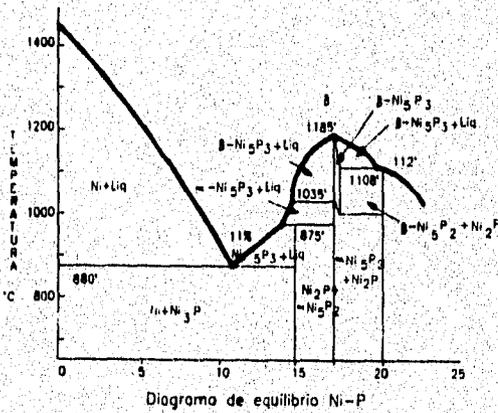


Diagrama de equilibrio Ni-P

Fig. 2.3

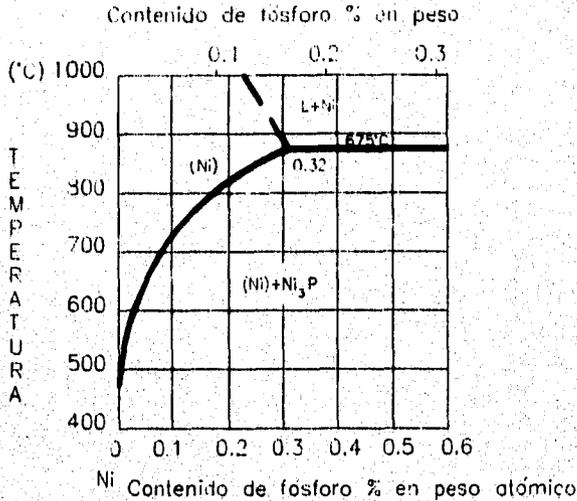


Fig. 2.4 Detalle de la zona rica en Níquel del Diagrama de Equilibrio Ni - P. [34]

En la región rica en níquel, hasta aproximadamente el 36 % en peso atómico (aprox. 24 % de P en peso), se han encontrado tres fosfuros: Ni₃P (14.96 % en peso), Ni₃P₂ (17.43 % en peso) el cual sufre una transformación polimórfica y Ni₃P (20.88 % en peso). Más allá del 36 % se han encontrado otras fases intermedias. Los parámetros de red de los diversos fosfuros son :

Ni₃P es tetragonal, con $a = 9.01$, $c = 4.42$, T de fusión = 975 °C

Ni₃P es hexagonal, con $a = 5.859$, $c = 3.382$, T de fusión = 1112 °C

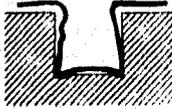
Ni_3P_2 es hexagonal, con $a = 6.61$, $c = 12.316$, T de fusión = 1185 °C.

Todos los fosfuros de níquel son grises, de apariencia metálica y conducen electricidad. Son insolubles en agua, ácidos, bases diluidas, y se disuelven en ácidos fuertemente oxidantes.

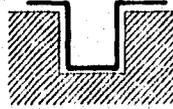
2.2.2 UNIFORMIDAD.

La comparación entre recubrimientos electrolíticos de Ni y los obtenidos por Niquelado químico en cuanto a uniformidad, revelan un mejor resultado en el Niquelado químico, dado que su espesor es el mismo en cualquier sección, esto constituye una de las características que más ha llamado la atención ya que es posible recubrir objetos de formas geométricas complejas con espesores de capa uniformes.

Además, en el níquelado químico se puede controlar el espesor de recubrimiento de acuerdo a la aplicación específica a la que se va a destinar. Se pueden lograr capas tan delgadas como $2.5 \mu m$ para componentes electrónicos, capas mayores ($75-125 \mu m$) empleadas en ambientes corrosivos y capas hasta de $250 \mu m$, para reparación de partes de máquinas. La fig. 2.5 muestra una ilustración de este comportamiento.



Niquelado Electrofítico



Niquelado Químico

fig. 2.5 Uniformidad del espesor.

2.2.3 ADHERENCIA.

La adherencia puede ser valorada a partir de diversos ensayos. El mecanismo de la reacción, permite que se establezcan, en los metales que catalizan la reacción, enlaces metálicos y mecánicos con el sustrato. Por ejemplo se han reportado valores de adherencia sobre acero suave de 2100 a 4200 (Kg/cm) (30000 a 60000 (lb/plg.), en baños ácidos.²²

La adherencia del depósito es menor sobre metales no catalíticos como acero inoxidable, aceros aleados de alta resistencia, aleaciones de cobre, aluminio, titanio, berilio. Con una serie de pre-tratamientos y una buena ejecución del proceso de activación permite elevar la adherencia alrededor de 1400 (Kg/cm). La adherencia se conserva aún a temperaturas tan bajas como la del nitrógeno líquido.

²² Gutsei, Gregoire., Saubestie, E.B., "Métodos Químico Catalíticos"
Graham A.K., Manual de Ingeniería de los Recubrimientos Electrofíticos,
CECSA., p. 520 - 536., 1980.

2.2.4 ESTRUCTURA.

Hasta ahora, no se ha logrado reconocer de una forma general la estructura formada, por lo que se han postulado esencialmente dos puntos de vista:

1) El recubrimiento, recién depositado es amorfo. Idea sustentada por Gutzeit, Rostoker y otros.

Marton y recientemente Duncan; la afirmación se basa en estudios de difracción de rayos X y difracción de electrones.²³

2) El recubrimiento, recién depositado, es micro-cristalino.

Argumentado por Brenell y Ridell, Maire²⁴ y principalmente Graham y sus colaboradores²⁵. Sus estudios se basan también en la difracción de rayos X y de electrones.

Sin embargo, dado lo anterior, quedan claros algunos aspectos:

1.- La estructura del recubrimiento tal como se deposita, es un estado meta-estable de las aleaciones Ni-P.

2.- A medida que aumenta el porcentaje de P en el depósito, el grado de cristalinidad disminuye.

²³ Marton, J.P., Schlesinger, M., "The nucleation, Growth and Structure of Thin Ni - P Films", Journal Electrochemical Society., Vol.115, No.1., p. 16 - 20., Enero, 1968.

²⁴ Randin, J.P., Maire, P.A., "DTA and X-Ray Studies of Electroless Nickel", Journal Electrochemical Society., Vol.114, No.5, p.442-444., Mayo, 1967.

²⁵ Graham, A.H., Lindsay, R.W., Read, H.J., "Structure of Electroless Nickel" Journal Electrochemical Society., Vol.109, No.12., p.1201-1202., Dic.1962.

3.- Aunque no parece definitivo, existe aparente tendencia a pensar que la estructura del depósito guarda relación con las condiciones en que se realiza el proceso, el material base sobre el cual se deposita y el espesor de Ni-P.

2.2.5 PROPIEDADES FÍSICAS GENERALES.

La reflectividad promedio de los depósitos provenientes de baños ácidos es alrededor del 45 al 50 % (la del níquel es de 60 %).

La densidad varía a partir de $8.5 \text{ (g/cm}^3\text{)}$, en función del contenido de fósforo como se muestra en la fig. 2.6, la fig. 2.7 presenta el efecto del % P en el coeficiente de expansión térmica de la capa de niquelado, Tabla 2.1 [22]

PROPIEDADES FÍSICAS DE DEPOSITOS QUÍMICOS NI-P	
PROPIEDAD	VALOR
Densidad (g/cm^3)	7.75 - 8.5
Punto de Fusión ($^{\circ}\text{C}$)	885 - 1010
Resistencia Eléctrica (Ω)	50 - 90
Coefficiente de expansión térmica ($\text{mm/m}^{\circ}\text{C}$)	23 - 12
Conductividad térmica ($\text{cal/cm seg.}^{\circ}\text{C}$)	0.010 - 0.013

Tabla 2.1

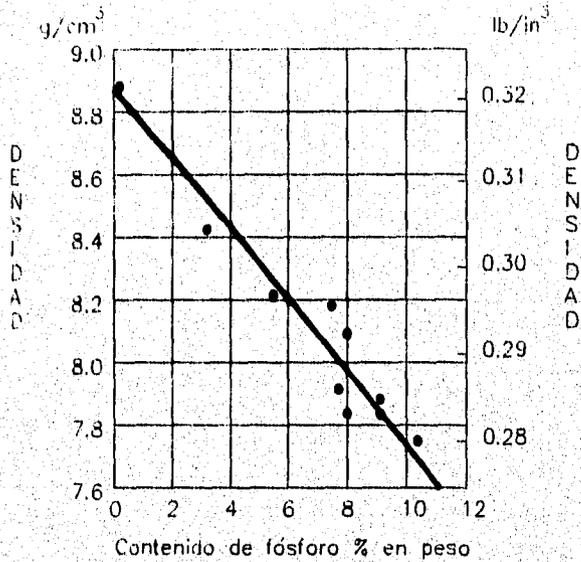


Fig. 2.6 Efecto del contenido de Fósforo sobre la densidad del depósito. [20]

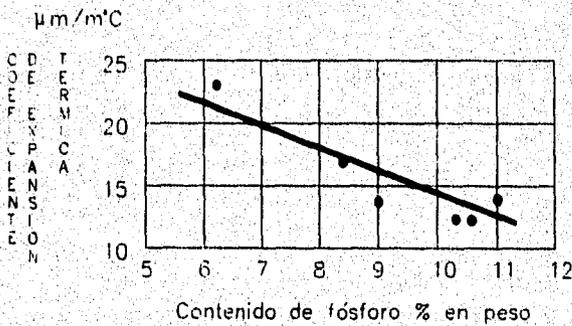


Fig. 2.7 Efecto del contenido de Fósforo en el Depósito sobre su coeficiente de expansión térmica. [20]

2.2.6 PROPIEDADES MECANICAS.

Los depósitos en general tienen buena resistencia, con ductibilidad limitada, y alto módulo elástico, Tabla 2.2. [22]

PROPIEDADES MECANICAS DE DEPOSITOS QUIMICOS NI-P (10)		
VALORES EN FUNCION DEL % DE P		
	5 - 6%	8 - 9%
Resistencia maxima a la traccion (Kn/mm)	39 - 48%	75 - 78%
% de deformacion en fractura	0,008	0,008-0,016
Módulo elastico (Kg/mm)	- - -	17-28

Tabla 2.2

Efectos de recubrimientos químicos Ni-P en la resistencia a la fatiga de aceros de alta resistencia, Tabla 2.3. [22]

% P	% DE REDUCCION DE LA RESIST. A LA FATIGA	No. DE CICLOS
6 - 15%	30 a 40	- - -
8	42	5 X 10
8 - 9	16 a 46	10 X 10
9 - 10	10 a 13	5 X 10

Tabla 2.3

2.2.7 DUREZA Y RESISTENCIA AL DESGASTE.

Las piezas recién niqueladas, muestran micro-durezas de 500 a 600 Hv (carga aplicada 100 g), lo que equivale aproximadamente a 48-50 HRC valor semejante a aceros endurecidos. La microdureza parece no variar con diversos contenidos de fósforo en el depósito y presenta una excelente dureza en caliente. Por ejemplo, a 400 °C la dureza es igual o mejor a recubrimientos de cromo duro.

Debido a su elevada dureza, los depósitos tienen excelente resistencia al desgaste y abrasión. Por un lado la resistencia al desgaste es particularmente buena con contenidos altos de fósforo; por otro lado, la resistencia a la abrasión es buena si se cuenta con lubricación y si la temperatura de la superficie no es demasiado elevada.

2.2.8 ESFUERZOS INTERNOS.

Los esfuerzos internos influyen sobre las propiedades; si existen esfuerzos internos elevados de tracción, estos provocan agrietamiento, ampollas y pueden incrementar la porosidad y disminuir la adherencia y resistencia a la corrosión, los esfuerzos compresivos aumentan la adherencia.

NIQUELADO QUÍMICO

En el caso estudiado (Ni-P) que posee una ductilidad limitada es deseable tener esfuerzos ligeramente compresivos. El tipo de esfuerzo de un depósito es función de las variables de operación, espesor y estructura del mismo, además de las características particulares del sustrato.

2.2.9 PROPIEDADES ELÉCTRICAS Y MAGNÉTICAS.

La conductividad de depósitos químicos Ni-P oscila entre 1.6 y 5.7 % IACS, dependiendo del % de P. Su resistencia eléctrica de aleaciones con 8 - 9 % es cercana a 10 veces la resistencia del Ni puro. Sus propiedades magnéticas son muy bajas.

2.2.10 SOLDABILIDAD

Se pueden soldar con facilidad y se usan en aplicaciones electrónicas para facilitar el soldado de metales ligeros como el Al.

2.2.11 PROPIEDADES QUÍMICAS.

2.2.11.1 POROSIDAD.

La continuidad de un depósito depende de su composición. En recubrimientos con más de 10 % de P se reportan²⁶ como continuos; si no hay continuidad se ven afectadas las propiedades del depósito, sobre todo en ductilidad y resistencia a la corrosión.

²⁶ Duncan, R.N., "Corrosion Control With Electroless Nickel Coatings" Memoria de la VII Conferencia Interamericana en Tecnología de Materiales" p.131-138., México, 1981.

2.2.12 RESISTENCIA A LA OXIDACION.

No se ha estudiado ampliamente este terreno pero se puede mencionar a Marton¹⁷ y Tomlinson¹⁸.

El primero concluye que al calentar depósitos Ni-P, sobre vidrios de borosilicato en ambientes de O₂, resultan ser inoxidables a temperaturas menores a 280 °C y a superiores se forma una capa de óxido; resultados relativos, ya que se refieren a depósitos sobre vidrio cuyas condiciones son diferentes a los del recubrimiento (condiciones de operación).

El segundo, relaciona la cinética de oxidación a temperaturas mucho más elevadas (850° - 990° C). Concluyendo lo siguiente: *después de un período inicial, la cinética de oxidación presenta una ley parabólica, indicando que la reacción es controlada por la difusión, y que la velocidad de oxidación del níquelado químico es aproximadamente 100 veces más rápida que la del Ni puro.*

2.2.13 RESISTENCIA A LA CORROSION.

Una característica importante de este tipo de recubrimiento de depósitos químicos Ni-P, es su resistencia a la corrosión en muchos ambientes.

¹⁷ Pai, S. J., Marton, J.P., "Effect of Oxidation on the Resistivity of Ni-P Films", Journal Applied Physics., p.4972-4976., 1973.

¹⁸ Tomlinson, W. J. Randall, S. C., "Oxidation Kinetics of Electroless Ni Plating in Air", Corrosion Science., Vol.18., p.573-574., 1978.

NIQUELADO QUÍMICO

Los recubrimientos se corromen por presencia de reactivos que atacan al Ni puro, pero su resistencia es función del % de P, superando en muchos casos a la del Cr-Ni.

Los recubrimientos muestran muy buena resistencia al álcalis, soluciones salinas, salmueras, en ambientes industriales químicos y "petroleros", hidrocarburos y solventes. Presentando buena resistencia a soluciones amoniacales, ácidos orgánicos y ácidos reductores. La tabla 2.4 muestra datos del comportamiento de los recubrimientos en algunos medios.

NIQUELADO QUÍMICO

CORROSIÓN DE DEPOSITO: Ni-10.5P EN DIVERSOS MEDIOS

Medio Corrosivo	T(°C)	Micras/Año
Acido Acetico Glacial	20	0.8
Acetona	20	0.08
Sulfato de Aluminio (27%)	20	5
Amoniaco (25%)	20	16
Nitrato de Amonio (20%)	20	15
Sulfato de Amonio, saturada	20	3
Benceno	20	No se corroe
Salmuera(3.5% sal), saturada con CO ₂	95	5
Salmuera(3.5% sal), saturada con H ₂ S	95	No se corroe
Cloruro de Calcio (42%)	20	0.2
Tetracloruro de Carbono	20	No se corroe
Acido Citrico, saturado	20	7
Cloruro Cuprico (4%)	20	25
Cloruro Ferrico (1%)	20	200
Acido Fórmico (88%)	20	13
Acido Clorhidrico (5%)	20	24
Acido Láctico (85%)	20	1
Acetato de Plomo (36%)	20	0.2
Acido Nítrico (1%)	20	25
Acido Oxálico (10%)	20	3
Fenol (90%)	20	0.2
Acido Fosfórico (85%)	20	3
Hidroxido de Potasio (50%)	20	No se corroe
Carbonato de Sodio, saturado	20	1
Hidroxido de Sodio (50%)	95	0.2
Hidroxido de Sodio (45%)	20	No se corroe
Sulfato de Sodio (10%)	20	0.8
Acido Sulfúrico (65%)	20	9
Agua Acidulada, pH=3.3	20	7
Agua Destilada, azoeregado	100	No se corroe
Agua Destilada, saturada O ₂	95	No se corroe
Agua de Mar (3.5% NaCl)	95	No se corroe

Tabla 2.4

CORROSION ATMOSFERICA.- El niquelado químico es casi inmune al ataque en atmósferas rurales, industriales y marinas.

CORROSION EN AGUA DE MAR.- No se encuentran muestras de corrosión después de 4 o 5 años de instalar equipos y válvulas en ambientes marinos. Muestran buena resistencia corrosión-erosión en agua de mar y buen comportamiento en condiciones de cavitación.

AGUAS NATURALES.- Se ha observado muy ligera corrosión, niveles de 0.3 a 0.8 (μm /año) a Temperatura amb. Fig.2.8, en una comparación de aceros al carbono sin recubrimiento y dichos aceros niquelados químicamente[20]. La resistencia se mantiene a temperaturas mayores y en vapor de H_2O . El pH de las soluciones influye en la corrosión de los recubrimientos.

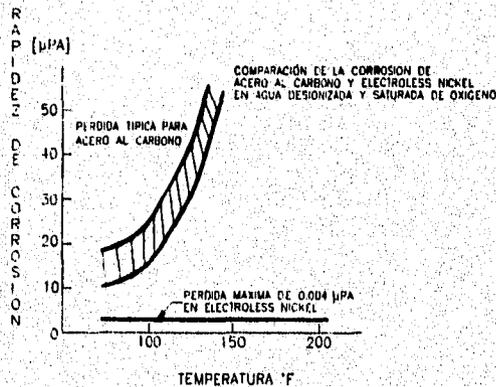


fig. 2.8 Comparación de la corrosión en aguas naturales de aceros al carbono y Depósitos Químicos Ni - P. [20]

2.3 NIQUELADO QUÍMICO COMPUESTO

2.3.1 INCORPORACION DE PARTICULAS EN NIQUELADOS ELECTROLITICOS COMPUESTOS Y NIQUELADOS QUIMICOS COMPUESTOS.

Una diferencia importante entre ambos procesos es el porcentaje de incorporación de partículas en volumen o en peso en el depósito, es menor la cantidad de partículas requeridas para el proceso Químico que para el Electrolytico.

Por ejemplo en la aplicación de partículas tales como el carburo de silicio (SiC), para obtener un mismo porcentaje de partículas incorporadas, en el depósito Químico (Electroless), se requieren 10 g/l de SiC , y para el Electrolytico compuesto se necesitan 100 g/l de SiC , por tanto se puede observar que hay una relación de 1/10 favorable al proceso químico²⁹.

Una tendencia similar ha sido observada con la incorporación de alumina Al_2O_3 (Óxido de Aluminio). Esto se observa en la figura 2.9 de la cual se deduce lo siguiente, teniendo una misma concentración para ambos procesos (10 g/l) se aprecia que para el Electrolytico Compuesto se logra una incorporación menor al 1% en peso de alumina (Al_2O_3), sin embargo por vía

²⁹ Spencer, L.F. "Electroless Nickel Plating", Octubre, 1974., p.35-38
Noviembre, 1974., p.50-54., Diciembre, 1974., p.58-64., Enero, 1975
p. 38-44.

Química se logra la incorporación del 8.8 % en peso, de lo anterior se concluye que el proceso químico es más eficiente en relación a la cantidad de partículas incorporadas en el recubrimiento.

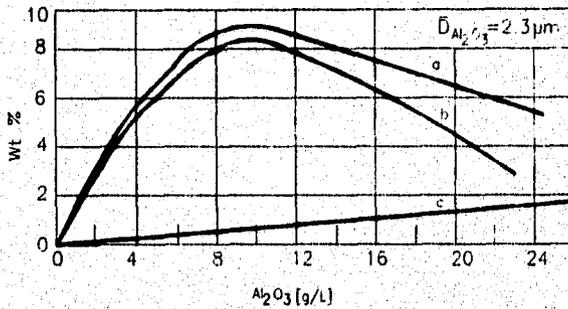


Fig. 2.9 Dependencia de la cantidad de partículas incorporadas con respecto a la concentración de Al_2O_3 en la solución. Deposición de $Ni-P-Al_2O_3$, (a) $83^\circ C$ y (b) $93^\circ C$ © Resultados de Bresson, Heinke y Wiegand [1971] mediante electrodeposición de $Ni-Al_2O_3$. [26]

Por otra parte Dennis, Sheikh y Silverstone³⁰ observaron en la deposición de carburo de cromo (Cr_3C_2), utilizando el proceso químico, que aun cuando la concentración de partículas en el baño sea muy variable de 10 a 200 g/l, el volumen de incorporación permanece prácticamente constante (alrededor del 25 % en volumen).

³⁰ Dennis, J. K., Sheikh, S. T., Silverston, E. C., 1981., "Trans. I.M.F." p.59:118.

Una diferencia más entre ambas técnicas, es que por el Proceso Electrolytico compuesto la cantidad de incorporación de partículas puede ser incrementada con la adición de surfactantes, mientras que por Químico Compuesto la activación superficial no afecta al nivel de partículas incorporadas, además para un elemento de forma geométrica compleja, aplicando el proceso Químico Compuesto se obtiene un recubrimiento uniforme, es decir el grado de incorporación y el espesor son muy uniformes. Con el proceso Electrolytico compuesto el espesor y el nivel de incorporación dependen de la densidad de corriente, la cual es la limitante para la uniformidad en un objeto de geometría compleja; como consecuencia, el espesor y la cantidad de partículas incorporadas varía en las diferentes zonas de la superficie recubierta.

En los recubrimientos compuestos basados en níquel obtenidos por estos procesos se pueden presentar diferencias en sus propiedades tanto para el proceso Electrolytico compuesto y el Químico compuesto, ya que las matrices en los dos compuestos son diferentes, la matriz del Químico Compuesto es una aleación Ni-P o Ni-B, mientras que la matriz del Electrolytico compuesto es Ni. En cuanto al costo del baño, el Químico Compuesto tendrá el costo más bajo, y esto constituye una ventaja importante particularmente para materiales muy costosos como el diamante.

2.3.2 SISTEMAS DE RECUBRIMIENTO

En principio se pueden hacer recubrimientos con cualquier metal que pueda ser utilizado como recubrimiento Químico, como por ejemplo; Ni, Co, Cu, Sn, y Au. Ha sido posible realizar recubrimientos químicos compuestos de estos, La investigación más extensa se ha realizado en el sistema Ni-Composite.

Por otra parte es importante mencionar los materiales susceptibles de ser niquelados Químicamente, dentro del grupo de materiales metálicos tenemos; Hierro, Rutenio, Cobalto, Paladio y Osmio, en estos el depósito se hace por inmersión directa. Acero inoxidable, aleaciones de Titanio, Aluminio y Berilio, estos requieren un proceso de activación previa.

Cadmio, estaño, zinc y Antimonio, para estos es necesario un proceso de activación y una capa de cobre. Cromo, Cobre, Plata, Selenio, Uranio, Vanadio, Tungsteno y Molibdeno, estos se depositan encima de una capa muy delgada de Niquel.

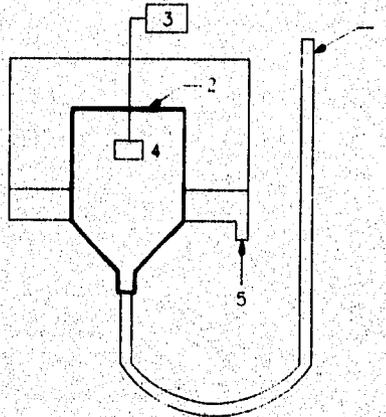
En el grupo de materiales no metálicos tenemos:

Polímeros: Resinas Epóxicas, Acrílicos de temperatura elevada, ABS, Polipropileno, Resinas fenólicas, poliamidas, Mylar, etc.

Cerámicos: Óxidos de Zirconia, Alumina, Cuarza, varios tipos de vidrio etc.

2.3.4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA DEPOSICIÓN DE RECUBRIMIENTOS QUÍMICOS COMPUESTOS.

La figura 2.10 muestra un arreglo experimental para la deposición del proceso Químico Compuesto.



2.10 Esquema del arreglo experimental para la deposición de Níquel Químico

Se utiliza un recipiente cilíndrico con fondo cónico el cual tiene una chaqueta exterior. El electrolyto con las partículas dispersas a una temperatura apropiada es bombeado através del fondo, la chaqueta exterior recoge el electrolyto que se derrama, el sustrato es suspendido en el compartimiento inerte, para mantener las partículas en suspensión el electrolyto es agitado lentamente.

Se usan varios métodos de agitación similares a los utilizados en la deposición de Electrolítico compuesto, siendo los más comunes los siguientes; agitación por aire, circulación del baño, agitación por ultrasonido, el sistema líquido aire y la técnica recubrimiento por bombeo. Addison y tennet 1976³¹.

El tipo de movimiento del material y la técnica de suspensión afectan el resultado, condiciones de un flujo irregular, impiden una dispersión uniforme de las partículas. Este factor es más crítico para el Químico compuesto que para el Electrolítico compuesto, varios trabajos de investigación establecen que la agitación con aire y una rotación lenta de los materiales a recubrir producen un mejor resultado. A pesar de las recomendaciones normales para recubrimientos por baños Químicos, las cuales indican que estos deben estar libres de impurezas, las partículas que pueden ser agregadas, pueden provocar un problema de estabilidad mayor para el Químico Compuesto composites que para un baño Químico normal.

Por tanto se deben adicionar estabilizadores para contrarrestar una descomposición espontánea del baño.

Las recomendaciones hechas para el mantenimiento de baños Químicos deben seguirse para los recubrimientos Químicos Compuestos.

Sin embargo la filtración continua no puede ser usada, pero durante su uso la filtración periódica es esencial después de que son agregadas las partículas.

³¹ Kedward, E. C., Addison, C.A., Tennet, A.A.B., 1976., "Trans. I.M.F." P.54:8.

Las impurezas de las partículas podrán ser atrapadas en el baño por lo tanto, el nivel de impurezas en el baño debe monitorearse frecuentemente.

2.3.5 MATERIALES QUE SE PUEDEN AGREGAR

2.3.5.1 RECUBRIMIENTOS QUÍMICOS COMPUESTOS A BASE DE NIQUEL

Básicamente todas las sustancias no metálicas usadas en la deposición por el proceso electrolítico Compuesto son adecuadas para el depósito por Electroless. En la tabla 2.5 se muestran los diversos materiales que pueden ser agregados para hacer compuestos de EN, destacándose la amplia investigación que se ha realizado en compuestos con SiC y Diamante.

Materiales que son apropiados para la incorporación dentro de baños de Niquelado Químico			
A.	Carbón Grafito	Vidrio Plástico	Talco Diamante
B. Óxidos, Carburos, Boruros, Nitruros, Sulfuros, Silicatos, Carbonatos, fosfatos, Oxalatos, y fluoruros de:	Aluminio Boro Cromo Hafnio Molibdeno Silicio Calcio	Tantalo Vanadio Tungsteno Zirconio Manganeso Magnesio	Bario Estroncio Cerio Hierro Niquel Titanio

Tabla 2.5

Una formulación típica para un recubrimiento con un baño Electroless Composites es la siguiente:

FORMULACION (Brown, 1985)

NiSO ₄ ·6H ₂ O	30 g/l
NaH ₂ PO ₂	20 g/l
Acido láctico	25 g/l
Acido propiónico	5 g/l
Plomo	1-4 mg/l
pH	4.4-4.8

Concentración de partículas 0.25 - 2 % en peso

El plomo agregado al baño es necesario para lograr la estabilidad del mismo y a su vez el aumento de plomo en la solución incrementa la concentración en volumen de partículas. Por ejemplo para el 1% en peso se presenta una concentración de 20 a 25 % en volumen en el depósito y para un 2 % (por peso) se lograra aproximadamente un 30 % en volumen de partículas.

Dentro de la variedad de partículas que se pueden agregar en un baño Químico se presentan los siguientes casos:

Ni-P-TiO₂. Utilizando partículas de Óxido de titanio.

Ni-P-Al₂O₃. Empleando Partículas de Alumina, en este caso el máximo grado de incorporación ocurre en una concentración de 10 g/l de Alumina en suspensión.

Para los depósitos mencionados anteriormente se obtiene un incremento en su dureza, resistencia a la corrosión y resistencia al desgaste.

Ni-P-ZrO₂. El diámetro medio es de 7.0 micras, la incorporación que se obtiene es de 4.5 % en peso de ZrO₂. La tensión, microdureza y porosidad no son afectadas por el contenido de ZrO₂. La resistencia a la abrasión de estos compuestos es mejor para condiciones de baja fricción en seco. La máxima resistencia a la corrosión se obtiene para una concentración de partículas de 8 g ZrO₂/l.

Parker (1972)¹², logró codepositar polvo de Mo con EN, un depósito con un contenido de 70 % Ni, 18 % Mo, 4% Cr y 8% P.

El estudio del efecto del tratamiento térmico en la dureza de este compuesto y sus resultados son mostrados en la figura 2.11

¹² Parker, K., 1972., Prof. "Interfinish - 72", SGT. Basel, Switzerland, p. 202.

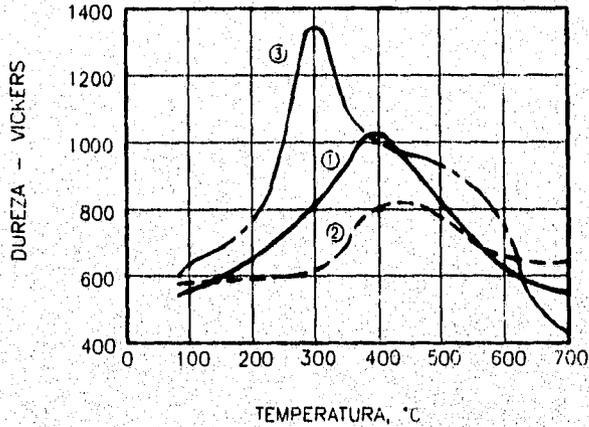


Fig. 2.11. Efecto del tratamiento térmico sobre la dureza en la escala Vickers del níquelado químico contenido cromo y tungsteno. [26]

2.3.5.2 ELECTROLESS Ni-SiC COMPOSITES

El electroless Ni-SiC ha sido el más popular debido a su naturaleza inerte, aprovechando su alta pureza y alta dureza, el cual proporciona una buena resistencia contra el desgaste.

El mecanismo para combinar Ni y SiC es relativamente simple. Las partículas son suspendidas en la solución protectora y son agregadas siendo su enlace a esta, un enlace mecánico

Para obtener las propiedades deseadas, se debe tener control en el contenido de partículas, tamaño de las mismas, dureza y/o ductilidad de la matriz, esto último viene a ser una función primaria del recubrimiento si el tamaño de las partículas es elevado (1 a 3 μm) la dureza también será más elevada. Sin embargo, cada partícula debe estar bien adherida para evitar desprendimiento del recubrimiento.

El Electroless Ni no solamente va a proveer el encapsulado y la resistencia a la corrosión, ductilidad relativa, además sirve de material base que soporta las partículas de SiC, el proceso Químico Ni-SiC compuesto ha sido utilizado como un recubrimiento resistente al desgaste. H.S. Avery³³ dentro de su definición de desgaste ha separado dicho desgaste en seis factores, los cuales son; impacto, corrosión, abrasión, fricción, calor y vibración y definidos como a continuación se menciona.[27]

IMPACTO . Es la condición en la que hay una aplicación instantánea de esfuerzos de compresión y tensión involucrados en la superficie del material. Las fuerzas de compresión están enfocadas al punto de impacto y el resto de

³³ Avery, M.S., Editado por Albert G.H. Dietz., "Surface by Welding for Wear Resistance", Composite Engineering Laminates (Cambridge, Mass. The MIT Press, 1969) ., p.3.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

las fuerzas involucradas estarán en tensión, en muchas aplicaciones donde las fuerzas de compresión son equilibradas la cubierta Ni-SiC trabaja bastante bien.

CORROSIÓN

El desgaste-corrosión en los metales se manifiesta en dos diferentes formas. La primera cuando el material realmente entra en una solución o disolvente y la segunda cuando es intergranular, no hay pérdida de material o esta es muy poca, pero los granos del material literalmente quedan disociados debido a las áreas corroídas en sus uniones. La subsecuente pérdida de resistencia y dureza ante las otras formas de desgaste no solo son substanciales sino catastróficas, la resistencia de la cubierta Ni-SiC para este tipo de desgaste es típicamente idéntica a la cubierta del proceso Químico de Ni.

ABRASIÓN.- El desgaste debido a este factor resulta en una verdadera pérdida de material y puede ser clasificada basándose en las fuerzas involucradas.

En bajas presiones de abrasión las partículas abrasivas rozan contra la superficie pero, las raspaduras no son significativas como para transportarla.

En altas presiones de abrasión, las partículas se incrustan, finalmente en el peor de los casos se perfora la superficie y porciones del sustrato se desprenden.

FRICCIÓN.-Este tipo de desgaste ocurre entre la superficie de dos partes que están en contacto, la lubricación puede prevenir el contacto, reduciendo la tendencia a unirse y consecuentemente se reduce el desgaste.

CALOR.- El desgaste debido al calor o a ciclos térmicos es un fenómeno ante el cual el recubrimiento Ni-SiC ofrece poca o nula resistencia.

Las temperaturas que exceden los 399 °C producen ablandamiento del Electroless Ni, y superiores a 538 °C el material no es lo suficientemente fuerte para la unión adecuada de las partículas.

VIBRACIÓN.- Este factor puede crear condiciones de desgaste de la superficie común creadas por la abrasión y el desgaste, sin embargo la carga y descarga interna que induce la fatiga no puede ser contrarrestada por un recubrimiento.

2.3.5.3 ELECTROLESS NI-DIAMANTE

El diamante está disponible en diversas formas, fundamentalmente existen dos tipos; monocristalino y policristalino. El diamante sintetizado por choque es policristalino y tiene una superficie irregular. La elección del tipo de diamante que puede ser usado depende del uso final del recubrimiento. El diamante monocristalino es adecuado para aplicaciones abrasivas por sus

características de su superficie, ya que presenta bordes y puntos agudos. Existe una limitación en el uso del diamante sintético monocristalino para hacer un EN-Diamante, éste parece catalizar y producir la descomposición homogénea del baño, (Feldstein¹⁴) 1983. Consideraron que la descomposición podía deberse a impurezas en el diamante sintético tales como el Hierro, Níquel, Cobalto y Cobre, los cuales son utilizados como catalizadores para su manufactura.

En cuanto a la resistencia al desgaste, el compuesto con sólo cristales de diamante no es útil porque su superficie es áspera y raspa el acabado superficial.

El diamante policristalino sintetizado por choque es idealmente apto para esta aplicación.

El recubrimiento realizado por el proceso Químico de Ni-Diamante policristalino tiene una buena superficie protectora y propiedades antifricción, aunque el primer uso de este compuesto fue para el mejoramiento de la resistencia a la corrosión hoy en día la aplicación más importante es para combatir el desgaste.

Los baños usados para el recubrimiento con este compuesto tienen que ser cambiados más frecuentemente, los baños EN pueden ser usados más de 10 ocasiones pero el EN-Diamante después de 3 ocasiones tiene que ser reemplazado (recuperando el diamante).

¹⁴ Graham, A. H., Lindsay, R. W., Read, H. J., "The Structure and Mechanical Properties of Electroless Nickel", Journal Electrochemical Society., Vol. 112., No. 4., p. 401-413., Abril, 1965.

Normalmente las partículas utilizadas para la resistencia al desgaste son de 6 micras, otros diámetros standard son 1, 3 y 4 μm , un recubrimiento standard contendrá de 20-30 % de diamante en volumen y el espesor deberá ser alrededor de 20 μm .

2.3.5.4 RECUBRIMIENTO QUÍMICO DE Ni-Cr₂C₃.

Este Compuesto ha sido investigado en detalle por Dennis, Sheikh y Silverstone (1981) [24]. Estos autores produjeron este composite usando Ni-P 80 y una concentración de 10 g/l de partículas de Cr₂C₃ con un tamaño de 2-9 micras. El baño puede operarse con un PH de 4.5 y una temperatura de 92 °C. Se usa un sistema de agitación por aire para conservar las partículas en suspensión, la cantidad de deposición es cerca de 18 micras/h el depósito presenta un contenido de 64.8 % de Ni, 7.2 % de P y 27 % de Cr₂C₃. El depósito de EN de este baño ha sido analizado para 90.8 % de Ni y 9.1 de P, el depósito contiene el 25 % en volumen de partículas. En un codepósito el recubrimiento presenta una dureza de 645 HV. Los autores concluyen que la elevada dureza del EN-Cr₂C₃ es causada por los efectos del mecanismo de endurecimiento por precipitación.

2.4 CARACTERÍSTICAS QUE PROPORCIONA EL RECUBRIMIENTO

2.4.1 ESTRUCTURA DEL ELECTROLESS COMPOSITE.

Han sido estudiados diversos elementos cubiertos con Ni Compuesto, haciendo cortes transversales y observaciones mediante microscopía electrónica, lo cual muestra en las secciones transversales, que las partículas son dispersadas uniformemente en el depósito, la figura 2.12 nos muestra una sección de un compuesto de Ni-Al₂.



Fig 2.12

La dispersión homogénea de partículas en el depósito, se logra tomando las medidas pertinentes para el equilibrio en la suspensión de partículas durante el proceso de recubrimiento, de tal manera que la concentración de partículas sea la misma a cualquier altura de la solución.

2.4.2 ACABADO SUPERFICIAL.

El acabado superficial presenta un cierto incremento en la aspereza por la incorporación de partículas dentro del depósito Químico, ya que las partículas sobresalen de la superficie incrementando la irregularidad de la superficie.

La aspereza de un recubrimiento Electroless Composite depende de varios factores, tales como el acabado superficial del sustrato, el grado de inclusión de las partículas, el tamaño de las partículas y su distribución, y el espesor de la capa. Para obtener un buen acabado superficial es importante que el sustrato este libre de asperezas así como emplear partículas pequeñas en el recubrimiento, dependiendo de las condiciones de operación del recubrimiento.

2.4.3 DUREZA Y RESISTENCIA AL DESGASTE.

La principal aplicación del Electroless composite es la de proporcionar mayor resistencia al desgaste a la superficie recubierta. En general, la dureza y resistencia al desgaste están relacionadas. A mayor dureza, mayor resistencia al desgaste. La dureza de un compuesto depende de la matriz y de la resistencia adicional proporcionada por las partículas. Los depósitos EN exhiben un incremento en su dureza después de aplicarles un tratamiento térmico. La tabla 2.6 muestra el incremento en dureza, originada por tratamiento térmico de EN y EN composite.

	DUREZA VICKERS (Kg/mm ²)
Matriz EN, como depósito	500
Matriz EN, tratada térmicamente	870 ^a
Compuesto con SIC, como depósito	700
Compuesto con SIC, tratado térmicamente	1300 ^o

Tabla 2.6

Existen diversos factores que afectan a la resistencia al desgaste de los composites entre los que destacaban los siguientes:

NIQUELADO QUÍMICO

La cantidad y el tamaño de las partículas incorporadas, dureza de las partículas, dureza de la matriz y compatibilidad de las partículas con la matriz.

CAPITULO TERCERO

EXPERIMENTACIÓN

3.1 Preparacion de las Probetas	...88
3.2 Elaboración de Recubrimientos	...92
3.3 Valoración inicial de las probetas recubiertas	...94
3.4 Ensayo de desgaste	..102
3.5 Analisis de resultados	..109

III.-EXPERIMENTACIÓN

3.1 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

La preparación de las probetas constituye un factor muy importante en la obtención de resultados reproducibles. Sin embargo, la preparación de probetas puede variar dependiendo del tipo de material a ensayar. La rugosidad de la superficie, la geometría de la muestra, microestructura, homogeneidad, dureza, y la presencia de capas superficiales, debe ser controlado cuidadosamente para la pareja de materiales en contacto.

3.1.1 ELECCIÓN DEL MATERIAL

La elección del par de desgaste se determinará en función de su afinidad, es decir su aptitud a dar compuestos intermetálicos, de su aptitud para dar soluciones ordenadas, intersticiales, así como de la magnitud de las variables del rozamiento presentadas, ya que éstas, como todas las variables del rozamiento no pueden dar a priori, una certeza absoluta de buen funcionamiento; la adecuada elección del par, en función del comportamiento recíproco de las estructuras, no es una condición suficiente; pero, a partir de un cierto grado de sollicitación, esta elección se hace condición necesaria. Se elimina con tal clasificación de pares, el 90% de causas de fallo, mientras que la elección de un par de metales dotados de una aptitud para las filiações cristalinas da lugar indefectiblemente al gripado.

EXPERIMENTACIÓN

A continuación se presenta un cuadro de afinidades, Tabla 3.1. En el cual se va relacionando, en la primera columna, a los metales utilizados comúnmente en construcción mecánica, en masa o recubrimiento; la segunda columna agrupa por otra parte estos mismos metales que se pueden poner en obra fácilmente por vía electrolítica u otra (se ha puesto el carbono). La tercera califica el comportamiento físico-químico mediante las palabras soluble, insoluble, reacciona. La cuarta columna da cualitativamente una indicación sobre su resistencia al gripado con los tres adjetivos; malo, pasable y bueno.

PAR DE DESGASTE		SOLUBILIDAD	CONDICIÓN
Acero	Aluminio	Solubles	Malos
-	Antimonio	Reaccionan	Buenos
-	Plata	Insolubles	Buenos
-	Cadmio	Insolubles	Buenos
-	Carbono	Reaccionan	Buenos
-	Cromo	Solubles	Malos
-	Cobalto	Solubles	Malos
-	Cobre	Solubles	Pasables
-	Estano	Reaccionan	Buenos
-	Indio	Insolubles	Buenos
-	Magnesio	Insolubles	Pasables
-	Manganeso	Solubles	Malos
-	Moibdeno	Solubles	Malos
-	Niquel	Solubles	Malos
-	Plomo	Insolubles	Buenos
-	Teluro	Reaccionan	Buenos
-	Tungsteno	Solubles	Malos
-	Zinc	Solubles	Malos

Tabla 3.1 Cuadro de afinidades entre materiales [4]

El examen del cuadro de afinidades no nos hace optimistas sobre el uso que la mecánica de superficies puede hacer del níquel con el acero, sin embargo como toda regla tiene sus excepciones. A pesar que el recubrimiento utilizado presenta el 92% de níquel, el fósforo constituye el 8% restante y este metaloide basta para hacer viable al rozamiento la capa de níquel, conservando en el todas sus cualidades anticorrosivas.

material del sustrato

acero nacional norma 1018

composición química 0.18 - 0.23% C

0.30 - 0.60% Mn

Este acero de bajo carbono es muy utilizado en la industria metalmeccánica de nuestro país, debido esto principalmente a su bajo costo, pero es un acero cuyas propiedades mecánicas no son adecuadas para condiciones de carga y desgaste muy elevadas. En este caso el recubrimiento puede mejorar su funcionalidad, sobre todo cuando se requiera de un endurecimiento superficial para obtener una mayor resistencia contra el desgaste.

Material abrasivo; como complemento del par de desgaste se selecciona el acero D2, por sus características de operación, alta dureza.

3.1.2 MAQUINADO DE PROBETAS

La preparación de las muestras fue la siguiente. Se maquinaron probetas de la geometría y dimensiones adecuadas para la realización de los ensayos de desgaste, como se muestra en la Fig. 3.1, el maquinado se realizó en una

EXPERIMENTACIÓN

Máquina de control numérico obteniendo así una adecuada precisión y un acabado superficial aceptable.

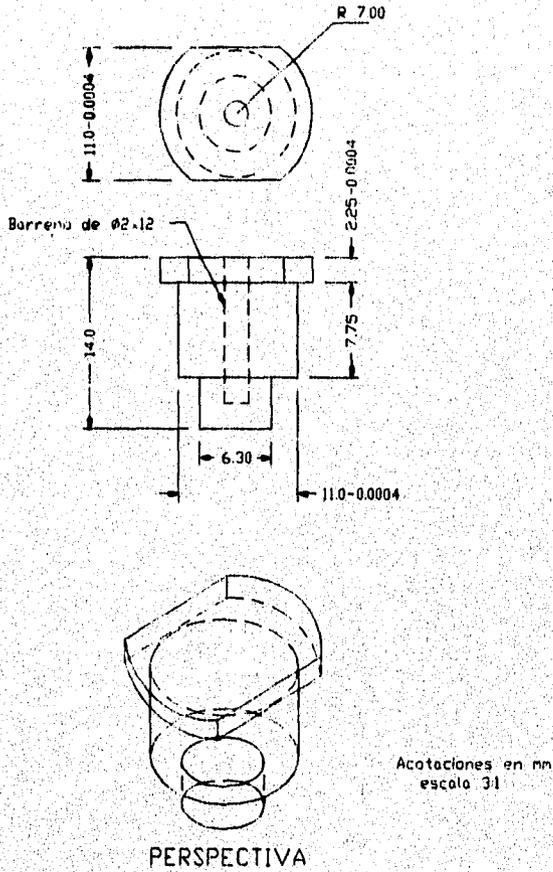


Fig. 3.1 Especificaciones dimensionales para probetas sometidas a desgaste.

3.2 ELABORACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS

Para la elaboración de los recubrimientos se siguieron las recomendaciones citadas en el capítulo anterior, además de realizar ajustes en el mecanismo que mantiene en movimiento a las probetas dentro de la solución, esto con la finalidad de obtener una adecuada dispersión de las partículas en la solución, obteniéndose con esto una distribución homogénea de las partículas en el recubrimiento.

El procedimiento para realizar los recubrimientos es el siguiente: Como ya se ha mencionado la limpieza es un factor de gran importancia en el proceso de recubrimiento. Las partes a recubrir mediante un niquelado químico deben tener una superficie limpia, sin ninguna partícula de óxido visible; los aceites, las grasas o pinturas para ser removidas requieren métodos ordinarios de pre-tratamiento, de tal forma que se tenga una superficie limpia, para lograr un catalizador eficiente en la reducción de los iones de níquel.

A continuación se describen los pasos a seguir en el proceso de limpieza de aceros al carbono:

- 1.- Desengrase al vapor (Tricloroetileno).
- 2.- Limpieza alcalina ó por emulsión
- 3.- Enjuague en caliente.
- 4.- Enjuague en frío.
- 5.- Decapado, HCL 20 - 30% (sin inhibidores)
- 6.- Enjuague en frío.
- 7.- Repetir puntos 2 - 6

8.- Enjuague en caliente (agua desmineralizada).

El proceso anterior es necesario cuando los materiales a recubrir están cubiertos de una gran cantidad de impurezas (óxidos, grasa, polvo, etc.), situación que obliga a realizar una limpieza exhaustiva siguiendo todos los pasos mencionados anteriormente.

En nuestro caso, a las probetas sólo se les aplico una limpieza introduciéndolas en un recipiente con acetona, empleando el ultrasonido como mecanismo de limpieza, ya que al maquinarse las probetas, la superficie quedo libre de óxidos y sólo fue necesario retirar el polvo y grasas debido al maquinado.

Para realizar los recubrimientos se tomo como base la formulación Brown ⁴⁰ que contiene las cantidades siguientes:

Sulfato de níquel	30 g/l
Hipofosfito de sodio	20 g/l
Acido láctico	25 g/l
Plomo	1-4 mg/l
PH	4.4 - 4.8
Concentración de partículas	0.25 - 2% en peso

⁴⁰ Brown, L., 1965., "Trans. I.M.F.", 62:139.

EXPERIMENTACIÓN

Se disuelven los reactivos en agua a temperatura ambiente, se verifica que el PH se encuentre en el intervalo adecuado, se calienta la solución hasta alcanzar una temperatura comprendida entre los 85 y 90 °C y a continuación se agregan las partículas.

Posteriormente, el material es colocado en el mecanismo recubridor, el cual es introducido dentro del baño manteniendo en suspensión las probetas. Este mecanismo realiza un movimiento circular vertical y un movimiento circular rotacional lo cual permite que las probetas estén siempre en movimiento y, al trasladarse en la suspensión, atrapan las partículas a su paso quedando encapsuladas en el recubrimiento (Ni-P), ya que éstas son mantenidas en suspensión permanentemente por el propio movimiento del mecanismo, produciéndose con esto, recubrimientos con una distribución muy homogénea de partículas.

Por otra parte, cabe señalar que se deben seguir en la mayor medida posible, todas las recomendaciones referentes a mantener la estabilidad del baño dentro de los parámetros del proceso, como: la presencia de impurezas, control de temperatura, PH, etc., a fin de evitar la descomposición de la solución.

3.3 VALORACIÓN INICIAL DE LAS PROBETAS

Tomando en cuenta las etapas anteriores se ha logrado obtener recubrimientos con distintos espesores y diversos niveles de incorporación de partículas, los cuales han sido analizados por medio de microscopía electrónica de barrido. Para ello se hizo uso de un microscopio electrónico de barrido

EXPERIMENTACIÓN

marca Phillips modelo XL20, del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería, en el cual se llevaron a cabo observaciones desde 300 hasta 3000 aumentos, con voltajes de 20 a 25 KV.

Por otro lado, se realizaron estudios adicionales en un microscopio electrónico de barrido marca Zeiss, modelo DSM 962, del laboratorio Voon Algemene Metalurgie, Siderurgie en Fysische Metaalkunde de la Universidad de Gante, Bélgica, que cuenta con un sistema de microanálisis químico tipo EDS. En este microscopio se observaron muestras de acero al carbono y acero para moldes revestidos con recubrimientos Químicos de Níquel con adición de partículas de Oxido de Aluminio. Se realizaron observaciones bajo diferentes aumentos (1000 a 3000 Å). Las observaciones se llevaron a cabo empleando un voltaje de 15 KV y se realizaron a lo largo de todo el contorno de las piezas y a través de ello fue posible verificar aspectos tales como el espesor y uniformidad de los recubrimientos así como la distribución de las partículas de Al_2O_3 .

También se hicieron algunas observaciones en el microscópico óptico metalloplan, siendo dichas observaciones de 160, 320 y 800 aumentos, con la intención de comparar y apreciar las ventajas de la microscopía electrónica.

Para evaluar la dureza del recubrimiento de Ni-P- Al_2O_3 se llevaron a cabo mediciones empleando el microdurómetro Vickers del Laboratorio de Pruebas mecánicas del Departamento de Ingeniería Mecánica de esta Facultad, utilizando para ello cargas de 50 y 100 grs.

3.3.1 ESPESOR

Se realizó la medición de los espesores de los recubrimientos por medio del microscopio electrónico.

A fin de conocer el espesor de recubrimiento se prepararon muestras para ser vistas a través de microscopio electrónico; empleando una resina conductora a base de grafito, calentada y compactada de modo que la muestra quedara inmersa en una masa polimérica y con una geometría que facilitara su observación en el microscopio.

Con las observaciones efectuadas en tres muestras se construyó la tabla 3.2.

MECION DE ESPESOR	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
1	7.14	8.16	7.57
2	7.14	7.87	7.82
3	9.71	7.25	7.75
4	6.96	7.14	7.82
5	6.79	9.89	7.31
6	7.37	7.49	8.15
7	7.78	7.60	7.75
VALOR MEDIO	8.67	7.91	7.73

Tabla 3.2 Espesores de recubrimientos de Niquelado Químico Compuesto (mediciones en μm).

3.3.2 MICRODUREZA

Examinada fundamentalmente, la dureza no es una propiedad elemental, como por ejemplo la resistencia a la tracción sino que depende de un conjunto de otras propiedades aún mal definidas.

Por consiguiente la medida de la dureza tiene un carácter más o menos empírico y los diferentes métodos empleados no dan resultados concordantes. Los recubrimientos electrolíticos tienen casi siempre una dureza mayor que la del metal considerado al estado de revenido. Sobrepasa frecuentemente la obtenida por forjado.

Esto es totalmente cierto para el cromo, el níquel y el rodio. La razón es la siguiente: se pueden considerar separadamente o en conjunto, una cristalización muy fina y una orientación selectiva de los cristales, las tensiones internas, las materias extrañas diseminadas en la red. En el último caso, existe un paralelismo con las aleaciones ligeras (Duraluminio) en el que su endurecimiento por envejecimiento es conocido.

Según la opinión general, el hidrógeno ocluido no debe considerarse como la causa de la dureza sino más bien como el causante de la fragilidad. La dureza de los recubrimientos electrolíticos depende sobre todo de la composición del baño y de las condiciones de trabajo de este último; puede variar en un campo bastante largo. En los baños de Níquel, los iones potasio dan la dureza; los iones cloro actúan en sentido contrario. La dureza de los

EXPERIMENTACIÓN

depósitos de cromo puede ser aumentada por diferentes cationes, por ejemplo: el hierro trivalente y el cromo trivalente.⁴¹

La mayor parte de los procedimientos de medida de la dureza se basan en la profundidad de la penetración de una punta.

Para una primera aproximación se mide la dureza de una capa de cromo con la ayuda de una lima plana. Para ensayos comparativos de dureza, por ejemplo, con recubrimientos de níquel, pueden utilizarse las agujas de Aldrey⁴² aunque estén previstas para medidas en las aleaciones ligeras. La aguja más blanda de forma triangular indica una dureza brinell de 30 a 35 Kg/mm², la más dura de forma redondeada una dureza de 70 a 80 Kg/mm². Los revestimientos de níquel depositados a partir de diferentes baños se encuentran como rayados ó como no rayados⁴³.

Con los aparatos de ensayo de dureza propiamente dichos, se estima la profundidad sea: de la huella de una bola de acero (Brinell), de una punta de diamante piramidal y cuadrada (Vickers), de una pirámide asimétrica (Knoop), de un cono de diamante (Rockwell C), o de una punta de diamante (dureza por rayado).

Se mide el diámetro de la huella, la diagonal de la huella piramidal, la profundidad de penetración del cono de la bola, o la longitud de la raya, es decir, la carga para una longitud de raya determinada.

Para los recubrimientos electrolíticos, existe una dificultad fundamental, ya que los resultados están influenciados por los espesores débiles que se encuentran sobre el metal base. Pueden depender de su espesor y de la

⁴¹ M. L. ALKAN. *Electroplating*, 12, 1959, 155.

⁴² P. F. Dujardin y Co., Düsseldorf.

⁴³ No publicada.

EXPERIMENTACIÓN

dirección de la huella. Para efectuar las medidas de microdureza se trabaja con cargas de 1 a 100 gr. La profundidad de la huella no debe sobrepasar el tercio del espesor de los depósitos, y en casos particulares la décima parte.

Según Weiner [18], el ensayo de rayado es el que se aproxima más a los resultados prácticos obtenidos por erosión, el Vickers indica los resultados que se obtendrían únicamente por presión.

La longitud de las rayas puede ser de 10µm con cargas de gramos ó de 3µm con cargas de centésimas de gramo.

En U.S.A. el método Knoop es preferido para los recubrimientos electrolíticos, porque da una huella plana, fácil de medir. Para la misma carga, da una huella tres veces mayor y una profundidad de huella 2/3 más débil, en comparación con la pirámide Vickers.

Se realizaron mediciones de dureza Vickers en los recubrimientos de Niquelado Químico tanto simple como compuesto (con adición de partículas duras), así como en la superficie del disco abrasivo (acero D2).

Dichas mediciones aparecen en la tabla 3.3.

RECUBRIMIENTO	CARGA (gr)	MEDICIONES DE DUREZA (HV)					VALOR MEDIO
NIQ. SIMPLE	50	321	593	593	549	509	513
NIQ. COMPUESTO	100	824	606	572	772	464	648
NIQ. COMPUESTO	100	514	572	642	606	681	603
DISCO ABRASIVO ACERO D2	500	705	740	757	740	720	732

Tabla 3.3 Medición de dureza Vickers en muestras Representativas para pruebas de desgaste.

3.3.3 ESTADO DE SUPERFICIE

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 superficie se presenta un incremento en la aspereza debido esto a la incorporación de partículas dentro del depósito electroless.

Esta es una consecuencia de las partículas que sobresalen de la superficie y resultan en una apariencia característica. (una topografía típica de la superficie de Al_2O_3).

La aspereza de un recubrimiento Electroless composite depende de varios factores, tal como el acabado superficial del sustrato, el tamaño de la partícula y su distribución, grado de inclusión de partículas y espesor de la capa.

Datos de rugosidad según perfilograma

Niquelado Químico Simple

Average	N=5	
Range	25 μm	Ra = 0.30 μm
λ_c	0.25 mm	
	x5	

Niquelado Químico Compuesto

Average	N=5	
Range	25 μm	Ra = 0.33 μm
λ	0.25 mm	
	x5	

Disco Abrasivo (Acero D2)

Average	N=5	
Range	25 μm	Ra = 0.35 μm
λ	0.8 mm	

En resumen tenemos las siguientes características de las probetas recubiertas:

Niquelado Químico Simple:

Valoración de espesor por Microscopía electrónica:

10 μ m - 15 μ m

Dureza. Microdureza Vickers

513 HV

Rugosidad.

Ra = 0.30 μ m

Niquelado Químico Compuesto:

Valoración de espesor por Microscopía electrónica:

10 μ m - 13 μ m

Dureza. Microdureza Vickers

661 HV

Rugosidad.

Ra = 0.33 μ m

3.4 ENSAYO DE DESGASTE

El equipo utilizado es especial para desgaste por deslizamiento en seco o con lubricación, consta de una cámara para aislar las probetas de prueba del medio ambiente, esta cámara tiene la posibilidad de aumentar su temperatura interna por medio de resistencias que emiten por convección y radiación calor al interior, este es un factor importante pues la temperatura en condiciones reales aumenta impredeciblemente, este 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

EXPERIMENTACIÓN

máquina y se lee en un galvanómetro ubicado en la parte inferior izquierda, el galvanómetro puede darnos la lectura de temperatura, tanto de la cámara aisladora como de cada una de las muestras de prueba, el dispositivo para aplicar la carga axial está ubicada en la parte superior de la máquina y consta de un brazo de acero. En un costado se ubica un plato para colocar los discos con diferentes cargas, desde 1/2Kg. hasta 5 Kg. En la parte central del brazo de acero se localiza una espiga formando una T, localizándose en la parte inferior de esta una bola (balín) la cual se centra en un punto con el eje del portaprobetas que tiene en la parte superior otro balín, el apoyo totalmente perpendicular de la carga se garantiza nivelando la barra con un nivel de gota lo cual hace que la carga se aplique de forma axial 100%, en el otro extremo de la barra se coloca un contrapeso.

Las R.P.M. se controlan con una perilla ubicada en la parte superior derecha, el torque se mide en la carátula ubicada en el costado superior izquierdo, el cual representa el brazo de palanca o la fuerza de adhesión a la que es sometido el arreglo. Para evaluar la duración de cada prueba se mide el tiempo con un cronómetro externo y con dichos datos se calcula después la distancia de deslizamiento.

3.4.1 ELECCIÓN DE LA PRUEBA DE DESGASTE

La prueba por deslizamiento en caso de recubrimientos es objetable dado que en la mayoría de las veces no se cuenta con espesores

adecuados no siendo la excepción el presente caso, sin embargo resulta viable desde el siguiente punto de vista.

La elección de la prueba de desgaste se funda en la siguiente hipótesis:

La presencia de partículas de óxido de aluminio presupone lo siguiente:

- Incremento de dureza y por consiguiente un aumento en la resistencia al desgaste.
- Mejor comportamiento a elevadas temperaturas en relación al Niquelado Simple.
- Disminución del efecto de adhesión, en virtud de la menor área expuesta a rozamiento por parte de la matriz Ni-P.

3.4.2 CARACTERÍSTICAS DE LA PRUEBA DE DESGASTE

A fin de corroborar la hipótesis anterior se propusieron las siguientes pruebas:

Dicha experimentación se realizó bajo condiciones de deslizamiento en seco, utilizando una máquina de espiga y disco modelo 51 Cygnus II Discs Pins

SWANSEA TRIBOLOGY CENTER.

Se recubrieron probetas de acero 1018 AISI, con Ni-P y Ni-P-Al₂O₃ y se sometieron a desgaste por deslizamiento contra un disco de Acero D2, Fig 3.2, bajo los siguientes parámetros de operación:

DIMENSIONES DEL DISCO ABRASIVO

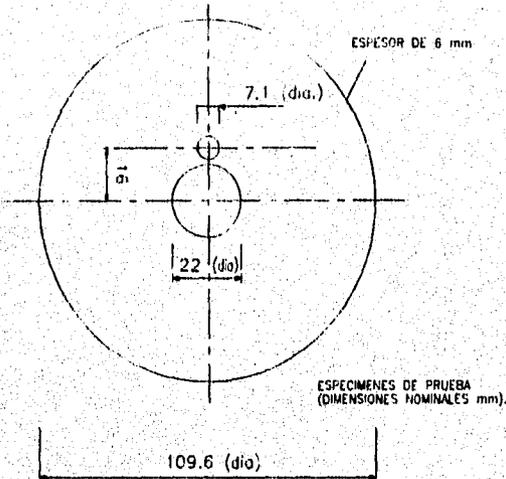


Fig 3.2 Especimen de prueba (dimensiones nominales mm).

Carga axial

La carga axial efectiva aplicada durante la prueba resulta ser la carga neta más el peso muerto, es decir:

$$\text{Carga axial} = \text{Peso Muerto} + 100 \text{ gr}$$

Donde:

$$\text{Peso Muerto} = 1384 \text{ gr.}$$

$$\text{Carga axial} = 1484 \text{ gr.}$$

Revoluciones

EXPERIMENTACIÓN

Las revoluciones se fijaron en un rango de 100 a 500 r.p.m., a intervalos de 100.

Tiempo

El parámetro tiempo se calculó tomando las r.p.m. y una distancia de deslizamiento constante $S_0=1256.64$ m (este valor se estableció observando inicialmente en una prueba, que a un intervalo de tiempo de 120 seg. a 500 r.p.m. se obtenía un desgaste cuantificable por los medios disponibles).

Los intervalos de tiempo para las distintas revoluciones se muestran en la tabla 3.4.

RPM	Δt (Seg)	DIAMETRO DE PISTA (mm)
500	120	40
400	86	70
300	80	100
200	300	40
100	343	70
50	480	100

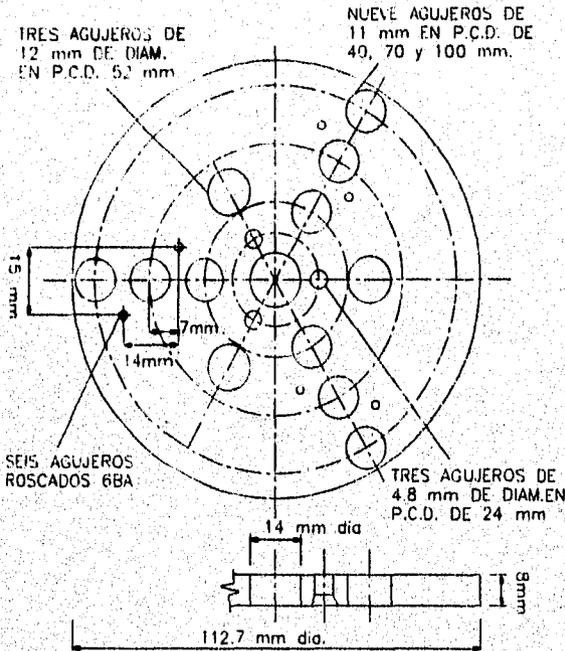
Tabla 3.4

3.4.3 PLANTEAMIENTO EXPERIMENTAL

Se realizaron pruebas en igualdad de condiciones de operación tanto para Ni-P como Ni-P-Al₂O₃, y se graficaron los resultados en una misma

gráfica con el objeto de apreciar mejor el comportamiento de dichos materiales.

En cada prueba se utilizaron tres probetas a la vez, colocandolas en un portaprobetas y en una misma pista a la vez; 40, 70 o 100 mm, Fig 3.3, esto es para asegurar un mejor contacto de las superficies.



MATERIAL: ACERO SUAVE CROMADO

Fig 3.3 Placa soporte de probetas (dimensiones nominales).

Un parámetro de gran importancia, a fin de tener una interpretación correcta de los fenómenos de desgaste entre dos superficies es el coeficiente de desgaste.

EXPERIMENTACIÓN

Dadas las características de la prueba de desgaste y las condiciones experimentales (fricción seca) se eligió el siguiente modelo matemático:

$$K = VH / L S_0$$

Donde:

H = Dureza del material Vickers [kg./cm²]

ρ = densidad del material (kg./cm³)

V = Volumen desgastado [cm³]

Valores de parámetros experimentales:

R.P.M. = revoluciones por minuto

L = carga axial

Δt = incremento de tiempo (t)

S₀ = distancia de deslizamiento (cm)

A fin de calcular el volumen desgastado se emplea la siguiente expresión:

$$P_i - P_f / \rho = V$$

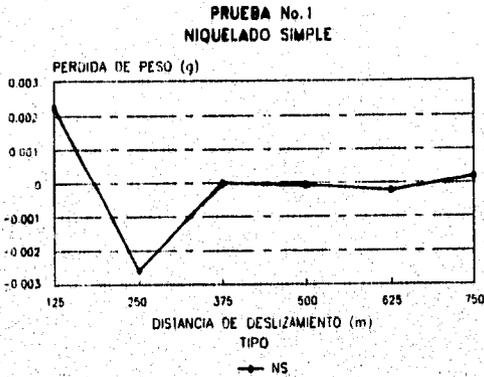
Finalmente la razón de desgaste se calcula de la siguiente manera:

$$q = k L \rho$$

O bien

$$q = V\rho / S_0$$

3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS



NS NIQUELADO SIMPLE

La gráfica No 1 fue obtenida bajo los siguientes parámetros de prueba: 500 r.p.m. (1.04 m/s), diámetro de pista de 40mm, carga de 1484 gr. (tomando en cuenta el peso muerto y carga aplicada de 100 gr.) y a intervalos de tiempo de 2 min.

En el primer intervalo es notoria una pérdida de peso por parte de la probeta recubierta, esta pérdida representa un desgaste inicial, es decir un periodo en el cual las mayores asperezas son enrasadas a fin de llegar a un estado estacionario, representado por una mayor área de contacto y una razón de desgaste constante.

En el segundo intervalo la probeta aparentemente gana peso, lo cual resulta lógico si tomamos en cuenta que después de alcanzar 125 m. de

distancia recorrida a la velocidad de 500 rpm alguna de las superficies en contacto alcanza la temperatura de fusión de forma microlocalizada y puntual es decir se presenta la formación de microsoldaduras, posteriormente para poder continuar el movimiento se produce la rotura o cizallamiento de las soldaduras, en otras palabras, de no haberse presentado una aparente ganancia de peso, significaría que la rotura no se produce en la soldadura sino en alguno de los materiales del par de desgaste lo cual implicaría que; las uniones formadas por el compuesto intermetálico tuviesen una resistencia a la rotura (cizallamiento) más elevada que el mismo recubrimiento.

Es evidente que el comportamiento del par de desgaste alcanza una estabilidad después de los 375 m. de distancia de deslizamiento a las condiciones de prueba ya citadas (condiciones de velocidad crítica).

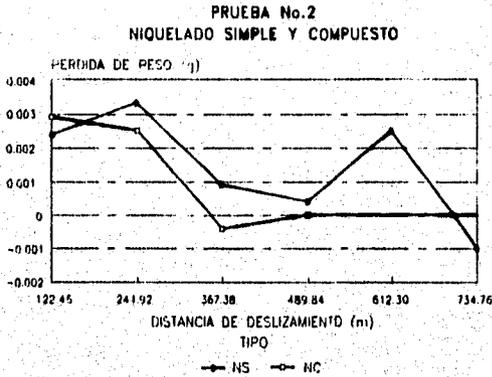
La vida útil del recubrimiento es de 625m, dado que después de esta distancia sobreviene la pérdida total del recubrimiento sobre la superficie de la probeta y una fuerte adhesión sobre la superficie del disco.

De la observaciones anteriores podemos concluir que el coeficiente de rozamiento así como la pérdida de peso se mantiene variable a lo largo de la prueba, sin embargo podemos establecer que; a medida que transcurre la prueba esta variación en ocasiones es muy notoria y en ocasiones no lo es, percibiéndose (como se encuentra establecido en la literatura [9]) tres etapas:

1. Un periodo inicial transitorio caracterizado por una gran pérdida de peso llamado raspado inicial; 0 -125m.
2. Un periodo estable, caracterizado por un valor de pérdida de peso por unidad de distancia de deslizamiento (razón de desgaste; 53.8×10^{-6}) constante; 250 - 625m.

- 3. Una etapa de pérdida total de recubrimiento, caracterizada por una fuerte adhesión e incremento significativo en la oposición al deslizamiento;
625 m →.**

Paralelamente a las etapas mencionadas, se presenta el fenómeno de endurecimiento de las capas internas y superficiales, aunque es importante analizar estos cambios de dureza de las superficies en contacto, es más directo y proporciona una mejor idea estudiar la oposición al movimiento o torque, con respecto a la facilidad al deslizamiento, dado que el par de desgaste será viable en virtud de que exista pérdida mínima de energía para vencer la oposición al movimiento y que esto se realice con la mínima pérdida de volumen por parte del recubrimiento.



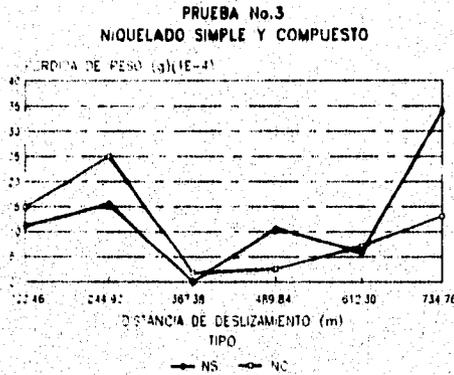
NS NIQUELADO SIMPLE
NC NIQUELADO COMPUESTO

La gráfica No 2 fue obtenida bajo los siguientes parámetros de prueba: 400 rpm (1.46 m/s), con un diámetro de pista de 70 mm, carga de 1484 gr. y a intervalos de 86 seg.

En el primer intervalo se observa una mayor pérdida de peso del Niquelado Compuesto (N.C.) de 0.0003 gr. en comparación con 0.0025 gr. del Niquelado Simple (N.S.) esto hablaría de una mejor actuación para el rozamiento por parte del N.S., Sin embargo para el segundo intervalo de tiempo el N.S. pierde peso en tanto que el N.C. se mantiene con el mismo peso presentándose en este último la formación de uniones soldadas. Analizando la fuerza de oposición al movimiento (Torque, Tabla 3.5) nos damos cuenta que en los primeros momentos el N.C. ofrece una mayor resistencia al movimiento 10kg en tanto que el N.S., 6.5 kg., llegando a ser menor en el periodo de vida útil para el N.C., esto se debe principalmente al raspado inicial o enrasamiento

EXPERIMENTACIÓN

de las crestas más altas, en los primeros instantes de la prueba. El valor de razón de desgaste es muy similar llegando a ser imperceptible, para N.S.; 6.36×10^{-6} y N.C.; 7.69×10^{-6} , por lo que puede concluirse que presentan un mismo comportamiento en éste aspecto.



NS NIQUELADO SIMPLE
NC NIQUELADO COMPUESTO

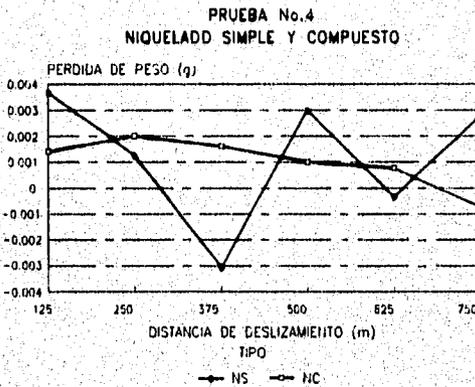
La gráfica No.3 fue obtenida bajo los siguientes parámetros de prueba: 300 rpm (1.57 m/s), con un diámetro de pista de 100 mm, carga de 1484 gr. y a intervalos de 80 seg.

En el primer intervalo, como en la prueba anterior a 400 rpm), nuevamente se presenta una mayor pérdida de peso por parte del N.C. (0.0015 gr.) en comparación con el N.S. (0.0011 gr.) y continua la tendencia de pérdida de peso hasta 250 m. de distancia recorrida, a partir de éste punto se presenta la formación de uniones soldadas, en virtud de que en los subsiguientes intervalos de tiempo aparentemente ganan y pierden peso ambos

EXPERIMENTACIÓN

recubrimientos, salvo la diferencia de que el N.C. presenta un comportamiento más estable entorno a la transferencia de material de una superficie a otra del par de desgaste, es decir; el N.S. presenta saltos más bruscos con respecto a la pérdida de peso y formación de uniones, lo cual implica que el fenómeno de adhesión es más fuerte en el N.S.

En cuanto a la oposición al deslizamiento. De la Tabla 3.5 observamos que en el periodo de vida útil el N.C. presenta menor oposición (13 kg.), comparado con el N.S. (12 - 16kg).



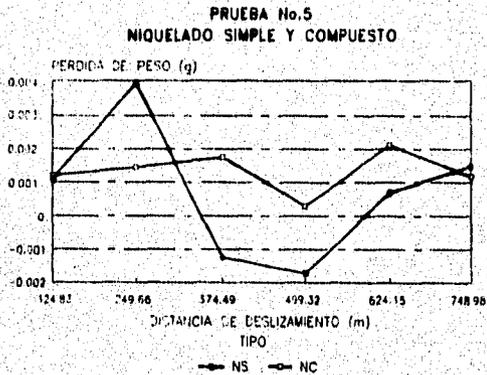
La gráfica No.4 fue obtenida bajo los siguientes parámetros de prueba: 200 rpm (0.42 m/s), con un diámetro de pista de 40mm, carga 1484 gr. y a intervalos de tiempo de 300 seg.

En el primer intervalo se observa una mayor pérdida de peso por parte del N.S., en los subsiguientes intervalos se observa que el N.C. tiene un

EXPERIMENTACION

comportamiento excelente para estas condiciones de operación dado que tanto el desgaste y la formación de uniones soldadas se mantienen en el mínimo es decir con variaciones de peso imperceptibles, por otra parte el N.S. manifiesta un comportamiento muy variable; con gran pérdida de peso y una gran transferencia de material entre superficies, particularmente en el intervalo de 250 - 500 m. de distancia de deslizamiento, lo cual implica una adhesión muy marcada.

Un dato que corrobora el buen comportamiento del N.C. lo tenemos en el valor de la oposición al deslizamiento (Tabla 3.5), el N.C. presenta 6 - 7.5kg, en tanto que el N.S. presenta 6.5 - 14 kg., observándose una fuerte variación para este último.

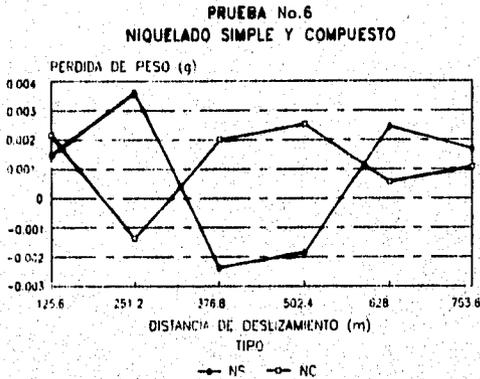


NS NIQUELADO SIMPLE
NC NIQUELADO COMPUESTO

La gráfica No.5 fue obtenida bajo los siguientes parámetros de prueba: 100 rpm. (0.36 m/s.), con un diámetro de pista de 70 mm., carga 1484 gr., y a intervalos de tiempo de 343 seg.

En el primer intervalo se observa un comportamiento similar para ambos recubrimientos, sin embargo después de 125 m. el N.C. presenta un mejor comportamiento, esto es; con un mínimo desgaste y formación de uniones soldadas, oscilando la transferencia de material en 0.0001 gr. del valor de desgaste obtenido en el primer intervalo a lo largo de 750 m., es decir es el comportamiento más uniforme observado. Por otra parte el N.S. presenta un comportamiento desastroso, dado que presenta una gran pérdida de peso en el segundo intervalo (125 - 250 m.) y una formación de uniones soldadas muy grande en el tercer intervalo (250 - 375 m.).

Dadas las observaciones anteriores, resulta obvio pensar, que recubrimiento presentará las mejores condiciones en cuanto a la oposición al deslizamiento, teniendo para el N.C. un valor de torque en el intervalo; 6 - 15 kg. y para el N.S. un valor de; 5 - 17 kg. Lo cual pone de manifiesto que el N.C. presenta mejores características en cuanto a deslizamiento, para dichas condiciones de operación en comparación con el N.S.



NS NIQUELADO SIMPLE
NC NIQUELADO COMPUESTO

La gráfica No.6 fue obtenida bajo los siguientes parámetros de prueba: 50 rpm.(0.26 m/s), con un diámetro de pista de 100 mm., y a intervalos de 480 seg.

Es interesante analizar la presente prueba dado que se trata de una condición crítica por la baja velocidad en la que se llevo a cabo.

En el primer intervalo el N.C. presenta una mayor pérdida de peso, lo cual resulta lógico por lo siguiente; en virtud de la baja velocidad, se tiene un acoplamiento mejor de las asperezas y por ende es más rápido el enrasamiento o deformación plástica de las crestas más altas, presentándose un valor de torque (oposición al deslizamiento) más elevado; para el N.C.; 8 kg., a diferencia del N.S.; 3 - 7 kg.

EXPERIMENTACIÓN

En el segundo intervalo de tiempo el N.S. continúa perdiendo material en tanto que el N.C. no presenta pérdida de peso sino una aparente ganancia, esto se debe a la formación de uniones soldadas. La formación de éstas uniones en primer instancia por parte del N.C. puede resultar ilógico si se piensa que por el contrario en virtud de la presencia de las partículas de Al_2O_3 (mayor punto de fusión; inerte para las condiciones de la prueba) se retrasaría la formación de uniones soldadas, no obstante se debe tomar en cuenta que se desarrollan mayores esfuerzos para deformar las crestas en el N.C. (mayor torque) esto causa un mayor incremento en la temperatura hasta llegar al punto de fusión de la matriz de forma microlocalizada.

Aunque no pueda decirse que el N.C. presenta en éste caso buen comportamiento a desgaste si puede citarse un mejor y más uniforme en comparación al N.S.

A continuación se presenta una tabla con los resultados experimentales obtenidos en las pruebas de desgaste para Niquelado Químico Simple y Niquelado Químico Compuesto.

NUMERO DE PRUEBA	TIPO DE PRUEBA	COEFICIENTE DE ROZAMIENTO EN EL PERIODO DE RASPADO INICIAL	RAZON DE DESGASTE EN EL PERIODO DE RASPADO INICIAL (gr/m)	VELOCIDAD (m/s)	TORQUE (kg)		
					1 ^a	2 ^a	3 ^a
1 ^a	N.S.	2.19×10^{-4}	53.8×10^{-6}	1.04	4	6.5	8.5 - 9
	N.C.	1.37×10^{-4}	2.31×10^{-6}		3.5 - 5	7.0	9
2 ^a	N.S.	2.58×10^{-4}	6.36×10^{-6}	1.46	6.5	7 - 9	14 - 16
	N.C.	0.43×10^{-4}	7.69×10^{-6}		10	13	15
3 ^a	N.S.	1.18×10^{-4}	2.92×10^{-6}	1.57	7.5	12 - 16	19 - 20
	N.C.	2.34×10^{-4}	3.98×10^{-6}		8	13	15
4 ^a	N.S.	1.60×10^{-4}	1.27×10^{-6}	0.42	6.5	8 - 10	13 - 14
	N.C.	5.95×10^{-4}	10.1×10^{-6}		6 - 7	7	7.5
5 ^a	N.S.	1.08×10^{-4}	2.65×10^{-6}	0.37	5 - 9	10 - 12	13 - 17
	N.C.	2.83×10^{-4}	4.77×10^{-6}		6 - 7	12 - 15	15
6 ^a	N.S.	5.17×10^{-4}	4.24×10^{-6}	0.26	3 - 7	10 - 17	18 - 27
	N.C.	3.77×10^{-4}	6.37×10^{-6}		8	15	20

Tabla 3.5 Recopilación de datos experimentales en pruebas de desgaste en recubrimientos de Niquelado Químico Simple y Niquelado Químico Compuesto (con adición de partículas duras de Al₂O₃).



CAPITULO CUARTO

CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS PARA POSTERIORES TRABAJOS

4.1 Conclusiones ..120

4.2 Sugerencias para pruebas posteriores..122

IV.- CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS PARA POSTERIORES TRABAJOS.

4.1 CONCLUSIONES

1. Dos superficies nominalmente planas hacen contacto en las asperezas elevadas, que fluyen plásticamente a causa de los esfuerzos locales. Cuando la velocidad es alta, el contacto sólo ocurre en un número reducido de puntos y a medida que disminuye la velocidad el área original de contacto aumenta dado que existe un mayor acoplamiento de las asperezas, es decir el espacio entre ambas superficies disminuye, lo que da como resultado que más protuberancias hagan contacto en otras partes.
2. Un factor importante en la resistencia al deslizamiento y al desgaste es la resistencia que presentan las uniones intermetálicas formadas en el par de deslizamiento.
3. Una fricción elevada no necesariamente corresponde a un desgaste proporcionalmente alto, esto es el fenómeno de desgaste involucra aspectos diversos como son: la formación de uniones intermetálicas, acabado superficial, compatibilidad metalúrgica etc.
4. La presencia de partículas duras disminuye la formación de uniones reduciendo la propensión al desgaste por adherencia.
5. Analizando los valores de torque (Tabla 3.5) es posible establecer: El Niquelado Compuesto en general presenta en la primera etapa de transición o raspado inicial una oposición mayor al deslizamiento (razón de desgaste mayor), en comparación al Niquelado Simple.

CONCLUSIONES

6. Analizando los valores de la tabla 3.5 podemos afirmar que el Niquelado químico Compuesto sometido a una elevada velocidad (500 rpm), durante el periodo de raspado inicial sufre de un desgaste considerablemente mayor en relación al Niquelado Químico Simple. De lo anterior se concluye que el Niquelado Químico Compuesto presenta la limitación de presentar limitaciones hacia aplicaciones donde se someta a elevadas velocidades.
7. En general durante el periodo de vida útil el recubrimiento de Niquelado Químico Compuesto manifiesta un comportamiento más uniforme, es decir con menor oposición al deslizamiento, menor formación de uniones soldadas y pérdida (desgaste) de material.
8. En virtud de las gráficas 4, 5 y su análisis correspondiente es posible concluir lo siguiente: En las condiciones de operación de; 100 - 200 r.p.m. o 0.37 - 0.42 m/s de velocidad lineal se tiene el mejor comportamiento del Niquelado Químico Compuesto con respecto a desgaste y facilidad de deslizamiento, en otras palabras el recubrimiento de Niquelado Químico Compuesto es viable en dichas condiciones de operación.
9. Establecer una comparación a priori sobre la resistencia al desgaste del Niquelado Químico Simple en contraposición al Niquelado Químico Compuesto no es pertinente sino se cuenta con los elementos necesarios para tal juicio. Se requiere; analizar las condiciones a las que estarán sometidas las superficies, así como los requerimientos que el usuario o las necesidades impongan. En otras palabras la conveniencia en utilizar Niquelado Químico Simple o Niquelado Químico Compuesto estará sujeto a las condiciones ambientales y/o de operación de los elementos sujetos a desgaste.

4.2 SUGERENCIAS PARA PRUEBAS POSTERIORES

Es pertinente plantear otros mecanismos de desgaste a fin de poner a prueba el recubrimiento de Niquelado Químico Compuesto, dirigido a posibles aplicaciones. En el área de inyección de plásticos encontramos magníficas posibilidades, dado que las cavidades de los moldes se encuentran sometidas a un desgaste continuo por abrasión y generalmente a bajas cargas; condiciones bajo las cuales es de esperar que el recubrimiento presente un funcionamiento favorable en virtud de que el mecanismo más importante (abrasión) resulta menos agresivo que el mecanismo bajo el cual fue sometido en las pruebas contempladas en el presente trabajo. En caso de que se proyectaran dichas pruebas debe tenerse cuidado de que las condiciones experimentales reflejarán lo mejor posible las condiciones reales en un proceso de inyección de plástico.

Respecto al proceso de recubrimiento de Niquelado Químico, a fin de llevar a cabo su implementación industrial sin efectos adversos al medio ambiente, es necesario realizar estudios respecto a la reutilización de la sustancia residual del proceso o su canalización a tratamientos de purificación del agua que contiene.

El rango de aplicaciones del recubrimiento de Niquelado Químico Compuesto dependerá de la medida en que las investigaciones avancen a fin de obtener mayores espesores, dado que es un factor determinante para asegurar la conveniencia de su aplicación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] IIIa. Reunión Nacional de Análisis de esfuerzos
Introducción a la Tribología.**
- [2] Ponencia "La aplicación de la tribología para instrumentar
un ahorro de energía" en el IV Congreso Nacional de Ahorro
de energía", Guadalajara Jal. Nov. 1993.**
- [3] Donald R. Askeland
La Ciencia e Ingeniería de los materiales
Grupo editorial Iberoamericana**
- [4] J.J. Caubet
Teoría y práctica industrial del rozamiento
Bilbao, España
1971**
- [5] Art. "Necesidad de la Enseñanza de la Tribología en México"
Manuel Vite Torres, p4**
- [6] TESIS " Estudio Tribológico de Materiales, El caso del
Zinalco**

[7] Hutchings J. M.
Tribology: Friction and wear of Engineering Materials
Edit. Arnold
U.K. 1991

[8] Rabinowics Ernest
Friction and Wear of Materials
Edit. John Wiley And Sons
New York 1965

[9] Sarkar A.D.
Desgaste de Metales
Edit. Noriega / Limusa

[10] Arnell R.D., Davies P.B., Hallig J.
Tribology: Principles and Desings Applications
Edit. MacMillan Education LTD
U.K. 1991

[11] Bhushan
Handbook of Tribology
Edit. McGraw Hill
New York 1991

[12] Friction, Lubrication and Wear Technology

Edit. American Society of Mechanical Engineering (A.S.M.)

Vol. 18, U.S.A. 1992

[13] Gross William A., Lee Mutsch, Castelli Vittorio

Fluid Film Lubrication

Edit. John Wiley And Sons

New York 1980

[14] Karl - Heinz Gahr.

Friction and wear of materials

Edit. Elsevier

[15] 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 Tecnology, Cambridge, Mass.

(U.S.A.)

(Received May 9, 1975)

[16] Jastrzebak

Naturaleza y Propiedades de los materiales para Ingeniería

Edit. Interamericana

1979

[17] Metals Handbook

Ninth edition, Volumen 8

Mechanical Testing

American Society For Metals

[18] Friction and Lubrication

F. P. Bowden and D. Tabor

London, Methuen 1967

[19] Sydney H. Avner

Introducción a la metalurgia física

Mc.Graw Hill

[20] Duncan, R. N., " Corrosión Control with Electroless Nickel

**Coatings" Memoria de la VII Conferencia Interamericana en
tecnología de Materiales p.131-138., México, 1981.**

[21] Hansen, M., "Constitution of Binary Alloys", Mc Graw Hill
New York, 1958.

[22] Gutzei, Gregoire., Saubestie, E.B., "Métodos Químico
Catalíticos" Graham A. K., Manual de Ingeniería de los
Recubrimientos Electrolíticos. CECSA., p. 520 - 536.,
1980.

[23] Marton, J.P., Schlesinger, M., "The nucleation, Growth and
Structure of Thin Ni - P Films", Journal Electrochemical
Society., Vol.115, No.1., p. 16 - 20., Enero, 1968.

[24] Randin, J.P., Maire, P.A., "DTA and X-Ray Studies of
Electroless Nickel", Journal Electrochemical Society.,
Vol. 114, No.5, p.442-444., Mayo, 1967.

[25] Graham, A. H., Lindsay, R.W., Read, H.J., Structure of
Electroless Nickel" Journal Electrochemical Society., Vol
109, No. 12., p.1201-1202., Dic. 1962.

- [26] Rajagopal, I., "Electroless Composites", Editado por Sudarshan, T. S., "Surface Modification Technologies An Engineer's Guide.", P. 77-125, 1989
Reproducida de la "Chemical Nickel - Plating" por Gawrilov con el permiso de Port Cullis Press Ltd., Surrey. p. 81
- [27] Pai, S. J., Marton, J.P., "Effect of Oxidation on the Resistivity of Ni-P Films"., Journal Applied Physics., p.4972-4976., 1973.
- [28] Tomlinson, W. J. Randall, S.C., " Oxidation Kinetics of Electroless Ni Plating in Air", Corrosion Science., Vol.18 p.573-574., 1978.
- [29] Spencer, L.F. "Electroless Nickel Plating", Octubre, 1974., p.35-38, Noviembre, 1974., p.50-54., Diciembre, 1974., p.58-64., Enero, 1975 p. 38-44.
- [30] Dennis, J. K., Sheikh, S. T., Silverston, E. C., 1981., "Trans. I.M.F." p.59:118.
- [31] Kedward, E.C., Addison, C.A., Tennet, A.A.B., 1976.,

"Trans. I.M.F." p.54:8.

**[32] Parker, K., 1972., Prof. "Interfinish - 72"., SGT. Basel,
Switzerland, p. 202.**

**[33] Avery, H.S., Editado por Albert G.H. Dietz., "Surface by
Welding for Wear Resistance"., Composite Engineering
Laminates (Cambridge, Mass. The MIT Press, 1969), p.3.**

**[34] Graham, A. H., Lindsay, R. W., Read, H. J., "The Structure
and Mechanical Properties of Electroless Nickel"., Journal
Electrochemical Society., Vol.112., No.4., p. 401-413., Abril
1965.**

**[35] Dieter Ellwood George
Mechanical Metallurgy
Mc Graw Hill
New York 1987**

**[36] A. Kutzelnigg
Ensayo de recubrimientos metálicos
Edit. River, S.A.
Madrid, 1967**

[37] Ihsan Efeoglu

**The mechanical and tribological properties of ceramic sputter ion - planted coatings. a Thesis presented for the Degree of Doctor of Philosophy at the University of Salford
Department of Aeronautical and Mechanical Engineering.
1993**

[38] Rajogopal, I., Op. cit., p 91

Reproducido de la "Trans. I.M.F." , 1976., 56 - 174, con el permiso del Institute of Metal Finishing, London, U. K.

[39] Burwell J T, Wear, (1957 - 58), 1, 119

[40] Brown, L., 1985., "Trans.I.M.F." , 62:139.

[41] M.L. ALKAN. Electroplating, 12, 1959, 155.

[42] P.F. Dujardin y Co., Düsseldorf.