

5
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTONOMA
DE MEXICO

CARACTERIZACION DE PROPIEDADES AL
DESGASTE DE UNA ALEACION ELECTROLITICA
Ni-Co-B

TESIS MANCOMUNADA
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO METALURGICO
P R E S E N T A N :
ERNESTO DOMINGUEZ SANTAMARIA
CESAR EDGAR GARDUÑO ACOSTA



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D. F.



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

1998.

248780



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO SEGUN EL TEMA

PRESIDENTE: PROF. BERNARDO FABIAN CAMPILLO ILLANES

VOCAL: PROF. EUSEBIO CANDIDO ATLATENCO TLAPANCO

SECRETARIO: PROF. CARLOS GONZALEZ RIVERA

1er. SUPLENTE: PROF. GERARDO ARAMBURO PEREZ

2do. SUPLENTE: PROF. SERGIO GARCIA GALAN

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

**LABORATORIOS 205, 110 y 112 DEL DEPARTAMENTO DE METALURGIA,
FACULTAD DE QUIMICA, U.N.A.M.**

ASESOR DEL TEMA



M. en I. Bernardo Campillo Illanes.

SUSTENTANTE



Ernesto Dominguez Santamaria.

SUPERVISOR TECNICO

M. en C. Isai Rosales Cadena.

SUSTENTANTE



César Edgar Carrión Acosta.

DEDICATORIAS

Como agradecerle a quien me dio el ser y además me apoyó para llegar hasta donde ahora me encuentro...

Que dios te bendiga.

Gloria Acosta Hernandez

Gracias.

Esteban Garduño Jimenez

Dedico a mis padrinos.

Tomas Campa †

Celia Martinez

Doy gracias a dios por haberte puesto en mi camino...

Agradezco el amor, confianza y paciencia brindados primero como compañera, amiga, novia y ahora esposa.

María del Carmen Zavala Cubillo

Agradezco a mis hermanos por creer en mi y por su apoyo incondicional.

Clara, Pilar, Maritza, Paty, Hugo, Armando, Sandra y Mireya

Agradezco a mi prima Hortencia Silva Acosta (BABYS) por apoyarme cuando más lo necesite.

Dedico este trabajo a mis sobrinos, que como yo, se han seguido superando y a aquellos que están en el camino de lograrlo.

Cesar Edgar

Septiembre 1998

DEDICATORIAS

A mis padres.

Por haberme brindado la oportunidad de formarme profesionalmente, desarrollarme como persona y poder concluir así una de las etapas más importantes de mi vida; gracias por los innumerables sacrificios realizados, por guiarme por el mejor camino y por darme la mejor herencia que existe en la vida la educación.

Raúl Arturo Domínguez López
Josefina Adriana Santamaría Enríquez

A mi esposa.

Por el amor que me has dado, por tu paciencia, comprensión, apoyo y ayuda incondicional. Por inyectarme la fuerza para continuar siempre que lo necesité. Por todo lo que hemos compartido en el pasado y lo que nos falta en el futuro.

Araceli Pérez Guadarrama

A mi hija.

Quien es la razón de mi existir y superación...
La prueba más palpable de lo que es el amor.

Karen Aratzani Domínguez Pérez

A mis hermanos.

Por compartir juntos, logros , sueños y alegrías.

Raúl Domínguez Santamaría
María de Lourdes Domínguez Santamaría

Ernesto
Septiembre 1998

AGRADECIMIENTOS

A nuestro asesor el M. en C. Bernardo Fabian Campillo Illanes por su apoyo, dedicación, amistad y valiosa colaboración para la culminación de este trabajo.

A los miembros del honorable jurado los profesores Eusebio Candido Atlatenco Tlapanco y Carlos Gonzalez Rivera por sus valiosos comentarios y sugerencias; así como por el tiempo dedicado en la revisión de este trabajo.

Al M. en C. Antonio Huerta Cerdan por la motivación y conocimientos que nos brindo en su momento.

A la U. N. A. M. Facultad de Química por la valiosa enseñanza académica que ha de servir como base para nuestro desarrollo profesional.

A nuestro compañeros y amigos de metalúrgia generación 89.

Gracias!

**Cesar Edgar y Ernesto
Septiembre 1998**

INDICE

PAGINA

RESUMEN ----- 1

INTRODUCCION----- 2

CAPITULO 1 ANTECEDENTES

1.1 Desgaste-----	9
1.1.1 Fracturas tribológicas y mecanismos de desgaste-----	12
1.1.2 Tipos de desgaste-----	15
1.1.2.1 Desgaste adhesivo-----	15
1.1.2.2 Desgaste por abrasión-----	17
1.1.2.3 Desgaste por fatiga -----	19
1.1.2.4 Desgaste por erosión -----	19
1.1.2.5 Desgaste vibracional -----	20
1.1.3 Máquinas de desgaste-----	21
1.1.4 La curva de desgaste -----	23
1.1.5 Curva de desgaste vs. carga-----	25
1.2 Tipos de aleaciones para recubrimientos protectores -----	27
1.2.1 Aleaciones antifricción-----	27
1.2.2 Aleaciones electrolíticas -----	28
1.3 Tipos de recubrimientos -----	30
1.3.1 Electrodepósitos-----	30
1.3.1.2 Electroless-----	31
1.3.1.3 Galvanoplastia -----	35

1.3.1.4 Recubrimiento electrolítico	36
1.4 Tratamientos superficiales	37
1.4.1 Modificación superficial	38
1.4.1.2 Tratamientos térmicos	40
1.4.1.3 Tratamiento termoquímico	41
1.5 Procesos de revestimiento	43
1.5.1 Deposición de vapor químico	44
1.5.2 Deposición de vapor físico	44
1.5.3 Revestimiento al vacío	46
1.5.4 Sputtering	46
1.5.5 Recubrimiento iónico	47
1.5.6 Baños calientes	48
1.5.7 Soldadura	48
1.5.8 Pulverización	49
1.5.9 Comparación de los procesos	50

CAPITULO 2

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales utilizados como substratos	51
2.2 Preparación de probetas para su posterior electrodeposición	53
2.2.1 Corte	53
2.2.2 Tratamientos térmicos	54
2.2.3 Electrodeposición	55
2.2.3.1 Descripción del equipo de deposición	58
2.3 Desgaste	60
2.3.1 Descripción del equipo de desgaste	60
2.3.2 Procedimiento	60
2.4 Preparación y caracterización de las probetas	63

2.4.1 Microestructura-----	63
2.4.2 Microanálisis-----	63
2.4.3 Rayos X-----	64

CAPITULO 3

RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1 Desgaste-----	65
3.1.1 Estudio de la influencia de los tratamientos térmicos realizados-----	70
3.1.2 Factor de desgaste vs. carga aplicada-----	77
3.2 Microestructura-----	81
3.3 Microanálisis-----	86
3.4 Rayos X-----	86

CAPITULO 4

ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

4.1 Determinación del espesor óptimo de recubrimiento-----	89
4.1.1 Justificación del espesor óptimo-----	92
4.2 Efecto de la carga en el acero 1018 (sin recubrimiento y con recubrimiento)-----	92
4.3 Efecto del tratamiento térmico en el acero 1018 (recubierto)-----	93
4.4 Efecto del recubrimiento en un acero 1045-----	94
4.5 Efectos del recubrimiento en el acero 9840-----	95
4.6 Efectos del recubrimiento en el acero M2-----	97
4.7 Efectos del recubrimiento en sustratos no ferrosos (Cu y compuesto)-----	98
4.8 Descripción del factor de desgaste vs. carga aplicada-----	99
4.9 Características topográficas-----	101

CAPITULO 5
CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones -----104

CAPITULO 6
BIBLIOGRAFIA

Bibliografía consultada -----106

RESUMEN

Diversos componentes mecánicos son expuestos a condiciones severas de desgaste, esto hace que el amplio espectro que hay de recubrimientos se haya orientado hacia el combate del desgaste. Dentro de estos recubrimientos se encuentran los electrodepósitos, que aún representan un gran porcentaje en cuanto a su uso. Por lo que, el presente estudio tiene por objeto caracterizar las propiedades al desgaste de una aleación producida electrolíticamente de Ni-Co-B.

Esta caracterización contempla el determinar la adherencia que puede llegar a tener el recubrimiento sobre diferentes sustratos, a través de pruebas de desgaste. La resistencia al desgaste se modifica a través del uso de tratamientos térmicos; provocando cambios microestructurales en esta aleación electrolítica, que evidencian su comportamiento en el desgaste.

La caracterización microestructural se realiza mediante un análisis por microscopía óptica, electrónica de barrido (SEM), microanálisis y rayos X.

INTRODUCCION

Desde que el hombre se da cuenta que el contacto de dos materiales metálicos, está en interacción, y uno de ellos se desgasta más rápido que el otro; empieza a cuestionarse el por qué de este fenómeno, y es, desde aquí, que se inicia un parte-aguas acerca del estudio del desgaste.

Por lo cual el presente estudio se ha abocado al fenómeno de desgaste, pero sin perder de vista todas las ramificaciones que existen de éste; Se pueden mencionar los tres tipos de desgaste más comunes que se presentan: por corrosión, por fatiga, y por erosión.

Es indiscutible que el desgaste por corrosión es uno de los problemas más graves que existen, por la rápida degradación del material; ya que estos están expuestos a los diferentes fluidos, que corroen y desgastan con mucha rapidez el material metálico. También, cuando dos piezas metálicas están en contacto y se encuentran sometidas a un movimiento relativo, pueden tener un deterioro en la superficie.

Las pérdidas de material metálico causadas por la corrosión son muy grandes y como consecuencia del enorme consumo de éstos, surge la necesidad de estudiar métodos que ayuden a controlar la corrosión metálica.

La corrosión por desgaste se da a menudo en las piezas que están amordazadas; como pueden ser en uniones de tornillos, en los remaches, ejes de las llantas de los coches, o en los cojinetes del motor de los coches, etc.

Es probable que la mayoría de los tipos de desgaste sea por desprendimiento de material de la superficie por fatiga, ya sea que la naturaleza del movimiento sea unidireccional o de vaivén. Clasificar un tipo particular de falla como desgaste por fatiga puede ser confuso. Sin embargo, a fin de hacer una clasificación, el término desgaste por fatiga se reserva para

identificar la falla de contactos lubricados en casos como los de baleros de bolas o rodillos, engranes, levas y mecanismos impulsores que desarrollan fricción. La pérdida de material es por desprendimiento de capas superficiales y por picadura, como en los engranes. Se piensa que las grietas por fatiga aparecen debajo de la superficie en un punto en que el esfuerzo cortante es máximo. Obviamente puede lograrse una mejoría en la vida de estos elementos si se trabaja a una carga de contacto baja y el método preferido en la industria es producir componentes con una profundidad óptima de capa endurecida junto con un buen acabado superficial.

El propósito de esta capa externa dura, tal como se obtiene por métodos difusivos, de implantación, electrodeposición etc; es proporcionar protección a una masa con alto límite de resistencia en una región vulnerable. El desgaste por erosión es el proceso de eliminación de metal provocado por la incidencia de partículas sólidas sobre una superficie. El desgaste por erosión se desarrolla en el caso de la limpieza de piezas de colada o cascos de barco por medio de chorros de arena, pero en ocasiones se produce una pérdida destructiva y costosa del material como en el caso de las hélices de turbinas de gas o los refractarios en hornos de arco eléctrico.

El grado de desgaste tiene relación con el ángulo de incidencia de la partículas respecto a la superficie.

En tanto que los efectos de material y del tratamiento térmico son susceptibles de los diferentes metales en el desgaste por frotamiento; han sido bien determinados por observaciones visuales o por una medida de la pérdida de peso, y solo quien experimenta ha podido determinar el efecto del frotamiento sobre la resistencia a la fatiga. Juzgados por los

métodos de observación visual y de pérdida de peso, los materiales blandos son generalmente mas susceptibles al desgaste por frotamiento que los materiales duros.

Ahora bien, el desgaste es el nombre genérico de una serie de eventos, por los cuales la pérdida de material tiene lugar. Por lo tanto el desgaste en un sistema tribológico puede ser el resultado de un gran número de eventos, con un número casi infinito de combinaciones. Existen muchos procesos, y las interacciones de uno y otros es más compleja. Sin embargo, el desgaste innecesario se debe disminuir al mínimo, la sociedad actual y futura probablemente requiera de componentes duraderos y los especialistas en tribología tendrán como propósito conseguir pérdidas mínimas en la resistencia a la fricción. Para lograr estos objetivos, el punto inicial debe ser analizar la cinemática de los componentes que interactúan en una situación tribológica. Esto junto con el conocimiento de carga de trabajo y entorno, proporciona una base sólida para seleccionar, entre otras cosas, la lubricación, el material y la técnica de fabricación. Además de ciertos requisitos como la capacidad de soportar una carga, común en la mayoría de los materiales estructurales en ingeniería, los componentes tribológicos deben cumplir con los criterios de fricción especificados.

En ciertas situaciones debe establecerse un valor de fricción alto, como en la superficie de un sistema de frenado, mientras que en otros casos es importante establecer un criterio de baja fricción como en una flecha que gira en un cojinete. El desgaste de las superficies que interactúan es benéfico durante la etapa del ajuste inicial, y también puede ser benéfico para una organización en que la política sea producir artículos de consumo o equipo. Todo esto tiene un impacto en varias industrias como pueden ser la automotriz, la minera, la petrolera, etc.

Citando un par de ejemplos de cómo y porqué se da este fenómeno se puede llegar a comprender mejor; por ejemplo: La fuente de fricción en los engranes industriales, además de las componentes de rodamiento y deslizamiento, son la resistencia debido al quemado del aceite. Si la lubricación es efectiva, el desgaste por deslizamiento no ocurre, pero las partículas suspendidas atrapadas ocasionan desgaste abrasivo, que se agrava por una carga pesada, la alta velocidad y la temperatura. Una combinación de carga pesada y elevadas velocidades, da lugar a un rayado superficial que indica un desgaste severo. Este generalmente empieza en las crestas, y en valles de los dientes, y se difunde hacia la línea de paso. Mientras más grande sea el diente más propenso será a rayarse, ya que el deslizamiento relativo aumenta con el tamaño del perfil.

El otro ejemplo, puede ser el de los cojinetes, en los cuales la función básica de los cojinetes es localizar un componente en forma exacta y soportarlo bajo carga sin que falle.

Hablando en general, un cojinete puede tener una acción de desgaste como en un cojinete plano, o un movimiento rodante como en los baleros con elementos rodantes. Es posible que los baleros se utilicen sin lubricante, pero en general éste se emplea para evitar el contacto entre metales.

Los cojinetes lisos pueden ser cojinetes deslizantes, por ejemplo una corredera en una máquina en donde la pieza de trabajo y la herramienta de corte puedan moverse una en relación con la otra de manera lineal. En un cojinete liso para flechas, ésta girando dentro del cojinete que puede estar en posición vertical u horizontal. En el primer caso, la carga estática nominal es cero y puede llegar a ser muy alta en el segundo caso. Ahora bien, la necesidad de reducir el desgaste es de gran importancia para la industria, y con esto aumentar la vida útil del material. El fenómeno de desgaste, se puede evitar, a través de

procesos como recubrimientos superficiales; que son tratamientos superficiales para la protección en contra del desgaste, la corrosión y la formación de la película de óxido, estos están clasificados en dos principales categorías que son modificación superficial y técnicas de recubrimiento.

Uno de los parámetros que se deben considerar al escoger un sistema de materiales para una situación tribológica dada puede ser la siguiente: fricción, abrasión, corrosión fatiga, desgaste adhesivo, dureza y resistencia al impacto. Sin embargo la elección de un recubrimiento óptimo es aún muy subjetivo, ya que no ha sido diseñado un diagrama lógico para la selección automática del proceso.

Por otro lado el otro grupo de procesos como los son los procesos de electrodeposición, que tienen la finalidad de modificar algunas propiedades mecánicas, y entre otros al desgaste, así como también proteger contra la corrosión, se han utilizado durante años y de manera sistemática para la protección superficial en general.

El uso de la electrodeposición de metales y aleaciones sobre un metal base, es una alternativa muy interesante tecnológicamente hablando. Para predecir el posible resultado obtenido al electrodepositar una aleación, el diagrama de fases respectivo debe ser consultado en la región de baja temperatura. Las predicciones no se pueden hacer con certeza, debido a que los electrodepósitos regularmente están formados por cristales de tamaño muy fino. Pero esto no impide que esta sea una de las alternativas más viables para mejorar la propiedades mecánicas.

Otro aspecto importante que se debe tomar en cuenta, es la parte económica que juega el desgaste. Al desgaste se le ha reconocido como el causante de una gran cantidad de daños a diversos componentes de distintos materiales, sin embargo la cantidad de este daño, su

dimensión, aún no completamente clasificada. Ciertas fuentes reportan que las pérdidas anuales originadas por el desgaste o derivadas del mismo en naciones industrializadas se hayan en el rango de 0.8 a 1.4% del producto interno bruto (PIB). En el caso de los Estados Unidos, hay quienes reportan cantidades que oscilan entre los 20×10^9 a los 45×10^9 dólares por año; sin embargo este dato resulta ser muy poco veraz, puesto sólo el daño causado por desgaste a la industria automotriz en esta nación, es de aproximadamente de 70×10^9 dólares por año. Un dato tal vez más realista, provocado por los daños debidos al desgaste es de aproximadamente 6-8% del PIB, actualmente del orden de $USD\$230 \times 10^9$ dólares por año, este dato coincide en parte con otros valores informados para regiones industrializadas como en Europa, que es del orden de 9% del PIB.

En la misma región, de Europa oriental, del antiguo bloque socialista informa datos del 8 al 9.5% del PIB en daños provocados por el desgaste.

Por otra lado, de una encuesta realizada en el Reino Unido por NCT (National Centre of Tribology) a 190 empresas dedicadas a la aplicación de recubrimientos, muestra que el 59% de las empresas utilizan técnicas de aplicación de recubrimientos electrolíticos y electroless, sólo por debajo de los recubrimientos térmicos por rociado que ocupan el 73% del total.

Por lo antes expuesto, resalta que el desgaste constituye un problema práctico muy severo, es por esta simple razón que hay gran interés y demanda a la vez para que este problema se pueda ir reduciendo al mínimo posible.

Aquí tan solo se muestra una alternativa más para poder terminar con este cáncer mundial. Esto no es lo último, ni lo único, pero sí representa un proceso de alta tecnología en electrodeposición, que tal vez pueda en parte impartir una cierta protección al desgaste, a substratos de bajo costo.

El incremento de las propiedades mecánicas de un acero a través de un recubrimiento de Ni-Co-B es el objetivo primordial de este estudio, esto no se lleva a cabo únicamente con un tipo de acero específico sino con una variedad de ellos, con la finalidad de poder analizar cual es su rendimiento en aquellas propiedades mecánicas en donde los aceros no sobresalen por tener buena propiedad al desgaste. Para lo cual se requiere de una caracterización para tener parámetros que permitan conocer más de su comportamiento, como pueden ser entre otros la de la propiedad al desgaste, como ya se dijo anteriormente se tomarán varios substratos como son:

Aceros de bajo y medio carbón, aleados, aceros para herramientas, y algunos otros substratos como cobre y compósitos.

Con el propósito de probar su adherencia en los diferentes materiales, los ensayos de desgaste son una de las pruebas, por las cuales, se puede caracterizar si un recubrimiento cumple con lo esperado, y si es así, poder establecer sus parámetros de operación.

CAPITULO 1

ANTECEDENTES

1.1 Desgaste.

El grado de proximidad de dos superficies o sea su deformación, depende de la probabilidad estadística a medida que las superficies se separan en el plano horizontal durante el deslizamiento y tratan de acoplarse debido a las fuerzas de atracción entre sus átomos. Cuando se encuentran suficientemente cerca, los átomos se repelen y su tendencia natural es regresar a su posición original. Sin embargo, una hipótesis plausible es que un átomo se puede desprender y moverse a una distancia suficiente dentro del campo de otro átomo en la superficie opuesta donde encuentra una nueva posición de equilibrio. Esto es, los átomos de un cuerpo pueden ser extraídos por los otros en la superficie opuesta. Según Tomlinson¹, éste es el mecanismo de desgaste.

De los comentarios anteriores se desprende que, la energía disipada por un átomo es $F_0 l$, si ρ es la densidad del metal que se desgasta, o sea aquél cuyos átomos se extraen y e es la distancia interatómica del cristal, la masa del átomo es $m = \rho e^3$. Si la energía total disipada es E_t y el número de uniones atómicas es n ,

$$n = E_t / F_0 l \quad (1.1)$$

donde F_0 es la fuerza interatómica de cohesión entre dos átomos en el cristal y l es la distancia de separación entre átomos.

La masa total de todos los átomos participantes que se están eliminando de la superficie es.

$$M = nm \quad (1.2)$$

o sea,

$$M = (E_t \rho e^3) / (F_o J) \quad (1.3)$$

$$\mu = (F_o J) / (e p_o) \quad (1.4)$$

Hay que aclarar que aunque cada unión tiene dos átomos, sólo se moviliza uno.

Ahora, sustituyendo el valor de $F_o J$ de la ecuación 1.4, la ecuación 1.3 se transforma en

$$M = \alpha (E_t \rho e^2) / (\mu p_o) \quad (1.5)$$

donde p_o es el valor medio aritmético de las fuerzas individuales de repulsión, y μ es el coeficiente de fricción.

Se sabe que en cada metal existe un esfuerzo característico que origina la deformación plástica que es la fuerza límite que puede soportar el retículo espacial. Dicho esfuerzo σ_y se expresa en función de la fuerza máxima de repulsión $p_{máx}$ como.

$$\sigma_y = p_{máx} / e^2$$

Para un contacto elástico, que es el modelo que se supone aquí,

$$p_o = 1/2 p_{máx}, \text{ de manera que } \sigma_y = 2 p_o / e^2$$

Sustituyendo este valor de e^2/p_o en la ecuación 1.5

$$M = (2\alpha E_t \rho) / (\mu \sigma_y) \quad (1.6)$$

La ecuación de Tomlinson muestra que la masa total de metal eliminado es inversamente proporcional a la presión de flujo.

Un sistema tribológico está formado por dos o más cuerpos en contacto superficial dinámico o estático, y se gestan una vasta clase de fenómenos. La tribología estudia entre otras cosas, la adhesión, fricción, desgaste y lubricación de sólidos en contacto. Según Vingsbo² las diversas definiciones de desgaste encontradas en la literatura no son muy adecuadas, debido a que no abarcan toda la complejidad de este fenómeno. Una definición más completa de

desgaste es: " La remoción de material a partir de las superficies de un sistema tribológico", lo cual implica superficies en movimiento relativo bajo mecanismos de contacto.

Otros fenómenos como la deformación, reacciones químicas, o fenómenos cíclicos son solo casos particulares de determinados sistemas tribológicos.

Desgaste es el nombre genérico de una serie de eventos, por los cuáles la pérdida de material tiene lugar. Por lo tanto el desgaste en un tribosistema o sistema tribológico que puede ser el resultado de un gran numero de eventos con un número casi indefinido de combinaciones.

Existen muchos procesos y las interacciones de uno y otros son complejos³ como la muestra el esquema de la fig. 1.1.

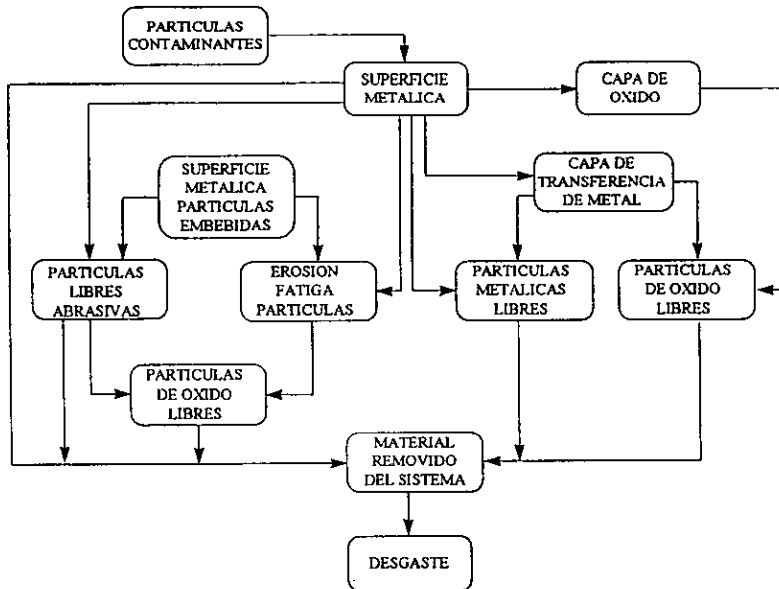


Figura 1.1. Esquema simplificado representando la relación entre varios procesos de desgaste.

La definición que presenta la norma ASTM G40-88 es: “El daño ocurrido en la superficie del sólido, que generalmente involucra pérdidas progresivas de materiales, debido al movimiento relativo entre las superficies de los cuerpos en contacto. Otros fenómenos como la deformación, reacciones químicas, ó fenómenos cíclicos son sólo casos particulares de determinados sistemas tribológicos”.

El desgaste sigue una relación simple, llamada relación de Archard⁴ que se expresa como:

$$W = V/S = K P/H \quad (1.7)$$

donde W es el factor de desgaste, V el volumen perdido, P es la presión o carga aplicada, S la distancia recorrida, H la dureza de indentación y K es una constante que dependerá del material y de las condiciones de la prueba. Esta constante, según el mecanismo de desgaste de que se trate, tomará diferentes valores y significados. Se puede calcular, al realizar la prueba de desgaste, al tomar la dureza del material, ya que todos los términos que involucran la relación son conocidos.

1.1.1 Fracturas tribológicas y mecanismos de desgaste.

Las superficies ingenieriles de los sólidos no son planas, son rugosas y tienen crestas y valles llamadas irregularidades o asperezas (sólo los materiales frágiles que presentan clivajes a lo largo de los planos cristalinos o los monocristales que presentan superficies regulares y planas). De manera que el contacto entre dos sólidos sólo ocurre en unos cuantos puntos aislados, por ello el área real de contacto se localiza únicamente en una fracción del área aparente, este contacto se lleva a cabo sólo en las crestas.

Bajo una carga aplicada, dependiendo del material, puede ocurrir deformación, primero elástica y luego plástica en estas asperezas.

La deformación continuará hasta que el área de contacto real sea suficiente para soportar la carga. En este punto la deformación cesa. De este modo, el esfuerzo normal aplicado es muy alto en las regiones de contacto y puede exceder el punto de fluencia de uno de los sólidos ó de ambos. En cuyo caso, las áreas de contacto se soldarán entre sí formando uniones o juntas, las cuáles deben romperse para iniciar y sostener el movimiento relativo, de acuerdo con la teoría de la adhesión. Los contactos atómicos con o sin contaminantes de la superficie admiten fuerzas de cohesión para crear uniones entre las partes del tribosistema. En movimiento deslizante, las uniones son continuamente deformadas, plásticamente cortadas y fracturadas, produciendo el desprendimiento de material y consecuentemente el desgaste. Este es el fenómeno básico de fricción y el componente de fuerzas que actúa en la dirección del deslizamiento, es la fuerza de fricción.

Se puede observar que puede haber intercambio de material entre uno y otro de los componentes del sistema tribológico. Este es el mecanismo de adhesión presente en el desgaste. A medida que se rompen las uniones, aparecen residuos producidos por el desgaste. Para evitar esto, hay que impedir la formación de uniones; lo que se logra separando la interfase con una película extraña que inhiba la interacción de los átomos del metal en los puntos de contacto entre los dos sólidos.

Otro de los mecanismos que producen fracturas y pérdida de material es el micro corte, si una aspereza o partículas duras se deslizan sobre la superficie de un material blando, bajo condiciones tribológicas particulares (alta carga, distintos ángulos de corte de las partículas o alta dureza , etc.) actúa como una microherramienta de corte. Este mecanismo remueve material de la superficie por la formación de rebabas, fragmentos, etc. La profundidad del tamaño del surco, depende del tamaño del elemento cortante.

Otro de los mecanismos principales que actúan en el desgaste es el impacto. Las condiciones normales de impacto (cero esfuerzos paralelos) es establecida en la superficie mecánica en contacto bajo condiciones de percusión, con un ángulo de incidencia, el cuál tiende a ser normal. Si la energía transferida a la superficie no puede ser disipada como calor o deformación plástica, la superficie se relaja formando fracturas por impacto. Esto requiere una alta densidad de energía y condiciones típicas de alta tensión durante una muy corta duración y un gran ángulo de incidencia. La fractura por impacto es el resultado de una percusión aislada y es más fácil de producir en un material frágil que en uno dúctil.

Durante movimientos cíclicos la superficie de un tribosistema puede estar sujeta a fenómenos de fatiga. Las fluctuaciones de carga pueden iniciar la sucesiva nucleación y crecimiento de fracturas por fatiga y la falla por fatiga resultante, representa otro de los mecanismos de las fracturas tribológicas.

Numerosas clases de fenómenos físicos y químicos interactúan con las fracturas tribológicas. Parte del trabajo de fricción es disipado generalmente como calor y el incremento de temperatura en pequeñas áreas de contacto puede ser muy alto dando lugar; a otros fenómenos como la soldadura, y en general a desviaciones a lo esperado en el comportamiento a temperatura ambiente.

Una combinación de alta concentración de deformación y alta temperatura, activa una serie de cambios en la capa debajo de la superficie de contacto. Estos fenómenos internos que se pueden presentar son: deformación plástica, cambios estructurales como cambios de fase en los materiales, y cambios de composición química.

Además existen fenómenos externos, dependiendo de la interacción con la atmósfera que rodea al sistema tribológico, resultando la formación de una capa superficial, que se puede

deber a: a) reacciones químicas en el aire, en este caso las superficies limpias son cubiertas con una capa de óxido o por componentes de corrosión. b) Adsorción; las moléculas de gases, predominantemente vapor de agua, se unen a la superficie del metal por adsorción y forman una segunda capa sobre la capa anterior. Estas capas evitan la formación de uniones minimizando el desgaste en sistemas aparentemente no lubricados.

Si los gases absorbidos se sobrecalientan, se vaporizan y las capas de óxidos se rompen cuando los esfuerzos normales son altos, exponiendo entonces el nuevo metal, lo que aumentara la propensión al desgaste.

1.1.2 Tipos de desgaste.

Siempre que existe movimiento relativo entre dos sólidos que soportan una carga se tendrá una situación potencial de desgaste. Este movimiento puede ser unidireccional o de vaivén, ya sea deslizante o de rodamiento. Puede existir una combinación de estos, rodamiento y deslizamiento, o el desgaste puede deberse a un movimiento oscilatorio de pequeñas amplitudes. Cualquier metal puede interactuar con un no metal, o con líquidos tales como aceites lubricantes o agua de mar. Dependiendo de la naturaleza del movimiento o de los medios que intervienen en una interacción de metales bajo carga, el desgaste puede ser clasificado de la siguiente manera.

1.1.2.1 Desgaste adhesivo.

En este caso, el movimiento relativo puede ser por deslizamiento unidireccional o de vaivén, o bien la interacción ocurre bajo carga en un contacto oscilatorio de pequeña amplitud. Este tipo de desgaste se caracteriza por la formación y subsecuente fractura de uniones adhesivas,

fig. 2.1. De donde eventualmente fracturas por fatiga nuclearán y se propagarán desprendiéndose fragmentos los cuales causan una pérdida neta de el material.

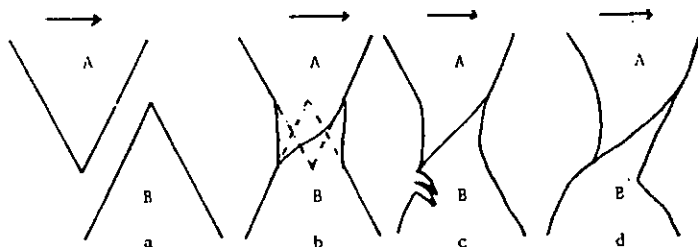


Figura 2.1. Formación, deformación y fractura de una unión adhesiva.

Fractura por corte en c), y fractura tensil en d).

También se puede dar el proceso de adhesión y transferencia de material el cual se puede repetir en ambas direcciones para que finalmente ocurra la pérdida de fragmentos. Dependiendo de la geometría el mecanismo de adhesión produce protuberancias en la superficie sometida a desgaste, formadas por el material transferido de una superficie a otra. A medida que comienza el deslizamiento, el contacto entre átomos elimina los átomos superficiales en los encuentros favorables, de manera que la pérdida de volumen V para una distancia de deslizamiento S es.

$$V = Z A_t S \quad (1.8)$$

Expresión representativa del desgaste por adherencia.

Donde Z es el número de átomos removidos por encuentro y A_r es el área real de contacto.

El área real de contacto considerada, se relaciona con la carga de la siguiente manera.

$$A_r = W / \sigma_y \quad (1.9)$$

Donde W es la carga aplicada y σ_y es la presión de flujo del metal más blando.

Sustituyendo el valor A_r de la ecuación (1.9) en la ecuación (1.8) obtenemos:

$$V/S = (Z)(W) / \sigma_y \quad (1.10)$$

La cual es de la forma de la relación de Archard.

Utilizando la relación de la presión de flujo σ_y y la dureza del material H , se tiene que:

$$H = (3) (\sigma_y) \quad (1.11)$$

Con lo cual llegamos finalmente a la relación de Archard, en cuyo caso la constante tiene que ver con el número de átomos removidos por encuentro⁴.

$$V/S = (3)(Z)(W) / H \quad (1.12)$$

1.1.2.2 Desgaste por abrasión.

El desgaste por abrasión se caracteriza por la formación de surcos. Cuando un cuerpo duro se desliza sobre una superficie blanda, al aplicar el esfuerzo normal se graba en ésta una serie de surcos.

Estas interacciones se llevan a cabo por microcorte, con deformación plástica, al ser rasgada la superficie por un elemento abrasivo duro. La deformación plástica se refleja en la formación de una cresta al mismo tiempo que el fragmento corta la superficie. Por otra parte, las partículas duras sueltas que entran a la interfaces actúan como esmeriles. Las cuales pueden ser residuos metálicos atrapados como resultado del rozamiento o bien capas

de óxido desprendidas. En otros casos se utiliza este tipo de desgaste, para la evaluación de abrasivos en forma sistematizada, en un proceso estandarizado. (ASTM G56-B2).

El desgaste por abrasión sigue una relación de igual modo que los antes mencionados, solo que la constante es considerada como un coeficiente de desgaste bajo una situación abrasiva entre dos cuerpos, y toma valores de acuerdo a la geometría de la partícula que incide sobre la superficie⁵.

$$V/S = (\beta)(W) / H \quad (1.13)$$

Donde β es la probabilidad de producir un fragmento por desgaste en un encuentro, el cual contiene las consideraciones geométricas del modelo.

Si el término β se considera equivalente al coeficiente de desgaste β_{ab} , en el caso de desgaste por abrasión de dos cuerpos, β_{ab} toma el valor de $0.63 \tan \theta$ para una aspereza cónica y θ es el ángulo que forma la base de la partícula cónica con la superficie de el metal blando.

Para realizar el cálculo de la resistencia al desgaste por abrasión, de un material sometido a investigación, se puede usar la siguiente relación:

$$R_1 / R_2 = (a) (H) / \sigma \quad (1.14)$$

Donde R_1 es la resistencia al desgaste de un material usado como referencia, R_2 es la resistencia del material bajo investigación, a es una constante, σ es la presión de contacto normal aparente y H es la dureza del material bajo investigación.

1.1.2.3 Desgaste por fatiga.

Es probable que el modo predominante de la mayoría de los tipos de desgaste sea por desprendimiento de material de la superficie por fatiga.

Los fenómenos de fatiga son generalmente importantes en todos los tipos de desgaste. Las tribofracturas son un fenómeno interactivo que son promovidas por efectos acumulativos durante fluctuaciones cíclicas de carga. Es común que el material removido sea predominantemente producido por fracturas de tipo fatiga en los sistemas tribológicos. El más típico sistema tribológico de fatiga es dado en contacto rodante, como por ejemplo los cojinetes. En estos, los efectos de abrasión e impacto son reducidos. El desgaste adhesivo puede ser de importancia; en casos donde la lubricación es difícil, como por ejemplo en los cojinetes de los rodillos de laminación en caliente.

La propagación de fracturas por fatiga esta concentrada en dos direcciones, una perpendicular y otra paralela a la superficie de contacto. El resultado es que al avanzar la fractura, la superficie del material es removida en escalas relativamente grandes en forma de hojuelas. La exfoliación por fatiga es un ejemplo de esto. El proceso es similar al que sufren al removerse, por rompimiento, las capas de material intercambiado en el desgaste adhesivo. Este proceso se le ha denominado “de laminación”².

1.1.2.4 Desgaste por erosión.

El desgaste por erosión se define como el proceso de eliminación de metal provocado por la incidencia de partículas sólidas sobre una superficie. Si las partículas son gotas líquidas el desgaste es llamado erosión por cavitación. La erosión por cavitación se presenta cuando un

sólido se mueve a alta velocidad en un medio líquido. Mientras que el desgaste por erosión implica una acción meramente mecánica.

Los sistemas tribológicos erosivos son también llamados sistemas de desgaste de tres cuerpos. En el que un cuerpo es la superficie expuesta, las partículas en contacto momentáneo con la superficie representan el segundo cuerpo. El medio, el cual transfiere la carga sobre el segundo cuerpo, (el cual podría ser otra superficie, una corriente líquida o el flujo mismo de partículas) es considerado como el tercer cuerpo². El principal mecanismo de tribofracturas en el desgaste erosivo, son el microcorte y el impacto; adicionando la deformación plástica. El grado de desgaste tiene relación con el ángulo de incidencia de la partícula respecto de la superficie. Los ángulos de incidencia en erosión son menores que en abrasión.

1.1.2.5 Desgaste vibracional.

El desgaste vibracional o rozamiento, envuelve elementos de todos los otros tipos. Los sistemas tribológicos de este tipo se caracterizan por estar sometidos a oscilaciones de varias frecuencias y pequeñas amplitudes. Dependiendo del material y las condiciones de la superficie, la adhesión puede actuar como un mecanismo de activación para mecanismos de abrasión, y la fatiga es un componente inherente.

Dependiendo de el diseño del sistema, este puede desprender partículas que no pueden escapar de el área de contacto y toman una función abrasiva. Al mismo tiempo la dificultad de mantener una lubricación continua, puede provocar adhesión: Para materiales metálicos los efectos adicionales de la corrosión son muy severos incrementándose el factor de desgaste. Una mezcla de partículas metálicas y partículas provenientes del rompimiento de la

capa de corrosión es un efectivo medio lubricante, el cual previene la adhesión. Sistemas prácticos de rozamiento son las uniones mecánicas.

1.1.3 Máquinas de desgaste.

Aunque se cuenta con datos sobre el desgaste obtenidos en pruebas llevadas a cabo en máquinas reales. Generalmente los estudios de laboratorio de dónde son obtenidos los datos de desgaste se realizan en condiciones controladas que simulan los movimientos observados en las situaciones reales. Hay un gran número de máquinas para evaluar el desgaste, todas ellas requieren el diseño de un par metálico, el cuál provee la interfase friccionante.

La máquina de perno-disco es un aparato popular para pruebas de desgaste, fig. 1.3, en el que la probeta es sometida a una carga normal. Las variables son la carga normal, la velocidad de deslizamiento, las condiciones atmosféricas y la temperatura del medio ambiente. La cantidad de desgaste se establece pesando la probeta en una balanza analítica. Una prueba de desgaste completa requiere de las gráficas de pérdida de peso en relación con los intervalos de deslizamiento para obtener el desgaste inicial durante el arranque y el estado estacionario.

Es importante trabajar en condiciones de estricta limpieza química, y el método requiere extremo cuidado, ya que es muy laborioso.

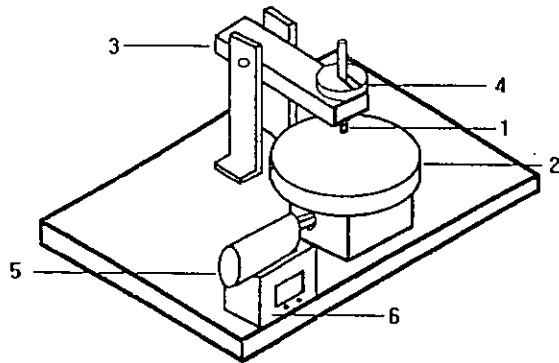


Figura 1.3. Máquina de perno y disco. 1) Perno o probeta; 2) Disco; 3) Brazo; 4) Carga; 5) Motor; 6) Controles.

Un método alternativo es usar un perno o probeta con la punta cónica, soportado por una barra de carga con una bisagra. La probeta es sometida a desgaste y después la máquina se para, la barra se gira 180 grados y la magnitud del desgaste es detectada conociendo la pérdida de volumen. Existen algunas máquinas estandarizadas para diversas pruebas, como la máquina de bloque sobre anillo (ASTM G77-83), la (ASTM D83-83), algunas para cintas de abrasivos como la ASTM G75-82 o la ASTM D2625-83 que es para probar capas líquidas de lubricantes, pero son específicas para probar ciertos materiales, o capas de líquidos y no existen condiciones estándares para desgaste de materiales, como las hay para otras pruebas mecánicas. Por lo tanto al reportar valores de desgaste, se deben dar las condiciones a las cuales la prueba fue realizada.

1.1.4 La curva de desgaste.

Si la pérdida de peso o volumen es graficado en forma continua contra la distancia de deslizamiento, se obtiene una curva característica como la que se muestra en la fig. 1.4, el punto O corresponde al momento en el cual la máquina empieza a funcionar, o sea, cuando la distancia de deslizamiento es cero. Inicialmente la pérdida de peso es curvilínea y la relación de pérdida de peso o volumen por unidad de distancia de deslizamiento, decrece hasta el punto A, donde se une suavemente con la recta AB. La cantidad de pérdida de peso o volumen en el régimen determinado por AO es el desgaste inicial y por AB es el estado estacionario.

La pendiente del régimen estacionario o estable es lineal y se utiliza para expresar la relación de desgaste o factor de desgaste de un material por unidad de distancia de deslizamiento, y a una carga y velocidad dadas, es constante para cada material, dependiendo de la naturaleza de la otra superficie. En ciertas partes de máquinas reales el patrón de la curva es el mismo que el mostrado en la fig. 1.4, y existe un verdadero énfasis en la importancia del desgaste inicial antes de que un componente que se desliza soporte la carga total que resistirá durante su vida de operación.

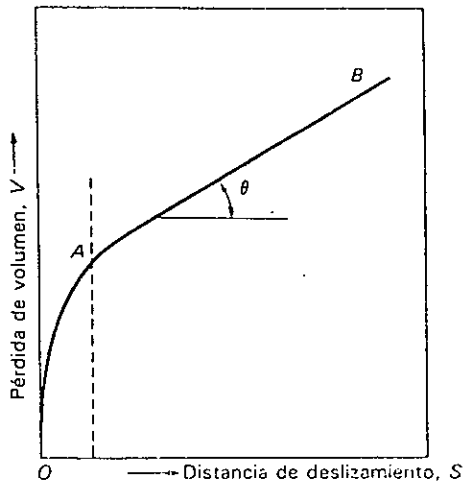


Figura 1.4. El patrón de una curva de desgaste típica OA es curvilíneo y es el desgaste inicial de acoplamiento (desgaste en el arranque inicial). AB es lineal y es el desgaste en estado estacionario. La razón de desgaste durante la pérdida de volumen por unidad de distancia de deslizamiento se mide con $\tan\theta$

Cuando dos metales entran en contacto bajo carga, crean una situación donde la carga se concentrara en las áreas de contacto verdaderas, que se forman entre las asperezas.

Algunas veces, la tensión se concentra en dichas áreas de contacto, rebasando el límite elástico del material más blando del par. El miembro más blando del par fluirá plásticamente y el área de contacto aumentará hasta un tamaño de equilibrio proporcional a la carga aplicada. Si ambos metales son duros, las asperezas pueden ser removidas por algún mecanismo de los antes descritos y la superficie toma una apariencia llana, donde el área de contacto verdadera se incrementa. Esta puede ser la razón más común por la cual el desgaste inicial se presenta, y es superado al lograr un área de equilibrio, cuando el contacto se ha estabilizado.

Pero esto no explica todos los casos, ya que algunas veces, hay evidencia de formación de óxidos, o un incremento en la dureza de las interfaces, y el mecanismo de desgaste inicial esta gobernado por un gran número de factores interrelacionados.

1.1.5 Curva factor de desgaste vs. carga.

Cuando un nuevo material es investigado, la primera fase de trabajo es usualmente evaluar la cantidad de desgaste con el incremento de la distancia recorrida. El siguiente paso es graficar el factor de desgaste contra la carga. Siendo el factor de desgaste la relación existente entre el material que ha sido desprendido por medio de la fricción y la distancia en que se ha mantenido en contacto con las superficies expuestas a tal fenómeno, el cual se deriva cuando la etapa inicial se logra y se establece un equilibrio topográfico. Para bajas cargas, hay un régimen de desgaste no severo, seguido por un régimen de transición donde el factor se incrementa en pocos ordenes de magnitud. Posteriormente si se incrementa la carga, la curva se estabiliza, entrando a una zona donde el factor de desgaste vuelve a tener ordenes de magnitud similares. La carga en la cual se tiene el punto de inflexión es llamada carga de transición y las zonas donde los factores son estables corresponden a regímenes de desgaste. Una curva típica se puede observar en la fig. 1.5.

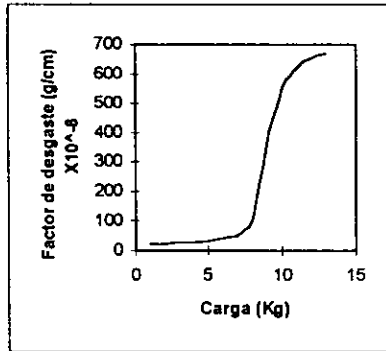


Figura 1.5. Curva típica factor de desgaste vs Carga aplicada.

No necesariamente un material puede presentar tan sólo dos regímenes, ya que algunos pueden presentar sólo uno o más de dos, dependiendo de las condiciones de la prueba y de la naturaleza del material. Algunos materiales forman varios tipos de óxidos y presentan curvas como la mostrada en la fig. 1.6, donde los diferentes regímenes corresponden a los diferentes óxidos formados.

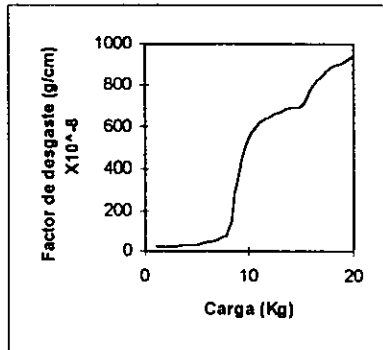


Figura 1.6. Curva factor de desgaste vs carga aplicada, donde los diferentes regímenes corresponden a los diferentes óxidos formados.

1.2 Tipos de aleaciones para recubrimientos protectores.

1.2.1 Aleaciones antifricción.

Un grupo de aleaciones muy importantes son las aleaciones empleadas como revestimiento en las piezas sometidas a desgaste, llamadas aleaciones antifricción. La resistencia al desgaste que puede presentar una aleación depende de un gran número de factores como: presión, lubricación, velocidad de rotación y microestructura de la misma.

En general, una aleación antifricción es una aleación de dos constituyentes, formada de una fase dura englobada en una matriz blanda. El constituyente duro resiste el desgaste y tiene un coeficiente de fricción pequeño. Es un metal puro o más generalmente una combinación de dos elementos. El constituyente blando permite a la pieza sometida a desgaste, amoldarse a la otra superficie metálica con la que esta interactuando, permitiendo un ajuste adecuado en el caso de los cojinetes. Así las cargas se reparten uniformemente. La superficie de contacto es máxima y no hay peligro de tener presiones locales considerables que podrían deteriorar los metales en contacto.

El constituyente blando es ordinariamente un eutéctico. La proporción de estos dos constituyentes de caracteres opuestos varían con las aplicaciones, el constituyente duro es tanto más abundante, cuando más fuerte es la presión que debe resistir. Estas aleaciones son de punto de fusión relativamente bajo, generalmente entre los 220 a 200 °C, por esto son fáciles de colocar y sobre todo una elevación anormal de temperatura provoca la fusión de la aleación y evita el calentamiento del par metálico, que podría ocasionar su deterioro.

Las aleaciones antifricción son muy numerosas y no daremos más que las principales familias.

a) Antifricción a base de plomo; Pb-Sb de aproximadamente 10 a 15% de Sb, el componente blando es un eutéctico. Pb-Sn-Sb(60 a 80, 10 a 20 y 10 a 20). El constituyente duro es la combinación Sn_3Sb_2 . Pb-Sb-Cu(86-10-04).

b) Aleaciones antifricción a base de estaño. Sn-Sb-Cu (78 a 83, 4 a 13 y 6 a 9).Sn-Pb-Sb-Cu (40-40-15-5). Estas aleaciones contiene dos constituyentes duros Sn_3Sb_2 Cu_3Sn .

c) Antifricción a base de cobre, cobre-plomo de 20 a 30% de Pb.

1.2.2 Aleaciones electrolíticas.

El uso de la electrodeposición de metales y aleaciones sobre un metal base, es otra alternativa muy interesante tecnológicamente hablando, ya que podemos darle mejores propiedades a una pieza, como protegerla contra la corrosión, mejorar sus propiedades a la fricción, darle propiedades magnéticas, etc., en las partes que esta la requiera.

La electrodeposición es un proceso en frío, comparado con la preparación de las aleaciones por vía térmica, por lo que si se utiliza para aplicar una aleación antifricción, tiene la ventaja de no afectar térmicamente a la aleación base.

Se han desarrollado numerosas técnicas para electrodepositar, a partir de soluciones acuosas, un gran número de elementos.

Pero debido a sus limitadas propiedades, se hace necesario desarrollar procedimientos para electrodepositar aleaciones. Debido a que requieren de un control más complicado, se han desarrollado mucho menos procesos para electrodepositar aleaciones en comparación con los procesos para metales puros.

Las aleaciones electrodepositadas pueden tener grandes ventajas. Su dureza puede ser mayor que el del electrodepósito de metales individuales. También su dureza es mayor que

el de la correspondiente aleación térmica, la cual es endurecida por tratamiento térmico o trabajado en frío⁶.

Para predecir el posible resultado obtenido al electrodepositar una aleación, el diagrama de fases correspondiente debe ser consultado en la región de baja temperatura.

Las predicciones no se pueden hacer con certeza, debido a que los electrodepositos regularmente están formados por cristales de tamaño muy fino, y los cristales de estas características pueden promover una solubilidad mayor que las estimadas por el diagrama de fases. La fisicoquímica establece que cuando la superficie es más grande comparada con la masa, en estos cristales, se puede esperar desviaciones de comportamiento arriba señaladas.

El Pb por ejemplo se ha electrodepositado con la Ag en una solución sólida conteniendo 10% de plomo, lo cual es mucho más alto que lo esperado de acuerdo con el diagrama de fases⁷.

Por esto las estructuras obtenidas en las aleaciones electrolíticas son muy diferentes a las estructuras de colada.

Primeramente por el tamaño de los granos y segundo, debido a que ciertas estructuras no se pueden obtener por electrodepositos, como la estructura eutéctica, la cuál se forma desde un líquido y a temperatura relativamente alta, pero no con los procesos que toman lugar durante la depositación.

1.3 Tipos de recubrimientos.

1.3.1 Electrodepósitos.

Los recubrimientos metálicos, obtenidos sobre un electrodo con el fin de cubrir piezas metálicas para hacer variar sus propiedades, son llamados electrodepósitos.

Como es común, la práctica y la tecnología maduraron antes que la ciencia; los electrodepósitos de cobre, plata y oro fueron mencionados y patentados casi tan pronto como Faraday enunció las leyes de la electrólisis.

Hasta antes de la Segunda Guerra Mundial no se había intentado adquirir conocimientos sobre electroquímica, puesto que sus aplicaciones fueron solamente decorativas, en donde la importancia principal era la apariencia ignorando las propiedades físicas y químicas.

La demanda que hubo en la Segunda Guerra Mundial, de acabados metálicos con determinadas propiedades y bastante específicas, convirtió a los electrodepósitos en una gran tecnología basada en la ciencia. Estos adelantos los han obtenido por los avances en metalurgia, física y electroquímica, mejorándose lo que se refiere a corriente directa, instrumentos de medición y a un crecimiento tanto en la industria química como la química pura.

Hoy en día los electrodepósitos además de emplearse para mejorar la apariencia de ciertos objetos, deben satisfacer necesidades técnicas como: alta resistencia a la corrosión, al desgaste y a la fricción; depósitos de mayor dureza, firmeza en soldadura y propiedades eléctricas específicas, entre otras.

El proceso para obtener depósitos metálicos por medio de la corriente eléctrica es una aplicación práctica de la electrólisis. Es llevado a cabo por medio de una solución

normalmente acuosa, que contiene iones metálicos reducibles, y que son los que se depositan durante el proceso.

Esta solución es colocada dentro de una celda electrolítica y al hacer pasar una corriente directa se producen cambios químicos consistentes en neutralizar los iones positivos en el cátodo en el cual se depositan, a la vez que los iones negativos ceden electrones en el ánodo, oxidándose.

El éxito en la preparación de esta depósitos depende en gran parte de las condiciones de trabajo, las que deben estar de acuerdo con las propiedades físicas y químicas de la superficie que quedará cubierta, así como las del depósito. La reducción de los cationes que se depositan sobre la superficie a recubrir es afectada principalmente por los siguientes factores: densidad de corriente, agitación, temperatura, pH, poder de distribución, composición del baño electrolítico y preparación del sustrato.

1.3.1.2 Electroless.

El proceso para obtener depósitos metálicos sin corriente eléctrica llamado electroless es conocido también como depósito metálico obtenido por reducción química o referido ocasionalmente como recubrimiento metálico autocatalítico.

Este proceso puede definirse como la obtención de recubrimientos metálicos sobre superficies conductoras y no conductoras y encuentra su máxima aplicación sobre éstas últimas como lo son por ejemplo: cerámica, vidrio, madera , cuero , papel, fibras textiles y plásticos principalmente. Entre los plásticos comúnmente usados se encuentran: el acrílico nitrilo-butadieno-estireno, propileno, resinas epóxicas y fenólicas, cloruro de polivinilo, polifluoruro de carbono y óxidos de polifenileno, entre otros.

La primera descripción sobre metalizado sin corriente eléctrica fue hecha por Liebig en 1835, al reducir las sales de plata por medio de aldehídos para platear vidrio. No se mostraron adelantos con respecto a esto hasta que en 1944, en un intento para obtener electrolíticamente un depósito de la aleación de Ni-W, se agregó a una solución con iones de níquel, hipofosfito de sodio para disminuir la oxidación anódica, se obtuvieron depósitos de níquel sin haber circulado corriente eléctrica.

Los avances de este procedimiento para metalizar superficies no conductoras son directamente atribuibles a los siguientes acontecimientos:

- A la introducción de una gran cantidad de plásticos en la vida cotidiana, a los que puede dárseles una apariencia metálica.
- Al descubrimiento de depósitos de aleaciones metálicas obtenidas por medio del proceso electroless, tan notables como la de Ni-P, únicas en propiedades que las hacen competir con los electrodeósitos.
- Y al auge de la industria electrónica especialmente la de circuitos impresos.

Existen marcadas diferencias entre los procesos de electroless y electrolítico, aún cuando teóricamente y prácticamente son paralelos. Las diferencias encontradas para el proceso llevado a cabo sin corriente eléctrica con respecto al convencional son:

Los baños electroless emplean para la reducción un agente químico.

Las soluciones son poco estables.

Las soluciones tienen un poder ilimitado para obtener depósitos excelentes al cubrir superficies irregulares o interiores de objetos en los que se dificulta o se imposibilita hacerlo convencionalmente.

Los baños trabajan a temperatura más elevada.

La velocidad de depósito es menor.

Las superficies que serán recubiertas deben ser tratadas con un catalizador.

Los depósitos pueden ser obtenidos directamente sobre superficies no conductoras.

Pueden obtenerse películas metálicas muy uniformes y de espesores mínimos.

Los depósitos son menos porosos.

Las propiedades químicas, mecánicas y magnéticas de los recubrimientos metálicos son diferentes a las obtenidas por depósitos electrolíticos.

El costo del proceso es más elevado que el electrolítico.

A pesar de conducir a resultados satisfactorios el proceso es técnica y químicamente complejo por lo que no puede considerarse como sustituto de los electrodepositos y solamente debe emplearse cuando presente un máximo de ventajas.

Teóricamente pueden depositarse sin corriente eléctrica, todos aquellos metales que se obtienen electrolíticamente y muchos baños de estos han sido reportados pero pocos han resultado de utilidad práctica. Para llevar a cabo la obtención de recubrimientos metálicos sin corriente deben tomarse en cuenta las etapas principales en que se divide el proceso, las que son: limpieza del sustrato, acondicionado, preparación de la superficie catalítica y aplicación del depósito metálico.

Aplicaciones. Las aplicaciones de los depósitos metálicos sobre materiales, tanto conductores como no conductores, por el proceso de electroless, deben estar de acuerdo a la función principal del depósito. Así el depósito metálico puede ser empleado principalmente.

Para mejorar apariencia.

Como medida de protección.

Para mejorar propiedades mecánicas.

Para proporcionar superficies con propiedades especiales.

Estas distinciones tal vez están sobrando, puesto que un depósito decorativo debe extender su objetivo hasta para dar una buena protección a los objetos o hacia alguna otra función. Muchos materiales cubiertos con depósitos metálicos mejoran sus propiedades y por lo tanto se hacen propios para usos industriales en donde cada vez hay más demanda de materiales específicos. Los depósitos decorativos más familiares son los que normalmente consisten en primer lugar de una capa de cobre o de níquel para finalmente cubrir con un metal de mayor costo.

La lista de artículos metalizados para mejorar la apariencia es interminable pero en general casi todos estos artículos son además cubiertos para protegerlos del medio ambiente.

Cabe hacer resaltar que este proceso en su gran mayoría está dedicado a recubrir plásticos aprovechando tanto sus propiedades como su amplia producción de hoy en día. De esta forma los polímeros compiten con los metales por sus ventajas como son su ligereza, la facilidad para adaptarse a diversas formas y obtener una gran variedad de objetos útiles y su bajo costo de producción.

Estos materiales ofrecen un campo extenso al químico. puesto que pueden adaptarse ampliamente ya sea por la modificación del monómero o de las condiciones de polimerización ya que en ocasiones se dispersa el catalizador sobre el objeto que se metalizará, durante el proceso de polimerización o de moldeo.

Sin embargo los plásticos presentan ciertas desventajas en este proceso como las de su superficie suave, su atracción al polvo y la poca afinidad por los metales y que a pesar de ellas se aceptan por sus grandes ventajas y por lo tanto se sigue investigando sobre una buena combinación de plástico-metal como una genuina composición.

Puede pensarse que este proceso llegue a ser una moda pasajera, sin embargo, los avances técnicos en la práctica lo han llevado a encontrar múltiples aplicaciones.

1.3.1.3 Galvanoplastia.

El tratamiento electroquímico es probablemente el tipo más conocido de los procesos de recubrimiento, se puede llevar a cabo satisfactoriamente sobre muchos materiales conductores pero se requieren procedimientos especiales de limpieza para metales como aluminio, acero inoxidable y titanio ya que la capa de óxido protectora debe quitarse primero.

Las capas conductoras deben ser aplicadas a los materiales aislante como los plásticos antes de la galvanoplastia y esta es una aplicación para los procesos PVD.

Los galvanizados son finos granos, realmente algunos pueden ser considerados como amorfos y son generalmente más duros y quebradizos que los metales trabajados.

El galvanizado de cromo es duro (1000Hv) tiene un coeficiente de fricción bajo en contra de muchas superficies y es resistente a la corrosión.

Aunque la placa de cromo es comúnmente conocida como cromo duro (para propósitos de ingeniería) o como cromo brillante (para propósitos decorativos), la dureza es casi la misma.

La principal diferencia es el grosor del recubrimiento.

El cromo duro será normalmente de 2-250 μ m de grosor mientras que el cromo brillante será del orden de 0.2 μ m de grosor y será depositado sobre una capa de níquel. La superficie de la capa más gruesa de 0.5 μ m es normalmente agrietada y este efecto puede ser deliberadamente explotada para dar propiedades de retención de aceite (o petróleo).

El recubrimiento de níquel es utilizado tanto para aplicaciones de resistencia a la corrosión como la resistencia al desgaste. Si se requiere resistencia al desgaste se usan aditivos en el baño para incrementar la dureza, de la electrodeposición desde cerca de 250Hv hasta al menos 400Hv y posiblemente tan alto como 700Hv.

La proporción de deposición es de principal importancia en cualquier operación de recubrimiento, una manera de incrementar ésto, es aumentar la agitación y proporciones de deposición arriba de 60 μ m/min se han logrado con el flujo turbulento de una solución²².

Aun que el cobalto puede ser depositado casi de la misma manera que el níquel, este no es usado ampliamente, sin embargo, recientemente se han desarrollado recubrimientos de cobalto-tungsteno y cobalto-molibdeno para mejorar la resistencia a la fatiga térmica y a la erosión de los troqueles calientes²³.

También el cobalto es usado como la matriz en los recubrimientos de los compuestos electrodepositados, los cuales han sido desarrollados para las turbinas de gas²⁴.

1.3.1.4 Recubrimiento electrolítico.

Los recubrimientos de níquel pueden ser producidos a través de un proceso químico el cual por analogía con la galvanoplastia es conocido como recubrimiento electrolítico (electroless plating).

Los recubrimientos de níquel-fósforo son producidos por la reducción de sales de níquel usando hipofosfito de sodio. Los recubrimientos depositados tienen una dureza de 500-600Hv, los cuales pueden ser incrementados hasta 1000Hv a través de tratamientos con calor. Los recubrimientos de níquel-boro pueden ser producidos de una manera similar y en esta condición tienden a ser más duros que los recubrimientos de níquel-fósforo²⁵.

1.4 Tratamientos superficiales

Los tratamientos superficiales son de suma importancia para la protección contra el desgaste y la corrosión, se clasifican en dos grandes grupos:

a) Modificación superficial.

b) Técnicas de recubrimiento.

La industria tiene necesidad de reducir el desgaste y la corrosión, por lo que, para lograrlo ha recurrido al uso de los procesos de tratamientos de técnicas superficiales; con el propósito de que la vida útil de los materiales se alargue. Para lograr esto es necesario considerar: diseño, materias primas, lubricación, costos de operación, etc.

Para poder elegir o seleccionar que técnica o proceso superficial es el más adecuado, se deben tomar en cuenta los requerimientos de la industria.

Algunos de los principales parámetros que se deben considerar al escoger un sistema de materiales para una situación tribológica dada pueden ser resumidas de la siguiente manera:

Fricción.

Abrasión.

Corrosión.

Conservación de energía.

Fatiga

Desgaste adhesivo.

Costo.

Dureza/resistencia.

Resistencia de impacto

La elección de un recubrimiento óptimo es aun muy subjetivo, ya que no ha sido diseñado un diagrama lógico para la selección automática del proceso.

Hay dos maneras básicas a través de la cuales los componentes pueden ser tratados:

1. Por la modificación de la composición de la superficie.
2. Por la aplicación de un recubrimiento que puede ser depositado sobre la superficie original.

1.4.1 Modificación superficial.

Los principales tipos de tratamientos de superficie están detallados en la fig. 1.4.1, en esta, podemos observar la gran división que forma los tratamientos superficiales, los cuales lo constituyen los tratamientos térmicos y el segundo grupo lo forman los tratamientos térmicos por difusión.

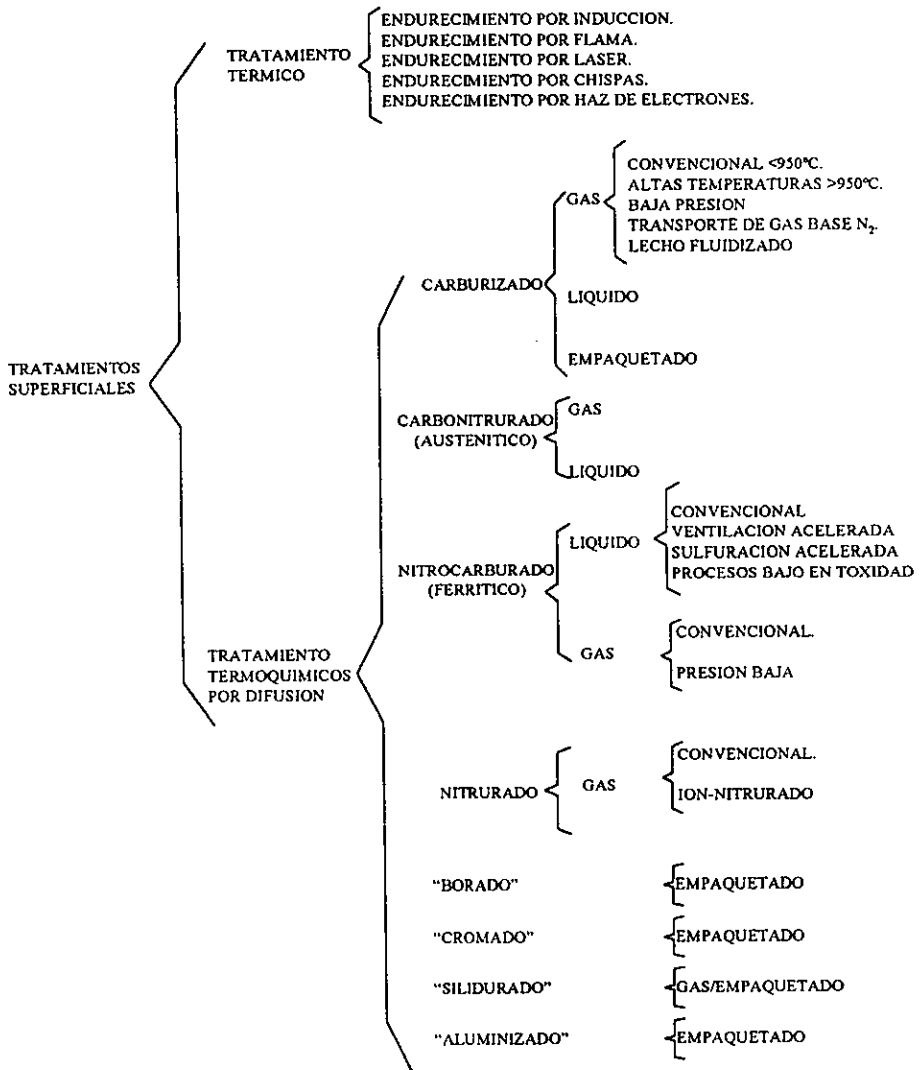


Figura 1.4.1. Tratamientos Superficiales.

1.4.1.2 Tratamientos térmicos.

Los tratamientos térmicos tales como endurecimiento por inducción y flama requieren que la superficie de un componente de acero sea calentado a altas temperatura y después enfriado. Debe haber suficiente carbono presente en el acero para dar un efecto de endurecimiento de consideración, cuando se enfrían los aceros y para el endurecimiento por estas técnicas, normalmente contienen alrededor de 0.35-0.6% de carbón. con más alto contenido de carbono hay riesgo de que se fragilice la superficie al enfriarse.

Los tratamientos son esencialmente selectivos pero el endurecimiento "por inducción" es más fácilmente aplicado a los componentes axi-simétricos.

Están disponibles otros métodos de tratamientos térmicos, pero no son ampliamente utilizados. Por ejemplo el endurecimiento por chispa; es aplicada entre un electrodo no consumible y la superficie que está sufriendo un tratamiento.

Con la llegada del láser de alto poder se ha vuelto posible endurecer selectivamente con más precisión, ya que el rayo láser puede ser medido ópticamente. Tratamiento de láser selectivo ya esta siendo usado en las líneas de producción de las Estados Unidos. También se puede usar un haz electrónico para el endurecimiento térmico y un proceso de tratamiento de este tipo esta siendo promovido en el mismo país. Sin embargo, el proceso se tiene que llevar a cabo en una cámara de vacío lo cuál claramente incrementa la complejidad de la planta, será interesante ver si el calentamiento con haz electrónico es un proceso viable en el tratamiento térmico.

1.4.1.3 Tratamiento termoquímico

El tratamiento termoquímico¹² involucra procesos en los cuáles la composición química del sustrato cambia como resultado de la difusión térmica de uno o más elementos de la superficie. Dicho tratamiento puede llevarse a cabo en un medio gaseoso, en un baño de sales o en proceso de cementación. El carburado y nitrurado son los mejores tipos de tratamiento termodinámicamente conocidos, y el gas carburante es por mucho el más importante de los procesos termoquímicos. Esto es utilizado ampliamente en la industria automotriz, siendo un proceso muy versátil el cuál se puede usar en diferentes aceros, desde aceros de medio carbón hasta aceros relativamente aleados. La carburización es el proceso relacionado al carbonitrurado; dependen del enfriamiento para formar el material endurecido. Los principales elementos de aleación utilizados para satisfacer todos los requisitos de dureza son manganeso, cromo, molibdeno y níquel. En comparación con los aceros utilizados para el endurecimiento térmico, el contenido de carbono es relativamente bajo, generalmente del 0.3%, porque es conveniente obtener una capa superficial de alta resistencia. El carbonitrurado incorpora tanto carbono como nitrógeno en el acero y da una mayor dureza porque el proceso puede ser aplicado a aceros sumamente aleados. El nitrocarburado y el nitrurado se llevan a cabo a temperaturas relativamente bajas, es decir a temperaturas debajo de la temperatura de transformación ($\alpha-\gamma$). El proceso de nitrocarburado es apropiado para el hierro colado y aceros al carbono así como para aceros aleados, mientras que el nitrurado puede ser aplicado solo a cierto tipo de aleaciones de aceros.

Avances recientes en estos procesos están principalmente orientados a conservar la energía, y a reducir problemas ambientales e incrementar la seguridad. Así, hay un creciente interés

en la posibilidad de utilizar nitrógeno para reemplazar el gas endotérmico en los procesos gaseosos. También hay interés en el uso de procesos al vacío y subatmosféricos. Por las mismas razones y por que hay disponible un mejor control del proceso hay un creciente interés por el proceso de nitrurado con iones¹³, el cuál es un proceso al vacío que opera a 1-10 torr.

Finalmente por razones ambientales ha habido considerables desarrollos en los baños de sales de baja toxicidad para los tratamientos de nitrocarburado en los últimos años.

El boronizado¹⁴ es un nuevo proceso de cementación que se lleva a cabo a muy altas temperaturas. La superficie de piezas boronizada, tiene una estructura compleja, muy delgada, pero muy dura.

1.5 Procesos de revestimiento

(Ver la fig. 1.5 en donde se muestran los principales tipos de procesos de revestimiento, los cuales se resumen a continuación).

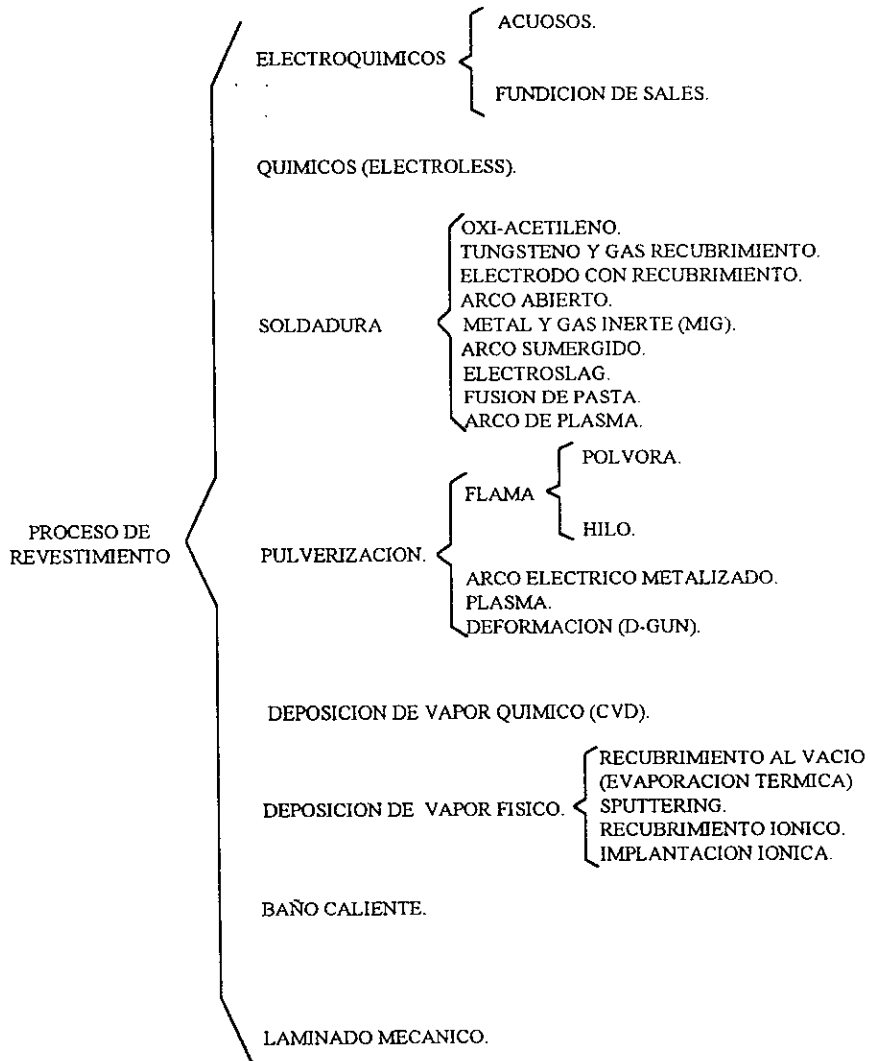


Figura 1.5. Procesos de revestimiento.

1.5.1 Deposición de vapor químico.

La deposición de vapor químico convencional o CVD tiene ciertas características en común con los tratamientos termoquímicos ; los reactivos son gases y el proceso normalmente se tiene que efectuar a altas temperaturas. Hasta ahora, la mayor aplicación comercial del CVD ha sido el proceso de carburización o cementados para herramientas de corte, con el fin de dar un recubrimiento en la superficie, a través de carburo de titanio, nitruro de titanio y alumina.

Sin embargo, el proceso también puede ser usado para el tratamiento de troqueles, herramientas de formación, calibración y otros componentes^{15,16}.

1.5.2 Deposición de vapor físico.

La deposición a partir de una fase gaseosa es también la base de la deposición física de vapor o PVD^{17,21} (Ver tabla 1.5.2.). Actualmente muchos de los procesos PVD no se conocen, por tanto sería útil identificar los principios involucrados;

- La forma en la cual el vapor es generado.
- Si hay un potencial eléctrico aplicado.
- Si también ocurre una reacción química.

PRINCIPALES FENOMENOS DE OPERACIÓN.					
Proceso designado	Evaporación Térmica	Reacción Térmica	Emisión Atómica	Activación de Atmósfera	Penetración del Substrato
Revestimiento al Vacío	*				
Evaporación Reactiva	*	*			
Evaporación de Reacción Activa	*	*		*	
Revestimiento Sputter			*		
Reactivo Sputtering		*	*		
Recubrimiento Iónico	*				
Recubrimiento Iónico Reactivo	*	*			
Implantación Iónica	*&		*&		*

* Por un bajo voltaje de descarga.

& Un alternativa por medio de un generador de especies iónicas.

Tabla 1.5.2 Procesos de deposición de vapor físico.

1.5.3 Revestimiento al vacío.

El revestimiento al vacío o la metalización al vacío requiere que la fuente de metal sea calentada a temperatura suficientemente alta para que la presión de vapor alcance los 10^{-2} torr para que la evaporación térmica pueda ocurrir a una proporción razonable.

Los principales formas de calentar la fuente son a través de resistencias de calor o por el uso de un cañón electrónico. Son posibles varias modificaciones al proceso básico: Un recubrimiento de cerámica puede ser producido por evaporación, por ejemplo; el carburo de titanio puede ser depositado al evaporar el metal y calentar el sustrato en presencia de metano a baja presión (10^{-3} torr). El gas puede hacerse más reactivo al excitarlo con descargas eléctricas.

1.5.4 Sputtering.

Es un método completamente diferente para generar vapor, en el proceso más simple un potencial eléctrico de 1-5KV es aplicado entre la fuente y el sustrato que va a ser recubierto.

Los átomos liberados tiene energías muy elevadas equivalentes a las de la evaporación térmica a miles de grados kelvin y, por lo tanto, son bien depositados cuando impactan el sustrato, siempre que no choquen con otros átomos en el camino. Este es el dilema del sputtering, para obtener una proporción razonable de sputtering se requiere una presión relativamente alta pero para obtener una transferencia eficiente del material la presión debe ser tan baja como sea posible. La presión de trabajo máxima es de alrededor de 0.1 torr.

Uno de los principales atractivos del proceso de sputtering, es que puede ser utilizado para depositar un amplio número de recubrimientos, en efecto cualquier material que sea estable bajo bombardeo iónico, puede ser depositado.

Así metales aleados, semiconductores, óxidos metálicos, algunos sulfuros, carburos, nitruros, pueden ser procesados.

1.5.5 Recubrimiento iónico

El recubrimiento iónico combina muchos de los atributos de la evaporación térmica y del proceso de sputtering y tiene considerable potencial comercial^{18,19}. Altas proporciones de evaporación térmica están combinadas con la deposición de alta energía del proceso sputtering. a través de un control sensato de las condiciones de operación se puede obtener fuerzas de enlace razonable para la deposición fuera de la línea de vista.

El recubrimiento iónico ha sido de los desarrollos más importantes en el campo de los recubrimientos en los últimos años y ya esta siendo usado en una escala de producción para recubrir los sujetadores en la industria de la aviación en los Estados Unidos.

El otro proceso desarrollado recientemente PVD es la técnica de implantación iónica la cual ha sido indicada en Harwell^{20,21}. En esencia un rayo iónico es producido utilizando un voltaje muy alto normalmente 100-150 Kv, lo cuál asegura que los iones tengan suficiente energía para penetrar la superficie del sustrato. La implantación iónica no requiere de una alta temperatura aunque un calentamiento secundario puede ocurrir como resultado del bombardeo.

1.5.6 Baños calientes

Los procesos de baños calientes²⁶ normalmente emplean metales de punto de fusión relativamente bajos como el plomo, zinc, estaño y aluminio y son aplicados a materiales ferrosos para incrementar la resistencia a la erosión. Comparando con otros procesos las proporciones de reacción son altas y los tiempos de proceso cortos, en muchos se requiere solamente algunas minutos. Es muy importante un control preciso del proceso, particularmente con formas intermetálicas en los sistemas fierro-aluminio, fierro-estaño y fierro-zinc. Los baños calientes es tal vez la forma más rápida de recubrir metales y en las líneas de galvanizado continuo las proporciones de depositación pueden exceder 1 ton/h.

1.5.7 Soldadura

Todas las formas de los procesos para soldar pueden ser usadas para producir capas de recubrimientos.

Las proporciones de depositación pueden variar desde muy bajas como ½ Kg/h para oxy-acetileno hasta tan altas como 350 Kg/h de soldadura con electroescoria completamente automático. La proporción de depositación y por consiguiente la entrada de calor en relación con el tamaño del trabajo es una consideración principal al escoger el proceso más apropiado. Claramente sería ridículo intentar recubrir un alto horno a través del proceso de oxi-acetileno o intentar recubrir una reja de arado por el proceso del arco sumergido.

Una diferencia importante entre los procesos de soldadura y los otros mencionados hasta ahora es que el primero es usado para procesos de recuperación para cantidades mayores que los otros.

Las composiciones de los recubrimientos usados en los procesos de soldadura son extremadamente variados, pero una vez más se tiene que hacer una elección entre resistencia al desgaste y dureza. En relación a la composición del revestimiento, se deben considerar también los efectos de dilución y normalmente es preferible llevar a cabo el recubrimiento a través de la técnica "multipass".

1.5.8 Pulverización.

El proceso de pulverización es a través de finas partículas del material con el que se va a recubrir, estas partículas son calentadas hasta un estado plástico o de fusión y son depositadas a altas velocidades sobre el sustrato relativamente frío.

Hay cinco procesos principales:

- 1. Termorociado a la flama (flame spraying).**
- 2. Arco metálico.**
- 3. Termorociado por plasma (plasma spraying).**
- 4. Pistola de rocío.**
- 5. Laminado mecánico (aleación mecánica).**

El nuevo proceso de pulverización es muy interesante, el cuál puede ser usado para formar recubrimientos de zinc, cadmio o estaño-cadmio. La soldadura en frío de polvos metálicos sobre la superficie de partes pequeñas es logrado al agitarlos con cuentas de vidrio y un activador químico. Su principal ventaja es la ausencia de fragilidad por hidrógeno en la parte terminada.

1.5.9 Comparación de los procesos.

Los espesores de recubrimiento o las profundidades del tratamiento varían desde cerca de 0.1 μm hasta 10 mm o más, por lo que hay muchas opciones disponibles para el diseñador. Las variaciones en el espesor del recubrimiento son normalmente reflejadas por la variación de las proporciones de depositación. La excepción a esta variación es el baño caliente (hot dipping) continuo, donde la depositación de un recubrimiento a velocidades muy altas se refleja a través de altas proporciones de recubrimiento en términos de tonelaje. También hay que resaltar que las proporciones de un recubrimiento, están basadas en los espesores, y en algunos otros casos el peso del recubrimiento depositado. Esto significa que el tamaño del objeto a ser recubierto tiene un efecto directo sobre la proporción global en los procesos de Pulverizado y Soldado mientras que este no es el caso para los procesos como el carburizado o el CVD.

La porosidad es significativa solamente en los procesos de pulverización. Esta puede ser tan alta como 10-15% en la pulverización a la flama; 1-3% en pulverización por plasma, pero generalmente menor a 1% en los recubrimientos por pistola.

La fuerza de enlace interfacial es importante también en aquellos procesos que esencialmente son aplicados en frío y es muy notoria su dificultad para medirla con precisión.

CAPITULO 2

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

HIPOTESIS.

1. La aleación electrolítica ternaria Ni-Co-B tiene una microestructura homogénea, dicha estructura puede ser modificada por tratamientos térmicos.

2. Los tratamientos térmicos al modificar la estructura, modifican también las propiedades al desgaste de la aleación.

2.1 Materiales utilizados como sustratos.

Los materiales utilizados como sustratos se describen en la tabla 2.1 y 2.1a. La diversidad en cuanto a composición química de dichos materiales se debe, a que en este estudio se considero necesario evaluar las características al desgaste de la aleación como depósito en distintos sustratos, que para el caso se tratan de aceros comerciales y materiales no ferrosos, que comprenden desde un acero al carbón (1018,1045 AISI), hasta un acero de alta aleación (M2 AISI) y materiales como compósitos y cobre electrolítico.

El análisis químico, tanto para los sustratos mostrado en la tabla 2.1 y 2.1a, como para el electrodeposito de Ni-Co-B mostrado en la tabla 2.2, fueron determinados por espectrometría de absorción atómica en un equipo marca Perkin Elmer modelo 1100.

	C	Mn	P	S	Si	V	Cr	Ni	Mo	W
1018	0.18	0.75	0.040	0.050	—	—	—	—	—	—
1045	0.44	0.57	0.013	0.033	0.16	0.14	—	—	—	—
4140	0.40	0.87	0.040	0.040	0.27	—	0.95	—	0.20	—
9840	0.40	0.8	0.040	0.040	0.275	—	0.80	1.0	0.25	—
M2	0.82	0.28	—	—	0.32	1.97	4.12	—	5.0	6.12

Tabla 2.1. Composición química de los distintos sustratos ferrosos utilizados

	Cu	Al	Si
Cobre	99.999	—	—
Compósito 10% Vol. de SiC	—	93	7

Tabla 2.1a. Composición química de los distintos materiales no ferrosos utilizados

Ni	Co	B
71.28	26.66	1.96

Tabla 2.2. Composición química de la aleación electrolítica Ni-Co-B (% en peso)

2.2 Preparación de probetas para su posterior electrodeposición.

2.2.1 Corte:

Se elaboraron una serie de probetas de materiales ferrosos y no ferrosos descritos en la tabla 2.1 y 2.1a; los diversos materiales usados para este trabajo, partían con una geometría de llegada consistiendo de barras cilíndricas, a las cuales se les practicó un maquinado con el fin de darles las características necesarias para el desarrollo del presente trabajo.

Las características necesarias con las que deben de contar las probetas se detallan a continuación:

- Las dimensiones de las probetas son: cilindros de aproximadamente 6 mm de diámetro, 10 mm. de longitud; así como un careado en las caras paralelas de la probeta .
- Una vez maquinadas, se barrenaron y machuelearon a un costado de las probetas, con el objeto de poder sujetar dicha probeta en el posterior proceso electrolítico.
- Pulir a espejo una de las caras de las probetas, para que estas cumplan con las condiciones de acabado para el depósito.

El equipo utilizado en la preparación de las probetas fue un Torno Paralelo marca Fraver modelo CE-1200E, un Taladro Tipo Arboga cono No.3, una Sierra Cinta modelo F-300.

2.2.2 Tratamientos Térmicos.

Se practicaron los siguientes tratamientos térmicos conforme a la tabla 2.3.

T r a t a m i e n t o s T é r m i c o s					
Material	Tratamiento térmico realizado, antes de recubrir los pernos o probetas	Tratamiento térmico realizado; después de recubrir los pernos o probetas	Temperatura ° C	Tiempo de Permanencia min.	Medio de Enfriamiento
Acero 1045	Temple	—————	820	10	Aceite
	Revenido	—————	220	10	Aire
Acero 4140	Temple	—————	850	15	Aceite
	Revenido	—————	210	15	Aire
Acero 9840	Temple	—————	850	10	Aceite
	Revenido	—————	205	10	Aire
Acero M2	Temple	—————	730-845 para posteriormente llevarlo a 1190-1230	10	Aceite
Acero 1018	—————	Temple	400	10	Agua
Acero 1018	—————	Recocido	400	10	Aire
Acero 1018	—————	Temple	700	10	Agua
Acero 1018	—————	Recocido	700	10	Aire
Acero 1018	—————	Temple	900	10	Agua
Acero 1018	—————	Recocido	900	10	Aire

Tabla 2.3. Tratamientos térmicos realizados a los distintos materiales utilizados.

La serie de tratamientos para el acero 1018 fueron hechos con las piezas ya recubiertas, con el objeto de observar como se modifica la estructura y las propiedades al desgaste de la aleación electrolítica, en tanto que los aceros 1045, 9840, M-2, se trataron térmicamente antes de ser recubiertas para endurecer más el sustrato y posteriormente someterse a el recubrimiento electrolítico.

El equipo que se utilizó para realizar los tratamientos térmicos fue un horno Naberthem tipo mufla modelo N60/14 de temperatura máxima de 1400 °C, utilizando un controlador automático digital con una precisión termométrica de ± 10 °C y con una atmósfera inerte de Ar. Los tiempos de permanencia se calcularon considerando que el volumen de las muestras fue de aproximadamente 0.316 cm³.

2.2.3 Electrodeposición.

La electrodeposición de la aleación ternaria Ni-Co-B se realizó primeramente sobre muestras lijadas y pulidas de acero 1018 con espesores de 10, 20, 25, 50 y 75 μm , con el objeto de determinar el espesor óptimo de recubrimiento, el espesor óptimo determinado a través de ensayos de desgaste, fue de 22 μm . Una vez determinado, se depositó el mismo espesor a los demás aceros, con lo cual para el caso de los aceros 1045, 4140, 9840 y M2 el espesor depositado se realizó a 22 μm , la textura obtenida del recubrimiento es de un acabado tipo espejo.

El proceso de electrodeposición de la aleación ternaria Ni-Co-B consiste primordialmente de dos etapas, las cuales se conforman de la siguiente manera:

a.- Limpieza y activación del sustrato. (Figura 2.1).

b.- Plateado. (Figura 2.2).

Limpieza y activación del sustrato.- Primeramente el sustrato recibe una prelimpieza con isopropanol, para posteriormente limpiar dicho sustrato anódicamente con una solución alcalina de (NaOH , Na_2CO_3 , NaSiO_3 y $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$) (región 1) durante 2 minutos, a una densidad de corriente de alrededor de 0.08 amps/cm^2 . Enseguida se enjuaga con agua destilada caliente (región 2a) y agua destilada fría (región 2b), con lo cual se remueven todos los álcalis excepto el NaSiO_3 ; el cual proporciona una película protectora al sustrato. Posteriormente el sustrato se sumerge en un baño ácido de ($1\% \text{ H}_2\text{SO}_4$ y $0.1\% \text{ HNO}_3$) por un periodo de tiempo de 5 minutos (región 3), para pasar inmediatamente a una limpieza con agua fría destilada (región 4). Después de los baños alcalinos y ácidos, el sustrato se activa tanto anódicamente como catódicamente en una solución activadora de HCl y NiCl_2 (región 5). Esta activación es primero de tipo anódica durante 2 minutos, con lo cual se remueven óxidos, los cuales se forman sobre la superficie del sustrato. En segundo término el sustrato se activa catódicamente con la misma solución durante 6 minutos, con lo cual se forma una película metaestable de níquel sobre la superficie del sustrato. Posteriormente el sustrato se sumerge en agua destilada (región 6), para pasarlo al baño de plateado (región 7). Cabe hacer notar que los enjuagues después de los baños ácidos y alcalinos, se realizaron por duplicado (regiones 2a, 2b y 4a, 4b) de tal forma que exista una mejor remoción de las soluciones, y se evite la contaminación de un baño a otro.

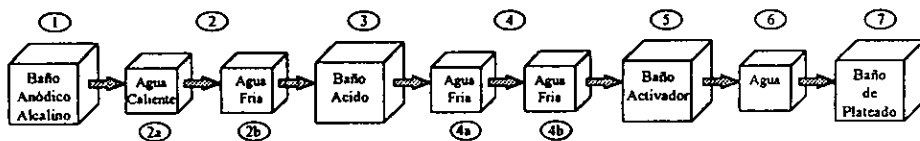


Figura 2.1. Diagrama de flujo, procedimiento de activación de las muestras

Plateado.- La deposición de la aleación electrolítica Ni-Co-B se realiza mediante un proceso electrolítico; para lo cual se utilizan un par de ánodos cubiertos de níquel electrolítico y un cátodo el cual es el sustrato a ser recubierto, los que se conectan a una fuente de poder, sumergidos en un baño de sales se hace pasar una corriente a través de ellos. La fuente de poder produce corriente pulsada de onda cuadrada para mejorar las propiedades tribológicas de los electrodepositos, con una frecuencia de 1000Hz. La onda cuadrada posee un T_{on} (tiempo de activación) de 0.3 milisegundos y un T_{off} (tiempo de desactivación) de 0.7 milisegundos con una densidad de corriente pulsada de entre 0.018 y 0.076 amps/cm².

Debido al proceso electrolítico; la corriente pulsada produce O₂ en los ánodos e H₂ en los cátodos cuando la fuente de poder permanece encendida; cuando ésta permanece apagada, la difusión de la película de gas se dispersa. Esta producción alterna de O₂ y H₂, así como la dispersión de la película de gas, previene la oxidación sobre los ánodos y evita la polarización en el cátodo.

Este baño de plateado contiene sales de Ni y Co, ácido bórico y un amino-borano. Además dicho baño contiene 2 ml/litro de solución de un agente humectante (alcohol), para uniformizar la depositación de la aleación sobre el sustrato y 0.25% de un agente relevador de esfuerzos, el cual previene que el hidrogeno sea atrapado entre la aleación y el sustrato, lo cual podría generar la aparición de defectos en dicho depósito, manifestandose por la formación de porosidades y grietas, tanto superficialmente como internamente.

Niveles de esfuerzos internos muy altos, particularmente de tipo tensil, pueden afectar desfavorablemente las propiedades de desgaste del electrodepósito, los cuales pueden surgir de la difusión de hidrógeno fuera de las capas superficiales.

Dichos defectos aparecieron en varias pruebas, los cuales se señalan en su oportunidad.

2.2.3.1 Descripción del equipo de depositación. (Figura 2.2).

El baño de plateado es preparado en un tanque (8) equipado con un agitador de aire (9) que opera a una presión de 0.25 psi y una bomba de filtrado (10), el cual incluye un calentador automático, controlador de nivel, un controlador de pH y un monitreador de análisis químico de la solución. Este tanque esta dividido en tres secciones, mediante dos diafragmas (11) y (12) de acrílico perforado. Las secciones mencionadas son: una central, que es la celda catódica (13) y las dos restantes son las celdas anódicas (14) y (15). El sustrato (16) que hace las funciones de cátodo el cual se sumerge en la celda catódica; una barra de Ni electrolítico forma un ánodo (17) el cual es envuelto con polipropileno, colocándose una barra de níquel electrolítico en cada una de las celdas anódicas.

Este baño es ajustado a un valor de pH de entre 3.8 y 4.0 con H_2SO_4 ó NH_3OH el cual es calentado a una temperatura de aproximadamente $52^{\circ} \pm 1^{\circ}C$.

El catalizador (18) es colocado en una de las celdas, preferentemente en la celda catódica, formada por el diafragma. El sustrato a ser recubierto es sumergido en el baño a una profundidad de aproximadamente 5.08 cm., con la corriente encendida; el espesor de recubrimiento depositado depende de:

- El área sobre la superficie del sustrato.
- La densidad de corriente.
- Tiempo del plateado.

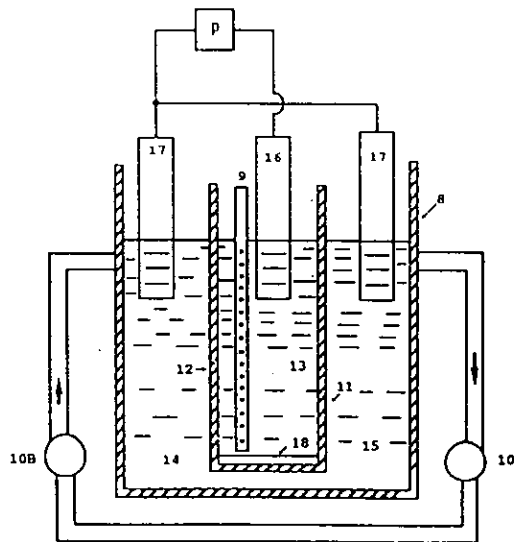


Figura 2.2. Esquema del equipo de plateado.

2.3 Desgaste.

2.3.1 Descripción del equipo de desgaste.

Se realizaron las pruebas en la máquina de desgaste, cuyo esquema y componentes se muestran en la figura 2.3. La cual consiste de un disco giratorio (2) acondicionado a un motor de corriente alterna (5) el cual cuenta con un regulador de rpm (6), el disco utilizado es de acero 4140 templado y revenido con una dureza de 53 HRC, con acabado a lija 600, pulido con alúmina de 1 μm . Las probetas (1) de los diversos substratos a tratar se colocan en un brazo articulado de acero (3), en la parte superior de este brazo se coloca la carga a la que será sometida la probeta (4), una vez montada la probeta se deja caer el brazo en forma perpendicular a la superficie del disco giratorio.

2.3.2 Procedimiento.

Todas las pruebas se realizaron a una velocidad de 402 rpm; que equivale a una velocidad lineal de 0.1 Km/min., las cargas utilizadas para realizar las pruebas fueron de: 0.5 Kg, 1 Kg, 1.5 Kg y 2 Kg que equivalen a 0.017, 0.035, 0.053 y 0.07 Kg/mm. Una vez que se han cortado los pernos y se recubren electrolíticamente (Ni-Co-B) se lleva a cabo el ensayo de desgaste; se pesa el perno en una balanza analítica con una precisión de diezmilésimas de gramo para tener el peso inicial y se marca esta, para que no cambie la posición en donde empieza a tener su desgaste inicial, después de un tiempo marcado de 1 minuto, se quita el tornillo opresor para que el perno salga de su posición y se lleva a pesar, esto mismo se lleva a cabo hasta que el perno alcanza una distancia recorrida de 4 Km., con el propósito de poder monitorear el comportamiento del recubrimiento. Las rebabas obtenidas de cada una de las muestras desgastadas se recolectaron cuidadosamente, las cuales posteriormente se

utilizaron para ser observadas en el microscopio electrónico de barrido y para realizar el análisis de rayos X.

Los espesores de recubrimiento manejados con el objeto de determinar el espesor óptimo fueron: 10 μm , 20 μm , 25 μm , 50 μm y 75 μm .

Al seleccionar diferentes diámetros de pista para las pruebas de desgaste, se detectó una variación de la velocidad lineal. Ya que la influencia de estas variaciones de velocidad son mínimas en comparación con las variables estudiadas se desprecia dicha variación. El área de las probetas sometidas a cargas en desgaste es de 28.27 mm^2 .

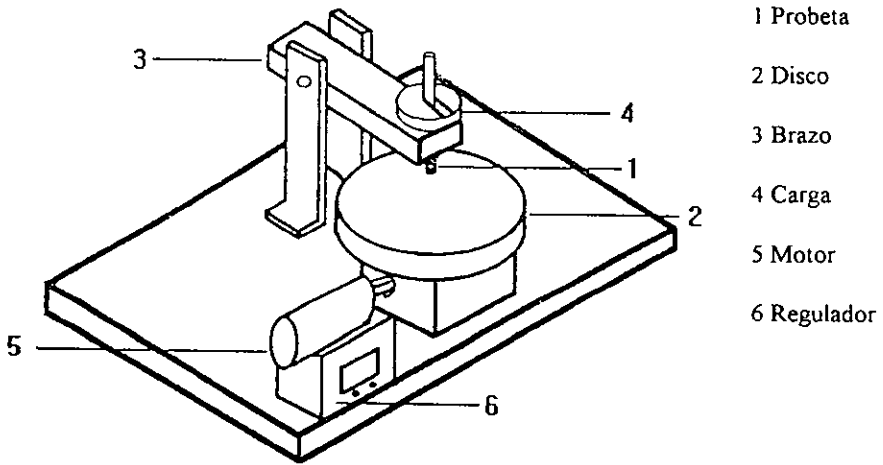


Figura 2.3. Equipo de Desgaste.

2.4 Preparación y caracterización de las probetas.

2.4.1 Microestructura (Metalografía)

- Corte: La varilla una vez recubierta se corta longitudinalmente con una cortadora de baja velocidad Marca LECO modelo VC-50 con disco de diamante a muy bajas velocidades, para que no sufra desfoliación la muestra.
- Desbaste: Se desbaste las muestras cortadas, a través de un desbaste fino el cual consiste en lijas de distintos grados, los cuales van desde 240 granos/pulg² hasta 600 granos/pulg²
- Pulido: Para la observación de las microestructuras, se pulieron a espejo las probetas con alúmina de 1, 0.3, 0.05 micras.
- Ataque: La solución utilizada esta constituida por: 5 ml de peróxido de hidrogeno y 100 ml de ácido clorhídrico.
- Observación de las probetas en un microscopio óptico Marca OLYMPUS modelo PMG-3 acondicionado con cámara fotográfica de 35mm.

2.4.2 Microanálisis.

- Seguimiento por microscopía electrónica de barrido de las superficies sometidas a desgaste, así como a los polvos obtenidos durante el proceso con lo cual se podrán determinar los mecanismos operantes. El microscopio utilizado fue un microscopio de barrido Marca JEOL modelo JSM-6400.

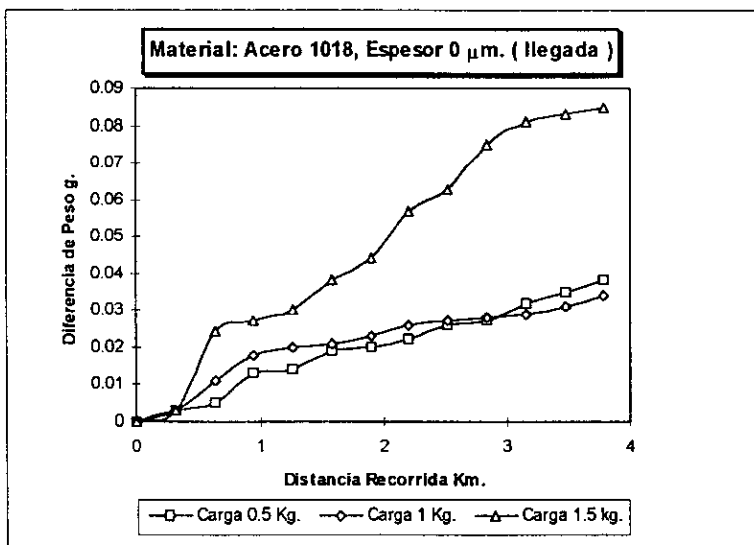
2.4.3 Rayos X.

- Aplicación de difracción de rayos X a polvos obtenidos en las superficies de desgaste; para verificar la presencia de compuestos formados; en especial de óxidos. El equipo utilizado para realizar los análisis de rayos X, fue un difractómetro Marca SIMMENS modelo D5000. El procedimiento a seguir para realizar dicho análisis consta de montar la muestra en un portamuestras de plástico de 10 cm de ancho en la cavidad que corresponde al diámetro del haz incidente, utilizando una radiación de cobre con una longitud de onda de 1.5405 y filtro de níquel con una geometría de 0.2 mm, utilizándose una velocidad de barrido de 0.5 grados por minuto.

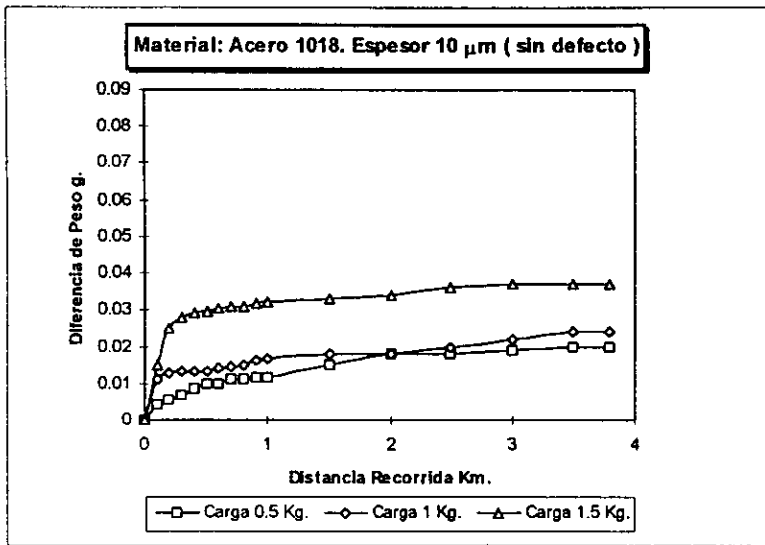
CAPITULO 3

RESULTADOS EXPERIMENTALES

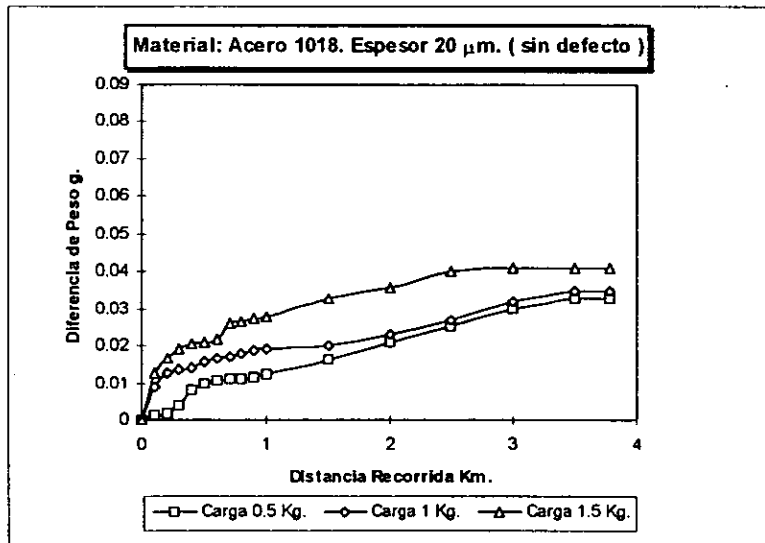
Una vez realizadas las pruebas especificadas, los resultados que se obtuvieron se muestran a continuación:



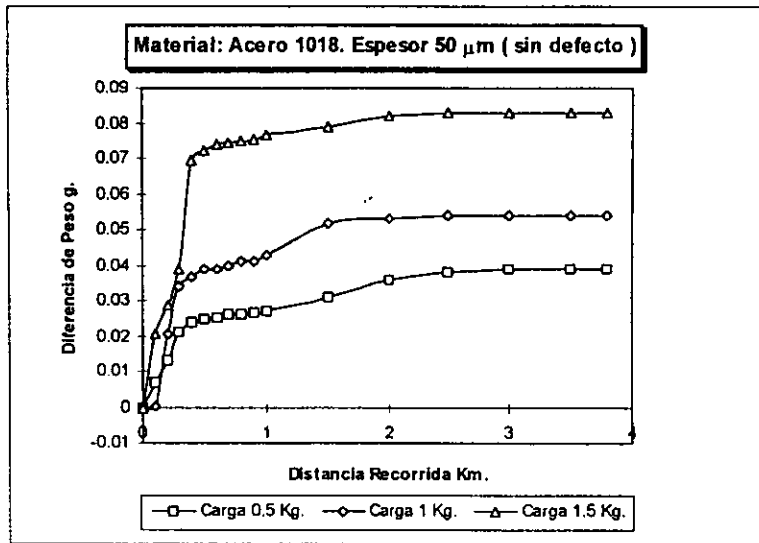
Gráfica 1. Perfil de desgaste del acero 1018 sin recubrimiento, desgastado con las diferentes cargas.



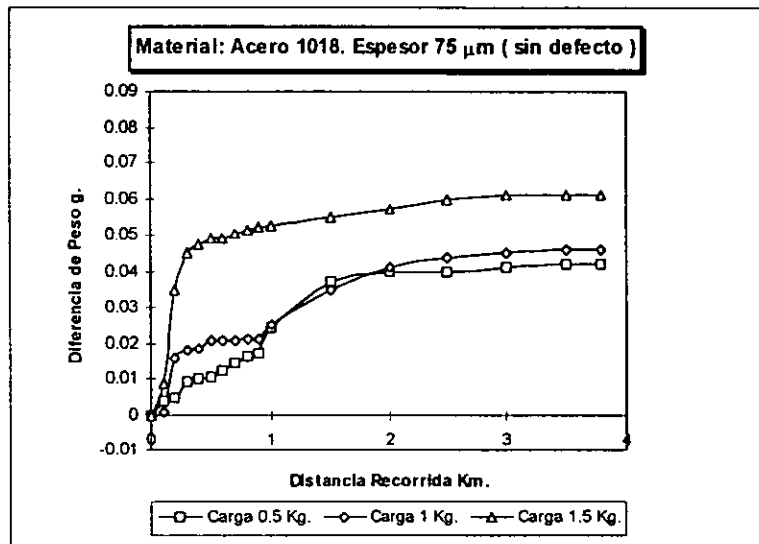
Gráfica 2. Perfil de desgaste del acero 1018 recubierto, sin defecto desgastado con las diferentes cargas.



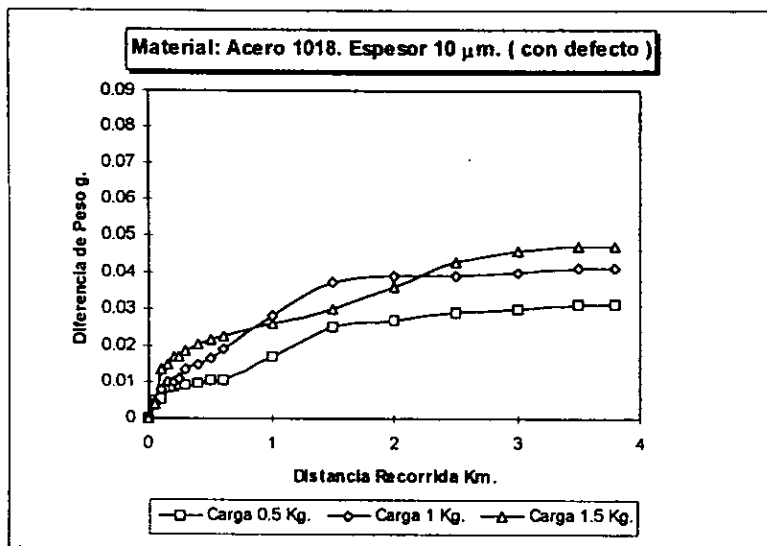
Gráfica 3. Perfil de desgaste del acero 1018 recubierto, sin defecto desgastado con las diferentes cargas.



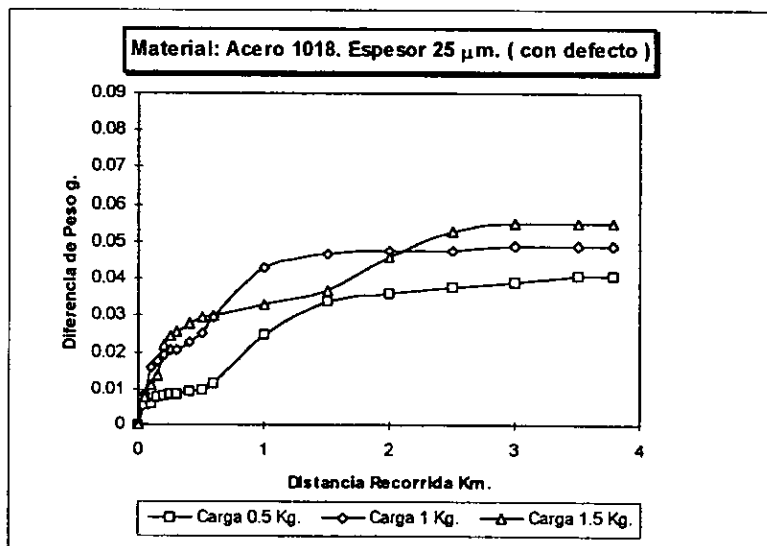
Gráfica 4. Perfil de desgaste del acero 1018 recubierto, sin defecto desgastado con las diferentes cargas.



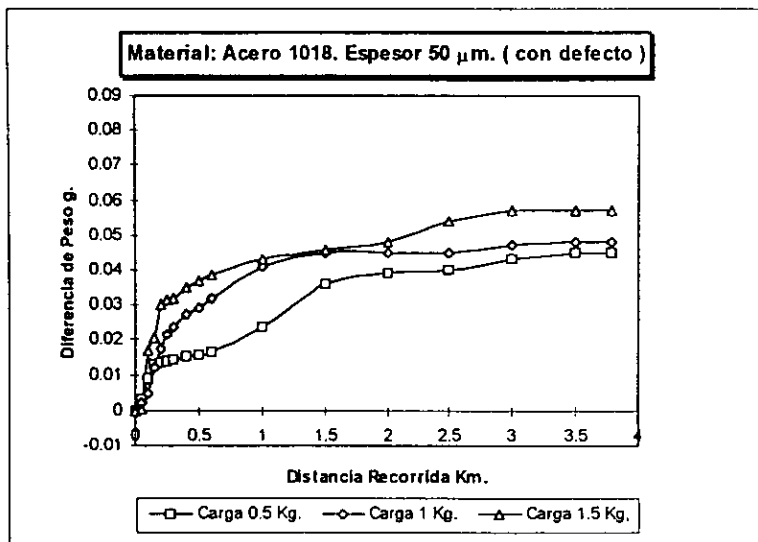
Gráfica 5. Perfil de desgaste del acero 1018 recubierto, sin defecto desgastado con las diferentes cargas.



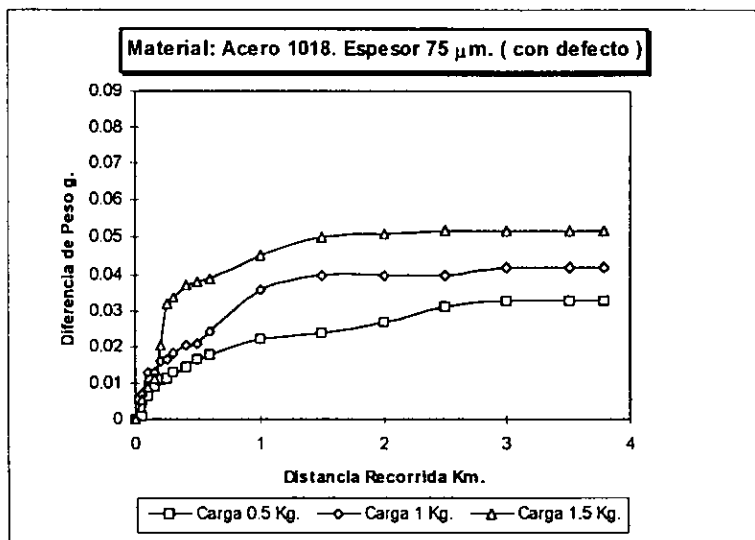
Gráfica 6. Perfil de desgaste del acero 1018 recubierto, con defecto desgastado con las diferentes cargas.



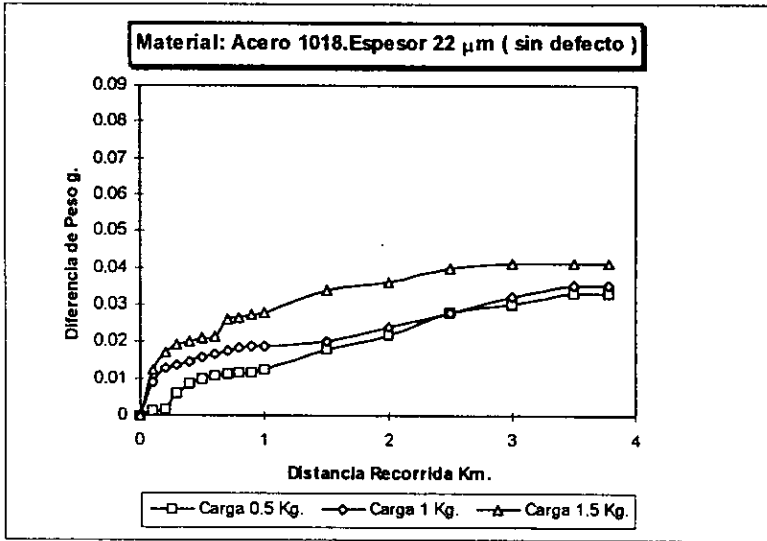
Gráfica 7. Perfil de desgaste del acero 1018 recubierto, con defecto desgastado con las diferentes cargas.



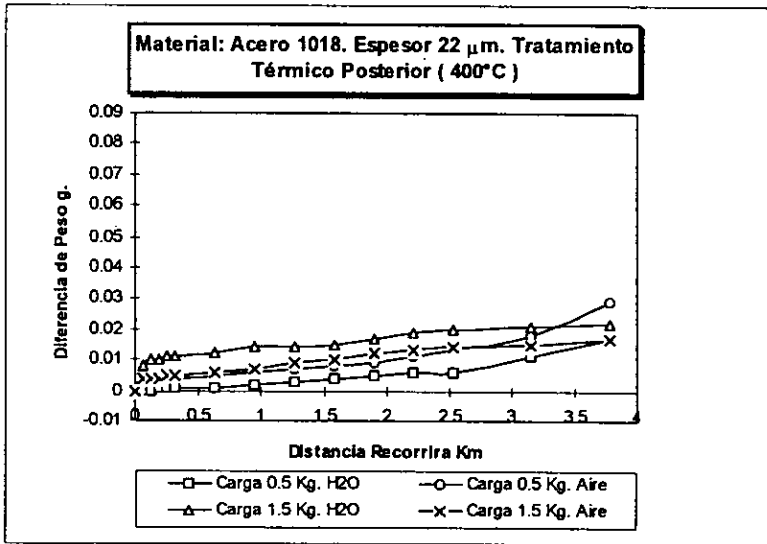
Gráfica 8. Perfil de desgaste del acero 1018 recubierto, con defecto desgastado con las diferentes cargas.



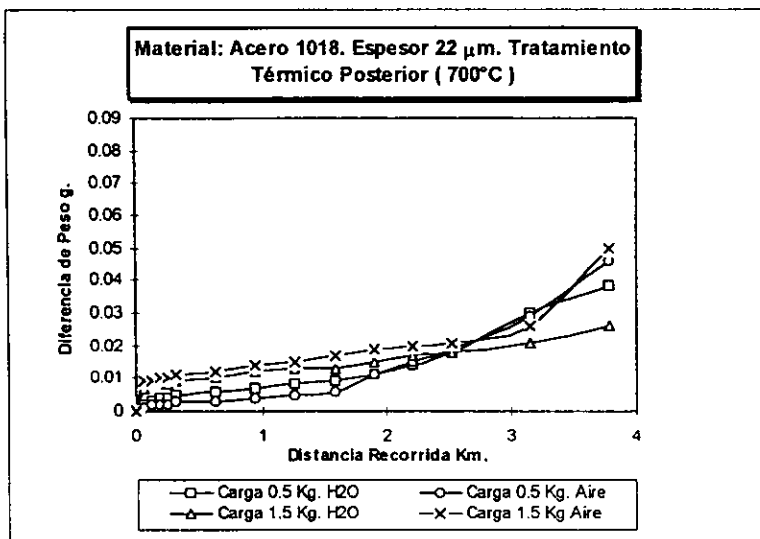
Gráfica 9. Perfil de desgaste del acero 1018 recubierto, con defecto desgastado con las diferentes cargas.



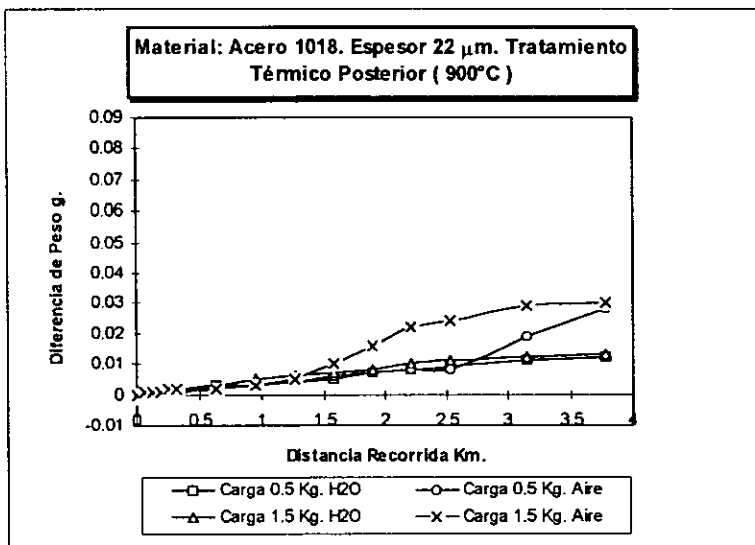
Gráfica 10. Perfil de desgaste del acero 1018 recubierto, desgastado con las diferentes cargas.



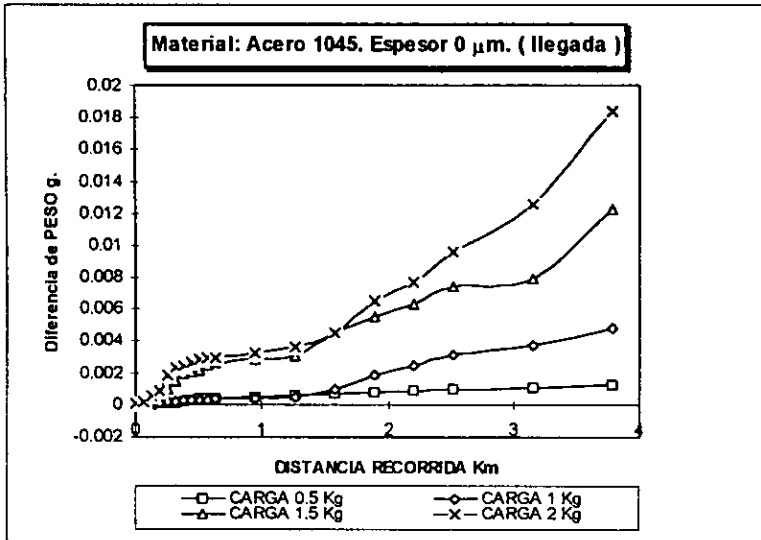
Gráfica 11. Perfil de desgaste del acero 1018 con tratamiento térmico posterior con recubrimiento, desgastado con las diferentes cargas.



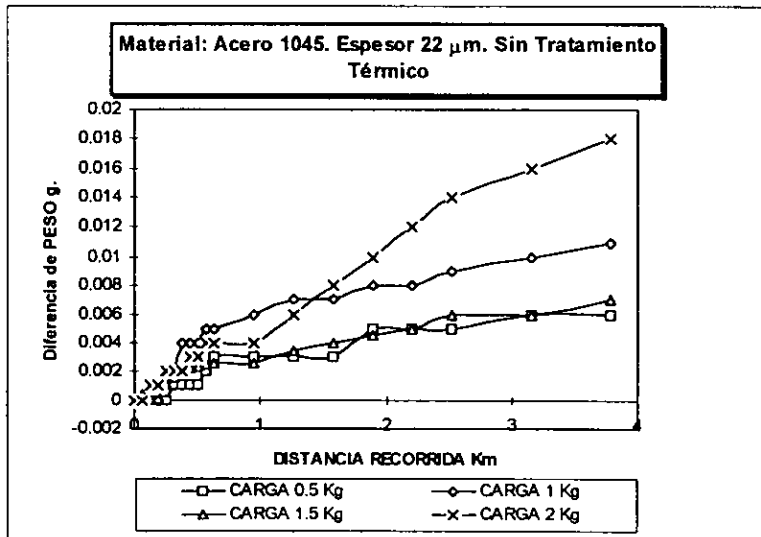
Gráfica 12. Perfil de desgaste del acero 1018 con tratamiento térmico posterior con recubrimiento, desgastado con las diferentes cargas.



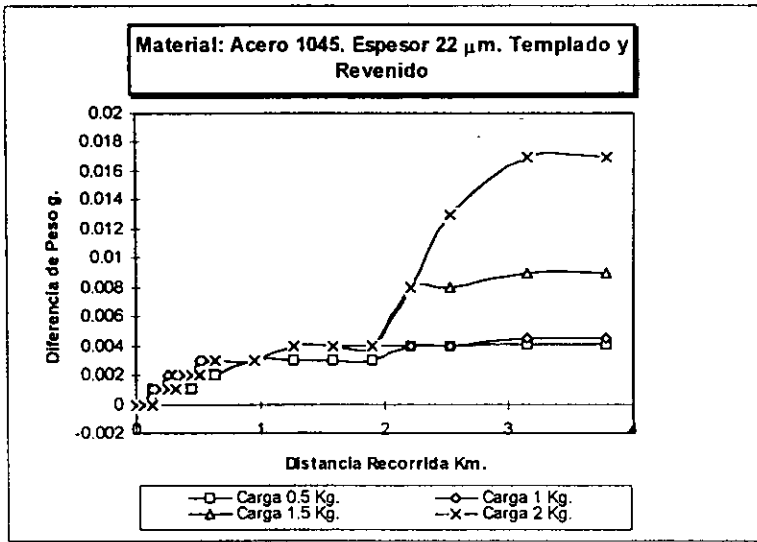
Gráfica 13. Perfil de desgaste del acero 1018 con tratamiento térmico posterior con recubrimiento, desgastado con las diferentes cargas.



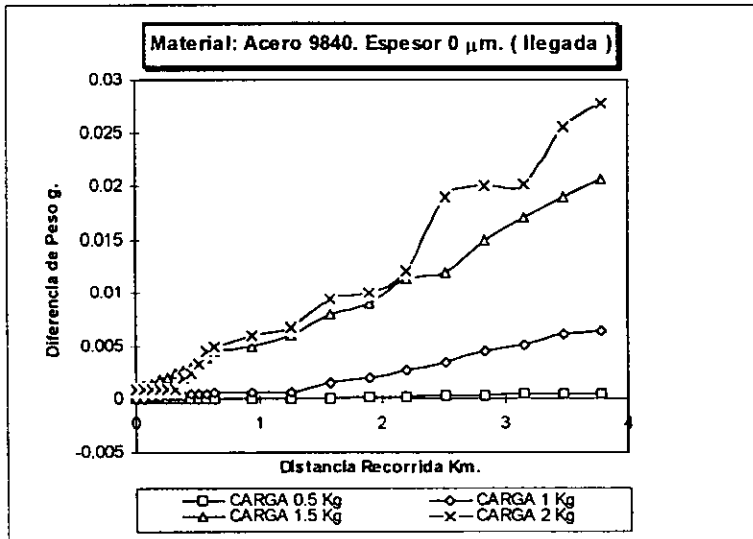
Gráfica 14. Perfil de desgaste del acero 1045 sin tratamiento térmico sin recubrimiento, desgastado con las diferentes cargas.



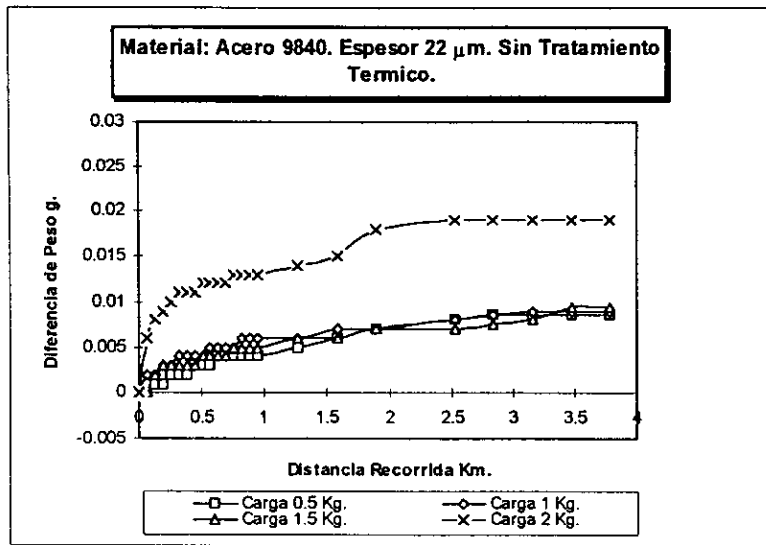
Gráfica 15. Perfil de desgaste del acero 1045 sin tratamiento térmico con recubrimiento, desgastado con las diferentes cargas.



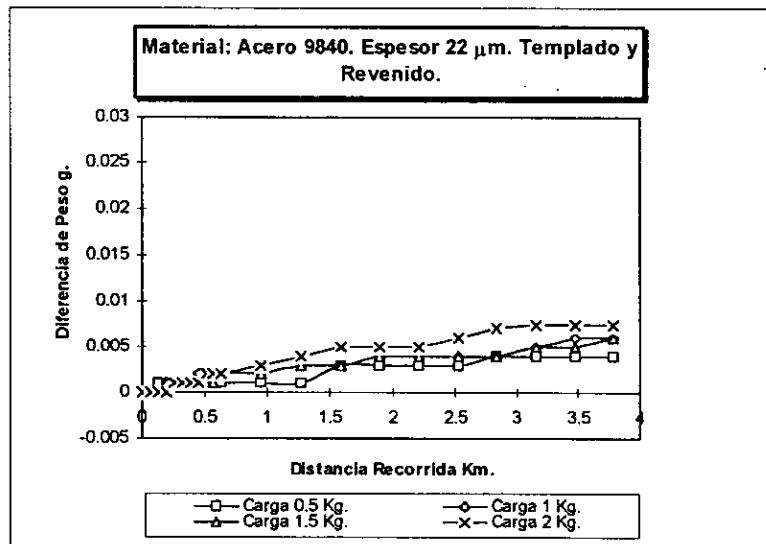
Gráfica 16. Perfil de desgaste del acero 1045 con tratamiento térmico con recubrimiento, desgastado con las diferentes cargas.



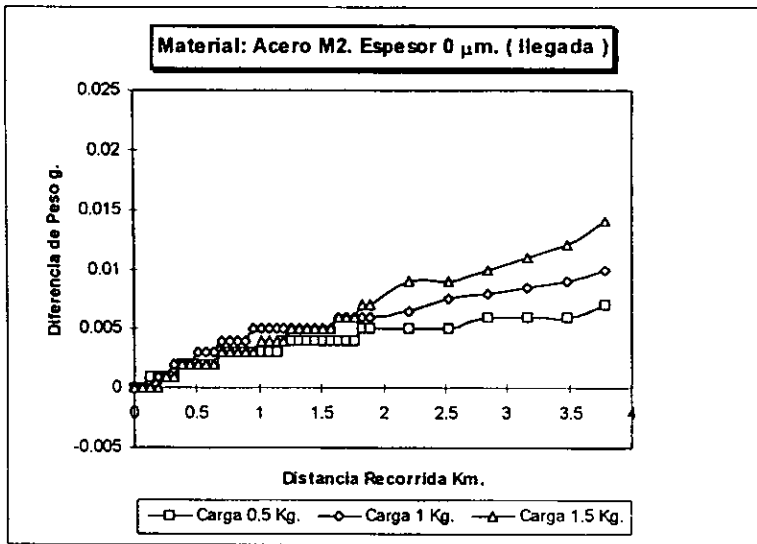
Gráfica 17. Perfil de desgaste del acero 9840 sin tratamiento térmico sin recubrimiento, desgastado con las diferentes cargas.



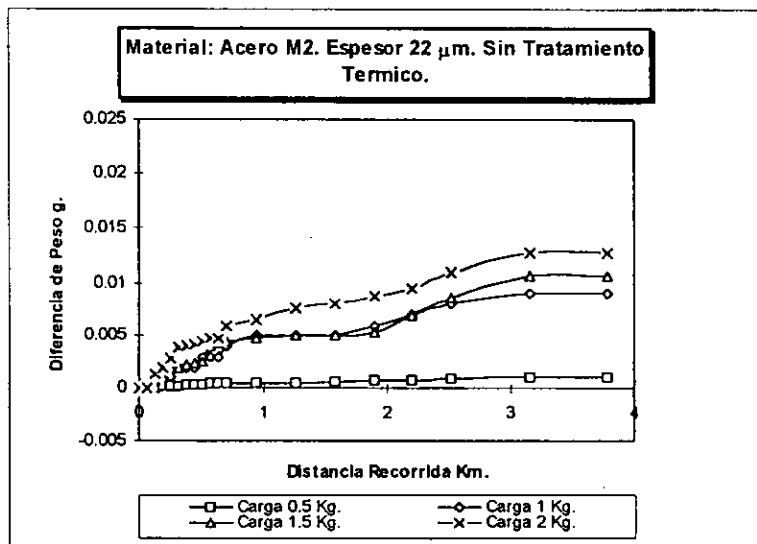
Gráfica 18. Perfil de desgaste del acero 9840 sin tratamiento térmico con recubrimiento, desgastado con las diferentes cargas.



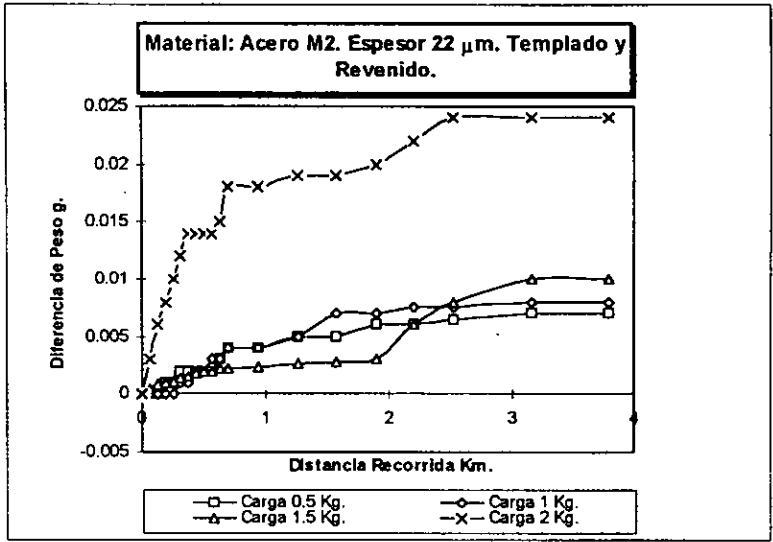
Gráfica 19. Perfil de desgaste del acero 9840 con tratamiento térmico con recubrimiento, desgastado con las diferentes cargas.



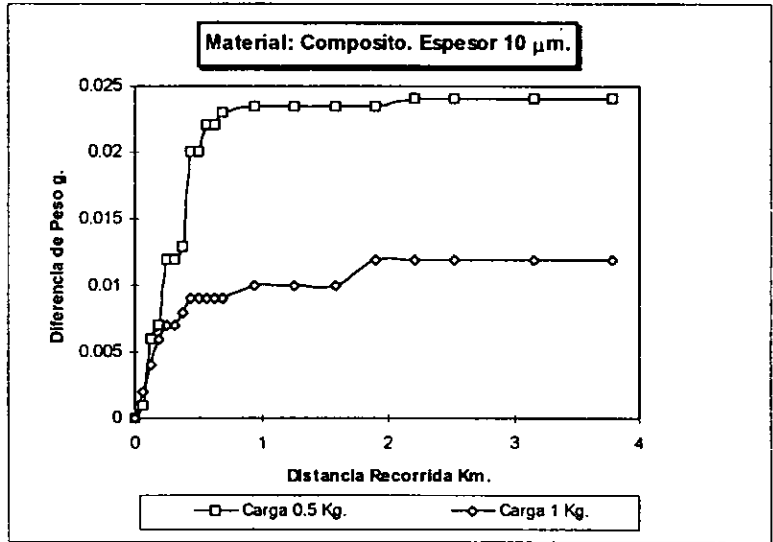
Gráfica 20. Perfil de desgaste del acero M2 sin tratamiento térmico sin recubrimiento, evaluado con las diferentes cargas.



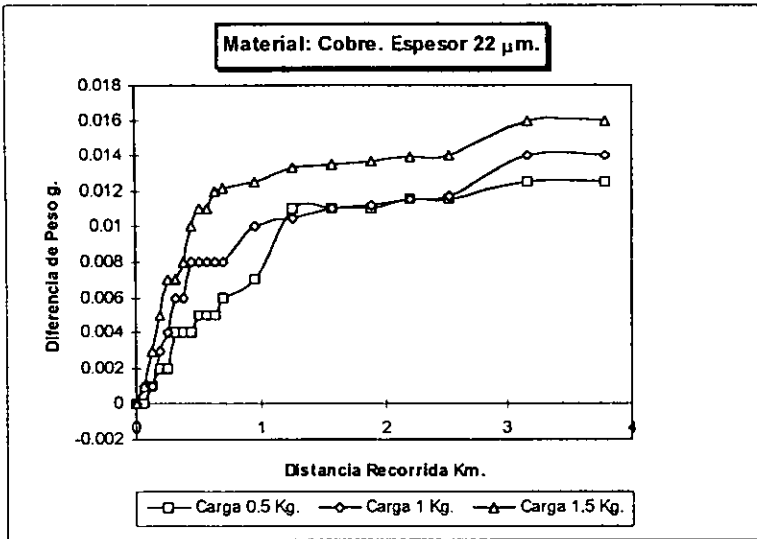
Gráfica 21. Perfil de desgaste del acero M2 sin tratamiento térmico con recubrimiento, evaluado con las diferentes cargas.



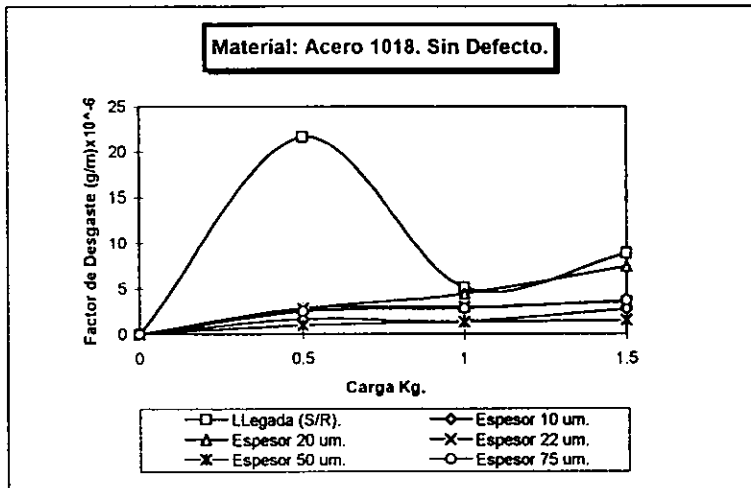
Gráfica 22. Perfil de desgaste del acero M2 con tratamiento térmico con recubrimiento, evaluado con las diferentes cargas.



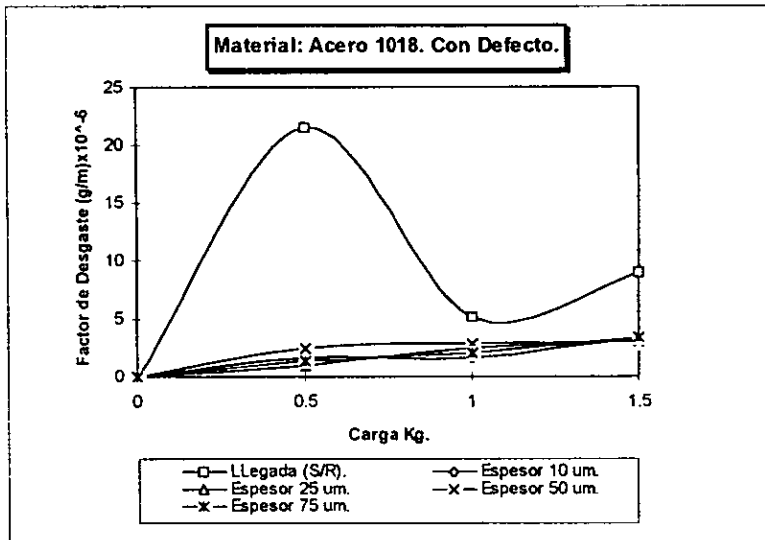
Gráfica 23. Perfil de desgaste de compósito sin tratamiento térmico con recubrimiento, evaluado con las diferentes cargas.



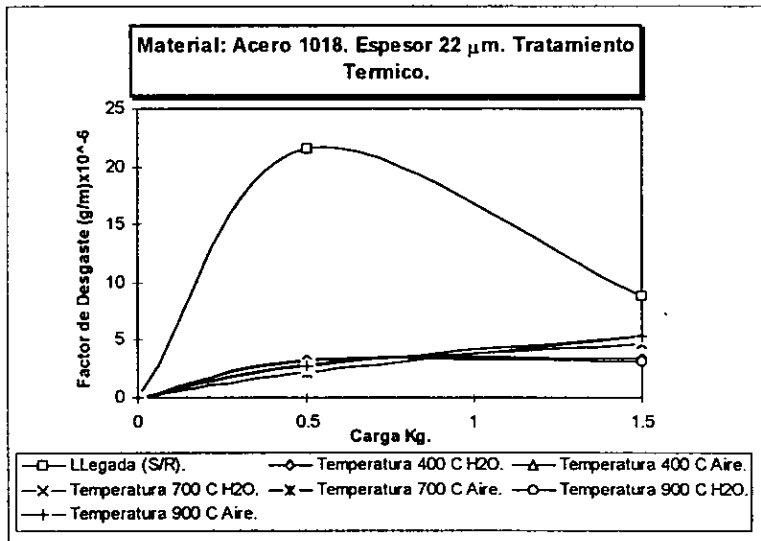
Gráfica 24. Perfil de desgaste de cobre sin tratamiento térmico con recubrimiento, evaluado con las diferentes cargas.



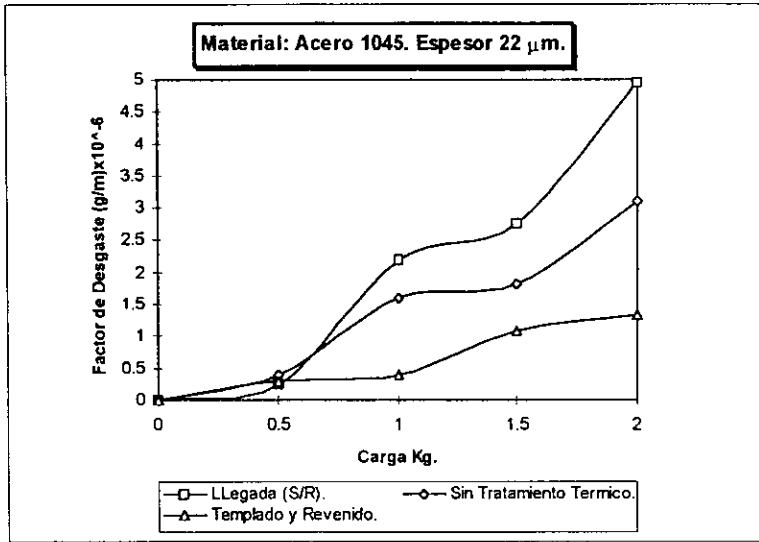
Gráfica 25. Factor de desgaste vs. Carga de acero 1018 sin tratamiento térmico sin defecto con recubrimiento.



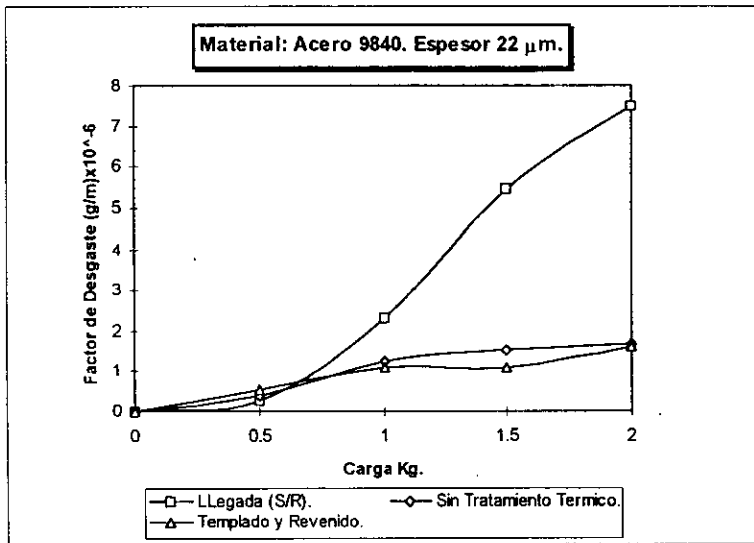
Gráfica 26. Factor de desgaste vs. Carga de acero 1018 sin tratamiento térmico con defecto con recubrimiento.



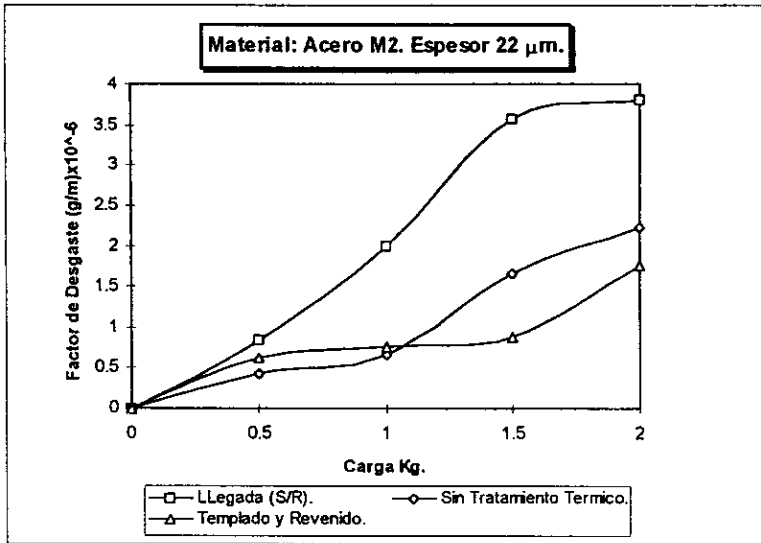
Gráfica 27. Factor de desgaste vs. Carga de acero 1018 con tratamiento térmico con recubrimiento.



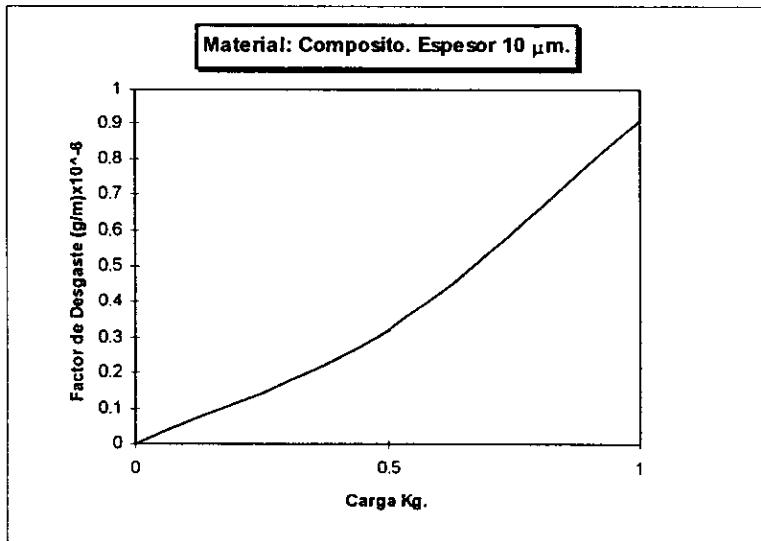
Gráfica 28. Factor de desgaste vs. Carga de acero 1045 sin recubrimiento, sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico recubierto.



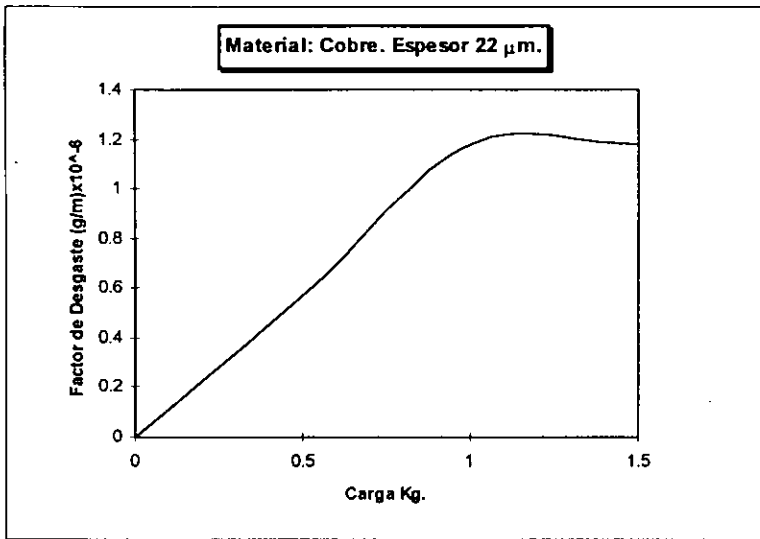
Gráfica 29. Factor de desgaste vs. Carga de acero 9840 sin recubrimiento, sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico recubierto.



Gráfica 30. Factor de desgaste vs. Carga de acero M2 sin recubrimiento, sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico recubierto.



Gráfica 31. Factor de desgaste vs. Carga de compósito con recubrimiento, sin tratamiento térmico.



Gráfica 32. Factor de desgaste vs. Carga de cobre con recubrimiento, sin tratamiento térmico.



Figura 4.1. Micrografía de la superficie de un acero 1045 recubierto, desgastado con una carga de 0.5 Kg. En la que se observa una delaminación granular (región A), un agrietamiento continuo (región B) y una formación de surcos de desgaste brillante (región C).

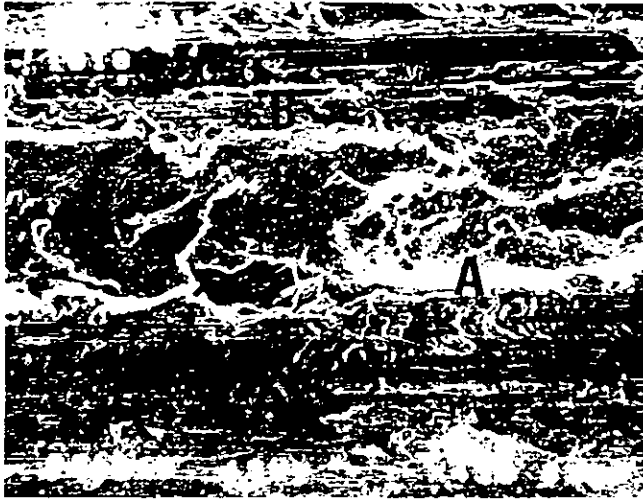


Figura 4.2. Micrografía de la superficie de un acero 1018 recubierto, desgastado con una carga de 0.5 Kg. En la que aparece una delaminación granular (región A), un agrietamiento continuo (región B) y la formación de cráteres superficiales no muy profundos (región D).



Figura 4.3. Micrografía de cobre electrolítico recubierto, desgastado con una carga de 0.5Kg. En la que se observa una delaminación granular (región A).

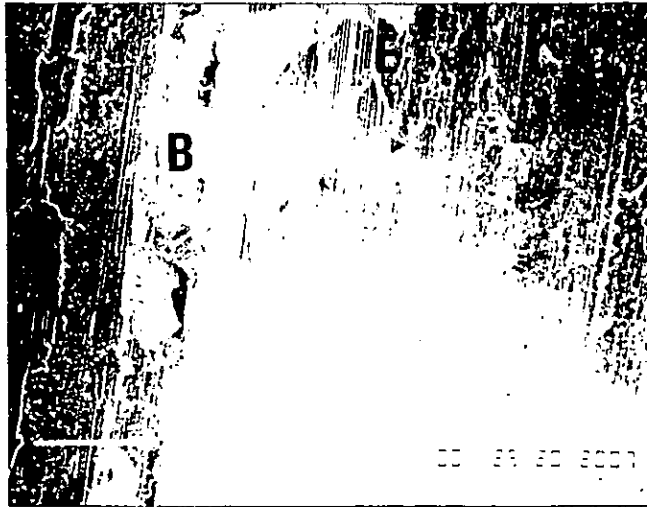


Figura 4.4. Micrografía de la superficie de un acero 9840 recubierto, desgastado con una carga de 1.5 Kg. En la que aparece un agrietamiento continuo (región B) y placas inclinadas formadas por corte (región E).

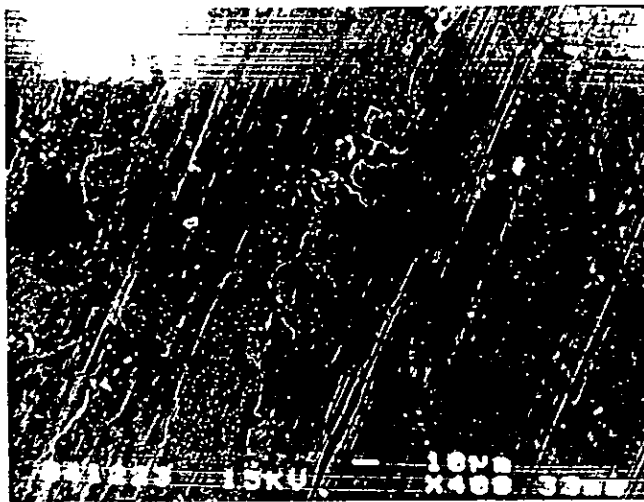


Figura 4.5. Micrografía de un acero 1045 recubierto, desgastado con una carga de 1.5 Kg. En la cual se observa un agrietamiento continuo (región B) y la formación de surcos de desgaste brillante (región C).

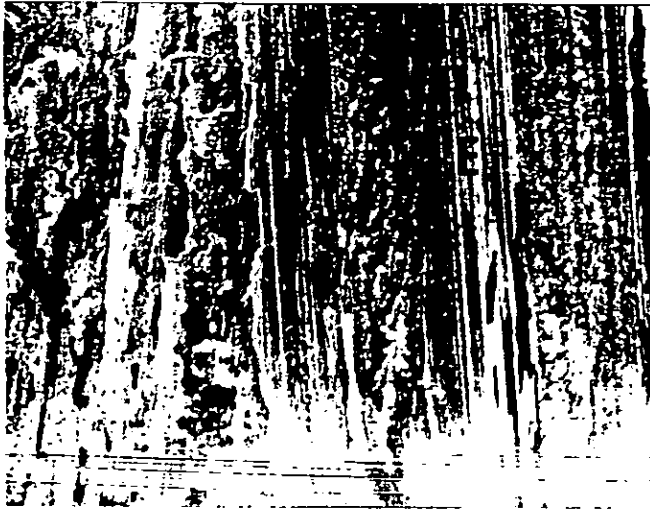


Figura 4.6. Micrografía de la superficie de un acero M2 recubierto, desgastado con una carga de 2.0 Kg. En la que se observa la aparición de placas inclinadas formadas por corte (región E).

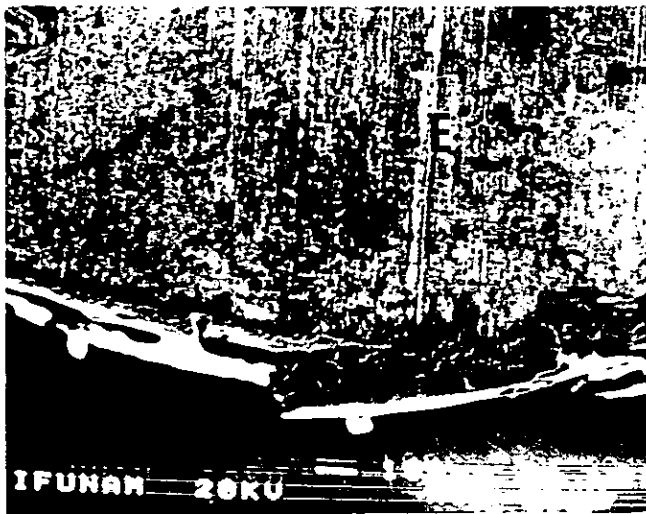


Figura 4.7. Micrografía de un acero 1018 recubierto, desgastado con una carga de 2.0 Kg. En la que se observan placas inclinadas formadas por corte (región E).



Figura 4.8. Morfología de las partículas desprendidas del depósito en un acero 1018 a 460X. En la cual se observan surcos de desgaste brillante y la generación de partículas muy brillantes (región C).



Figura 4.9. Morfología de los polvos presentados en el proceso de desgaste a 100X. En la que encontramos surcos de desgaste brillante y la generación de partículas muy brillantes (región C), en donde la textura de los polvos es muy fina.

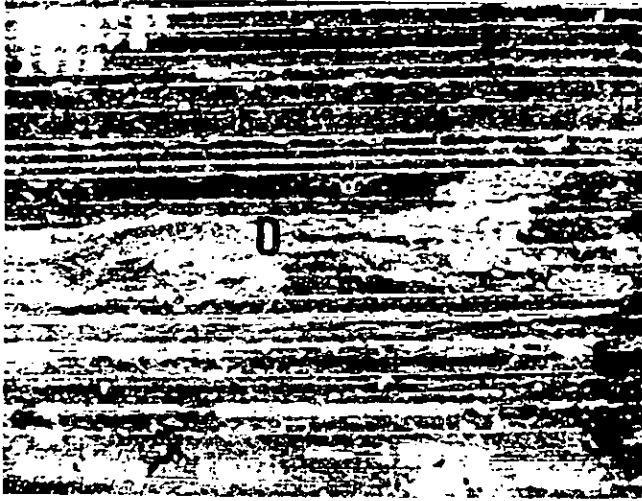


Figura 4.10. Micrografía de un acero 1018 recubierto, desgastado con una carga de 2 Kg. En la cual se observan cráteres superficiales no muy profundos (región D).

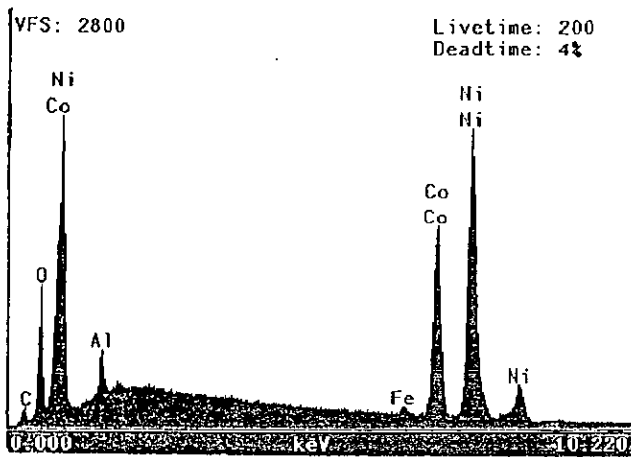


Figura 4.11. Microanálisis de los polvos recolectados en el ensayo de desgaste en el MEB, presentando principalmente la presencia de oxígeno.

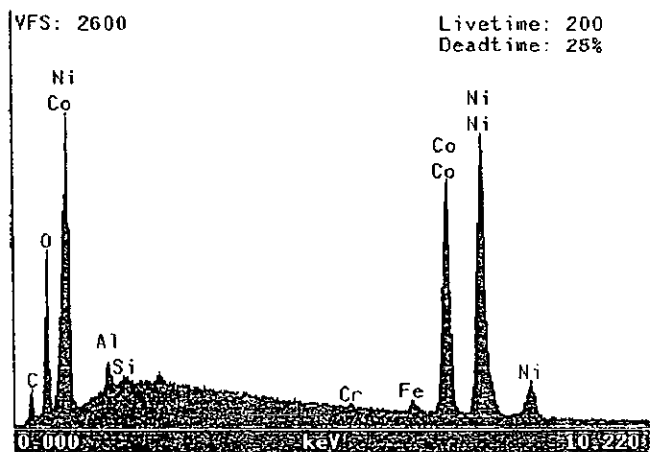


Figura 4.12. Microanálisis de los polvos recolectados en el ensayo de desgaste en el MEB, presentando principalmente la presencia de oxígeno.

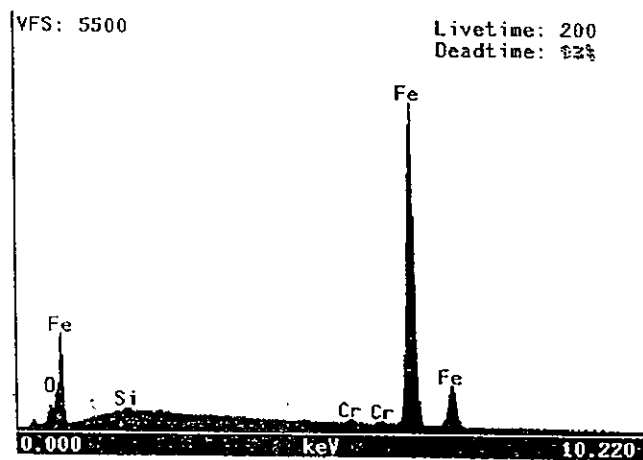


Figura 4.13. Microanálisis de los polvos recolectados en el ensayo de desgaste en el MEB, mostrando la ausencia casi total de oxígeno.

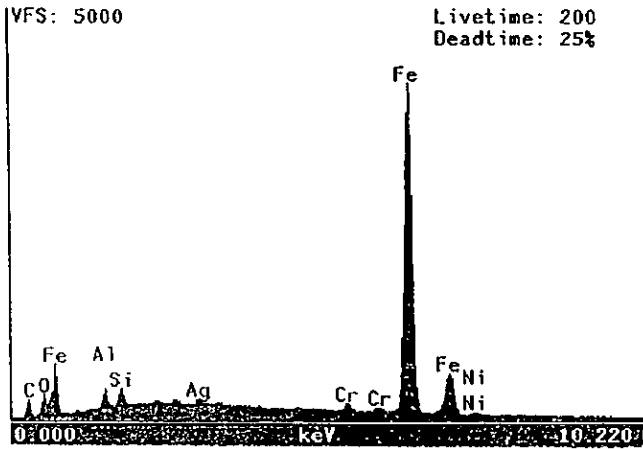


Figura 4.14. Microanálisis de los polvos recolectados en el ensayo de desgaste en el MEB, mostrando la ausencia casi total de oxígeno.

CAPITULO 4

ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

4.1 Determinación del espesor óptimo de recubrimiento.

Para la determinación del espesor óptimo se trabajó con un acero comercial de bajo carbono (1018); con lo cual se contó con dos grupos de recubrimientos, sin defecto y con defecto, el cuál se refiere a una porosidad mostrada por el recubrimiento, durante el proceso de aplicación. Para lo cual se manejaron dos variables, espesor y carga aplicada, el primero consiste en espesores de 10 μm , 20 μm , 25 μm , 50 μm , 75 μm . Para la segunda variable las cargas fueron 0.5 Kg, 1 Kg, 1.5 Kg.

Primeramente se analizó el grupo de gráficas sin defecto, el cual consiste de tres probetas de un mismo espesor a tres diferentes cargas, por lo que se trabajó con un total de 12 probetas.

- En la gráfica 1 se muestran las pruebas realizadas a diferentes cargas, en probetas de acero 1018 sin recubrimiento, la cual nos permite observar que la carga es directamente proporcional a la pérdida de peso, esto es; conforme se incrementa la carga en las muestras la pérdida de peso se incrementa, lo cual es muy notorio principalmente para la carga de 1.5 Kg, en donde se observa como la curva presenta un valor de pérdida de peso de 0.08 g, en comparación a los de 1 Kg y 0.5 Kg en las cuales las curvas tiene un comportamiento semejante.
- En la gráfica 2 se observa un comportamiento de desgaste inicial muy severo para las tres cargas, el cual consiste de 0.003 g para 0.5 Kg, 0.012 g para 1 Kg y 0.025 g para 1.5 Kg respectivamente, no existe variación después de dicho punto, esto es, la pendiente

muestra una tendencia creciente en todo el recorrido hasta los 4 Km, presentado un comportamiento normal.

- Para la gráfica 3 se pueden observar variaciones en las pendientes de las tres diferentes curvas, en donde resalta que en la curva de 1.5 Kg el comportamiento es constante para la diferencia de peso, en tanto que para las curvas de 0.5 Kg y 1 Kg presentan un desgaste inicial no muy severo, para después aumentar la diferencia de peso conforme se aumenta la distancia recorrida. Esta gráfica muestra una tendencia homogénea en las tres curvas presentes sin observar ningún punto de convergencia o de traslape en ninguno de los puntos de las tres diferentes cargas.
- Para la gráfica 4 los valores de pérdida de peso se dispararon en sus tres cargas aplicadas alcanzando valores hasta de 0.08 g para 1.5 Kg, de 0.04 g para 1 Kg y de 0.025 g para 0.5 Kg; respectivamente, cabe resaltar que en la gráfica 3 el valor máximo de pérdida de peso no alcanza el valor de 0.03 g.
- Para la gráfica 5 se mantuvo el incremento de la pérdida de peso, pero no tan marcada como en la gráfica anterior, dando como resultado un valor máximo de 0.05 g. (en 1.5 Kg de carga), se mostró una alteración en la tendencia en la carga de 0.5 Kg, ya que ésta presenta mayor pérdida de peso (0.04 g), en tanto que la carga de 1 Kg rebasa ligeramente el 0.045 g de pérdida de peso.

Para el segundo grupo las probetas con defecto (porosidad) muestran los siguientes resultados.

- Para la gráfica 6 (con defecto) se observa un desgaste inicial similar, en las diferentes cargas, el cual se presenta al recorrer una distancia de 0.06 Km. posteriormente se tienen variaciones de pendiente a medida que rebasa esta distancia, esto es, directamente

proporcional, ya que al aumentar la carga aumenta la pérdida de peso; teniendo valores de pérdida de peso de 0.0095 g (0.5 Kg), 0.019 g (1 Kg), 0.033 g (1.5 Kg).

- Para la gráfica 7 (con defecto) el desgaste inicial en las probetas es el mismo, al recorrerse una distancia de 0.025 Km, a partir de este punto se observa un incremento marcado en la pérdida de peso de la carga de 1 Kg, en el rango de 0.025 Km a 0.18 Km, en el cual la pendiente es mayor, que para la carga de 1.5 Kg, posteriormente tienen un punto de convergencia (0.0185 g vs. 0.18 Km), a partir del cual la tendencia vuelve a ser directamente proporcional. (esto es, que al incrementarse la carga aumenta la pérdida en peso).
- En la gráfica 8 (con defecto) no presenta un desgaste inicial homogéneo en las tres probetas, en esta etapa la pérdida de peso aumentó considerablemente hasta alcanzar valores de 0.015 g (0.5 Kg), 0.032 g (1 Kg), y 0.039 g (1.5 Kg) respectivamente; observando así que no favorece aumentar el espesor de las probetas recubiertas.
- En la gráfica 9 (con defecto) no presenta similitud en desgaste inicial, el espesor de 75 μm no mejoró la propiedad al desgaste, ya que se tuvo mayor pérdida de peso, en particular en la carga de 1.5 kg, en este espesor se presentó una pendiente muy pronunciada en el desgaste inicial, llegando a un valor de pérdida de peso de 0.033 g a una distancia de 0.245 Km.

Analizando el conjunto completo de muestras con defecto. Se puede observar que para este caso, el espesor óptimo de recubrimiento (Ni-Co-B) esta dentro de las $10\mu\text{m}$; el cual alcanzó un valor máximo de pérdida de peso de 0.023 g (1.5 Kg.) comparativamente con el resto de las gráficas (con defecto).

4.1.1 Justificación del espesor óptimo.

Del análisis anterior se desprende que la determinación del espesor óptimo de recubrimiento, se encuentra dentro del rango de $10\ \mu\text{m}$ – $25\ \mu\text{m}$; esto se consideró a partir de los resultados obtenidos del grupo de muestras que mostraron un defecto de porosidad y sin él. Del análisis se determinó que el espesor óptimo a ser considerado en los subsecuentes substratos sin defecto, utilizados en el presente trabajo es de $22\ \mu\text{m}$.

4.2 Efecto de la carga en el acero 1018 (sin recubrimiento y con recubrimiento)

Para llevar a cabo el análisis en el acero 1018 y discutir el efecto que la carga le produce se hará referencia a la gráfica 1 analizada en la sección anterior; esta gráfica corresponde al mismo acero (1018) en la condición de llegada sin recubrimiento.

- Para la carga de 0.5 Kg se observa que las pendientes mostradas en las dos gráficas 1 y 10 son muy semejantes, esto es, para una distancia recorrida de 4 Km y una pérdida de peso de aproximadamente 0.03 g no se encontró cambio alguno en las respectivas pruebas de desgaste.
- Para la carga de 1 Kg se observa en la gráfica 1 que el desgaste inicial es de tipo lineal en el intervalo de 0 a 1 Km de distancia recorrida y a una diferencia de peso de 0.018 g, en tanto que para la gráfica 10 existe un desgaste severo en 0.2 Km de distancia recorrida y a una diferencia de peso de 0.01 g denotando que después de este punto la pendiente es menor hasta 1 Km de distancia recorrida y 0.015 g.
- Para la carga de 1.5 Kg es notorio el cambio de pendiente, ya que para la gráfica 1 se presenta un desgaste inicial muy marcado reportando valores de pérdida en peso de 0.028 g a una distancia recorrida de 0.7 Km, en tanto que para ese mismo punto en la gráfica

10, la diferencia de peso reportada fue menor, registrando un valor de 0.02 g a 0.7 Km de distancia recorrida, después de este punto existe un cambio de pendiente muy marcado, posterior a este punto notamos como mejoro la diferencia de peso con el recubrimiento comparando con la gráfica 1, en la cual el valor de diferencia de peso se dispara exageradamente, tomando valores de 0.085 g a una distancia recorrida de 4 Km, en tanto que para la gráfica 10 a un valor de 4 Km de distancia recorrida se reporta un valor de 0.04 g, con lo que el valor de diferencia de peso es más del doble en la gráfica 1 que en la gráfica 10.

4.3 Efecto del tratamiento térmico en el acero 1018 (recubierto).

Utilizando un tratamiento térmico de temple y recocido (agua y aire como medios de enfriamiento respectivamente) a las temperaturas de 400°C, 700°C y 900°C (estos se hicieron después de aplicar el recubrimiento); se obtuvieron las gráficas 11 (400°C), 12 (700°C) y 13 (900°C) con cargas de 0.5 Kg (agua y aire) y 1.5 Kg (agua y aire). Primeramente observando las curvas de 0.5 Kg en agua y aire a las temperaturas de 400, 700 y 900°C, podemos destacar que la que tuvo mejor propiedad al desgaste es la curva mostrada en la gráfica 13 (900°C en agua), en donde su comportamiento fue el siguiente; para una distancia recorrida de 3.8 Km. con una diferencia de peso de 0.0105 g, esto significa la menor pérdida de peso presentada hasta el momento en las gráficas. De lo anterior podríamos argumentar que es debido a la formación de una capa de óxido, formada por el recubrimiento cuando se sometió al tratamiento térmico con lo cual mejoro la propiedad al desgaste de dicho acero.

En segundo término para el tratamiento térmico de la carga de 1.5 Kg. a las mismas temperaturas y medios de enfriamiento, tenemos que nuevamente en la gráfica 13 (900°C en agua) su propiedad al desgaste fue la mejor, ya que si hacemos una transposición de las gráficas se observa que las de 900°C en agua quedan por debajo de todas las demás.

Ahora bien si comparamos la gráfica 10 con las gráficas 11, 12 y 13 , podemos observar que la gráfica 13 (900°C) presentó una apreciable menor pérdida en peso. Los valores de pérdida de peso fueron por debajo de 0.01 g con una distancia recorrida de 1.5 Km para la gráfica 13; en tanto que, para la gráfica 10 a esa misma distancia recorrida la pérdida de peso fue de 0.03 g.

4.4 Efecto del recubrimiento en un acero 1045

En el set de curvas de la gráfica número 14 (sin recubrimiento) se observa que al incrementarse la carga aplicada se incrementa la pérdida de peso en cada una de las probetas, en estas se observan claramente como los dos pares de curvas; de menor carga (0.5 Kg, 1 Kg), así como las de mayor carga (1.5 Kg, 2 Kg) presentan similitud en su desgaste inicial, ya que en los dos casos, el desgaste inicial termina al recorrer una distancia de 1.5 Km, para que cada curva después de este punto, adquiera una tendencia que es, que al aumentar la carga las pérdidas en peso son mayores.

Para el grupo de muestras de la gráfica número 15 (sin tratamiento térmico), no se presenta ningún comportamiento de desgaste inicial similar, las variaciones de los puntos de cada una de las gráficas son muy heterogéneos, por lo que se presenta una variación considerable de la pendiente en la parte estable de las curvas. En la carga de 1.5 Kg se abatió la diferencia de

peso, a comparación de las otras tres curvas, su tendencia es muy similar a la curva de 0.5 Kg, en donde presumiblemente la severidad del proceso de desgaste no es tan marcada.

Para el grupo de muestras de la gráfica 16 (con tratamiento térmico) el desgaste es menor en la etapa inicial comparativamente con la gráfica 15 (sin tratamiento térmico), el rango de la diferencia de peso disminuye, pero aun así, el comportamiento de las curvas en las diferentes cargas aplicadas es muy similar al de la gráfica 15. En donde al aumentar la carga aumenta la diferencia de peso, de igual manera el desgaste inicial presenta una similitud en variaciones, por lo que en este set se observa un comportamiento heterogéneo, por último para las cargas de 0.5 Kg. y 1 Kg, la pérdida de peso es casi la misma, lo cual hace que las curvas se confundan debido a su convergencia.

4.5 Efectos del recubrimiento en el acero 9840

El grupo de muestras de la gráfica 17 de llegada sin recubrimiento muestra que el desgaste inicial en las cargas de 0.5 Kg. y 1 Kg es el mismo hasta una distancia recorrida de 1.25 Km, así también sucede lo mismo con las cargas de 1.5 Kg y 2 Kg, pero aquí su desgaste inicial termina en 0.7 Km, para que después cada curva presente su propio comportamiento independiente.

Es de resaltar que la carga de 0.5 Kg presentó un desgaste prácticamente nulo. Las tres cargas restantes no presentan una pérdida de peso muy marcada, aún cuando la distancia a la que se llevó fue de 4 Km. La máxima pérdida tan solo fue de 0.027 g, para una carga de 2 Kg.

Para la gráfica 18 con recubrimiento se observa que la curva de 2 Kg presenta un desgaste inicial muy severo para una distancia de 1 Km, comparado con las cargas de 0.5 Kg, 1 Kg y 1.5 Kg, en las cuales su valor de desgaste inicial es la mitad del desgaste inicial de la carga de 2 Kg. El perno para la carga de 1.5 Kg favorece la propiedad al desgaste ya que su máxima pérdida de peso es de 0.007 g, aún cuando se tienen varias convergencias entre las curvas de 0.5 Kg, 1 Kg y 1.5 Kg, es claro que para la última carga la pérdida de peso permanece constante hasta los 4 Km. Es importante mencionar que estas tres últimas curvas antes mencionadas pudieran dar buenos resultados para una cierta distancia predeterminada, como pudieran ser la de 2 Km ya que en este punto existe una convergencia.

Para la gráfica 19 con recubrimiento y tratamiento térmico se observa que el recubrimiento mejora notablemente su propiedad al desgaste con un tratamiento térmico, como es, en este caso. La mayor pérdida de peso alcanzada fue de 0.007 g para la carga de 2 Kg, cabe hacer mención que el comportamiento presentado por las cargas de 1 Kg y 1.5 Kg es el mismo, excepto en la distancia de 3.5 Km. Para la carga de 0.5 Kg su comportamiento es constante en toda su trayectoria recorrida no presentando variaciones considerables de pérdida de peso, manteniéndose siempre por debajo de las tres cargas restantes, es en esta curva donde se presenta la menor pérdida de peso para este set el cual fue de 0.0025 g, no se debe perder de vista que en este set las piezas (pernos) fueron tratados térmicamente antes de ser recubiertas.

4.6 Efectos del recubrimiento en el acero M 2.

Para la gráfica 20 es un perno que no fue recubierto electrolíticamente, esto es lo que llamamos, un material de llegada; en esta gráfica notamos que el desgaste inicial se comporta muy heterogéneo ya que presenta varias mesetas, esto es que la pendiente de las tres diferentes curvas cambian conforme aumenta la distancia recorrida, teniendo con esto varios punto de convergencia entre las tres cargas aplicadas de 0.5 Kg, 1 Kg, 1.5 Kg. En donde la carga que tuvo una menor pérdida de peso fue la carga de 0.5 Kg con 0.006 g y una distancia recorrida de 3.78 Km. Y la que mayor desgaste tuvo fue la carga de 1.5 Kg con 0.014 g y una distancia recorrida de 3.78 Km.

Para la gráfica 21 la pendiente que se muestra para la carga 0.5 Kg no muestra cambios bruscos en sus valores de diferencia de peso, en tanto que para las cargas de 1 Kg y 1.5 Kg existen varias convergencias en ciertos puntos de las pendientes, como son 0.2, 0.5, 0.8 y 2.2 Km por lo cual el valor de la pendiente para estas dos cargas es el mismo. Para la carga de 2 Kg se observa un desgaste inicial muy marcado para su posterior estabilidad en el punto (0.3 Km de distancia recorrida y 0.004 g de diferencia de peso) después de este punto presenta una meseta, hasta el punto (0.7 Km, 0.005 g), para posteriormente presentar una pendiente similar, a la de las cargas de 1 Kg y 1.5 Kg, pero con los valores de pérdida de peso ligeramente mayores.

Para la gráfica 22 en donde se ven los aceros M-2 desgastados con un templado y revenido y su posterior recubrimiento, podemos observar que para la carga de 2 Kg el desgaste inicial presenta un incremento considerable tan solo para los primeros 0.5 Km y con una diferencia de peso de 0.014 g este comportamiento es debido a defectos en el proceso de depositación , en tanto que para las cargas restantes de 0.5 Kg, 1 Kg y 1.5 Kg el desgaste inicial fue

menos severo ya que tan solo perdió menos de 0.002 g en tan solo 0.500 Km. Al perno que se le aplicó una carga de 1.5 Kg tuvo un comportamiento de mayor estabilidad en todo el proceso de desgaste; no debemos de olvidar que el de desgaste llevado a cabo en este proceso es en condiciones muy extremas y severas de desgaste por lo que lo hace ser que se considere que cada unas de las curvas presente menor diferencia de peso en una distancia recorrida de aproximadamente 4 Km.

4.7 Efectos del recubrimiento en sustratos no ferrosos (Cu y compuesto)

Para la gráfica 23 tenemos sustratos no ferrosos los que consisten de un compuesto de aluminio silicio(Al-7Si) con 10% Vol. de SiC, antes de hacer la descripción debemos hacer notar que tan solo se llevaron a cabo dos corridas, esto es, debido a la dificultad que presenta la muestra para ser recubierta. En la gráfica se observa que su comportamiento entre la carga y la diferencia de peso es inversamente proporcional, ya que para la carga menor el peso perdido es muy grande, en tanto que para la carga mayor la diferencia de peso es menor, en la gráfica los valores obtenidos para una carga de 0.5 Kg. la diferencia de peso es de 0.025 g en una distancia recorrida de 4 Km., mientras que para la carga de 1 Kg. la diferencia de peso fue de 0.01 g para una distancia recorrida de 4 Km, esta diferencia se debe a las condiciones de adherencia, ya que el electrodeposito de Ni-Co-B presenta un valor de microdureza promedio de alrededor de 450 Hv y el sustrato mostró un valor de alrededor de 50-60 HB, existiendo una incompatibilidad muy marcada entre ambas fases.

Para la gráfica 24 en la cual se tiene un sustrato no ferroso (Cu electrolítico) se observa un comportamiento en las tres diferentes cargas manejadas en la región de desgaste inicial muy similar. A partir de 1 Km. de distancia recorrida sus pendientes empiezan a cambiar

considerablemente; la diferencia de peso es notoria ya que la dureza del perno no es lo suficientemente favorable para el recubrimiento, por lo que se observa un desprendimiento considerable del electrodepósito, esto es, la diferencia de peso es directamente proporcional con la carga aplicada.

4.8 Descripción del factor de desgaste vs. carga aplicada.

A estos tipos de factores se les denomina factores de desgaste en equilibrio que son derivados cuando la etapa inicial se logra y se establece un equilibrio topográfico. Siendo el factor de desgaste la relación existente entre el material que ha sido desprendido por medio de la fricción y la distancia en que se ha mantenido en contacto con las superficies expuestas a tal fenómeno. En la literatura se ha establecido y aceptado que durante el desgaste adhesivo, un patrón que frecuentemente se manifiesta es el siguiente: 1) Una región de poco desgaste que se le ha denominado "régimen de desgaste ligero" (no severo), 2) una región denominada "desgaste de transición" y 3) una región en donde el desgaste es elevado y se le conoce como "régimen de desgaste severo", el cual siempre esta precedido por los dos anteriores.

La gráfica 25 muestra los resultados del acero 1018 (sin defecto). En la cual se observa una región de poco desgaste, esto es, un desgaste ligero, ya que los órdenes de magnitud no cambian con la carga aplicada de manera considerable para ninguno de los diferentes espesores manejados, no presentándose una región de desgaste severo.

En la gráfica 26 se muestran los resultados del acero 1018 (con defecto). Este set de gráficas presenta una particularidad con respecto a la anterior, observándose órdenes de magnitud por debajo de 5×10^{-6} (g/m) para los cuales se tiene un patrón de desgaste no severo y de

transición poco marcado. No se debe de perder de vista que el recubrimiento presentó defectos al depositarse sobre el sustrato; para lo cual no se tiene control alguno de este problema.

En la gráfica 27 se muestran los resultados del acero 1018 con tratamiento térmico (después del recubrimiento), presentándose cambios en el orden de magnitud cuando se le aplica una carga de 0.8Kg. es aquí en donde termina la región de desgaste ligero y empieza un cambio de pendiente para dar paso a una región de transición, manteniéndose constante para los aceros que fueron tratados térmicamente a una temperatura de 400°C y 900°C (medio de enfriamiento: H₂O) y 400°C (medio de enfriamiento: Aire). Estas curvas logran una estabilidad entre el desgaste no severo y el desgaste de transición.

En la gráfica 28 se muestran los resultados de un acero 1045 (de llegada sin tratamiento y templado y revenido). Se observa como este acero presenta un comportamiento no severo hasta una carga de 0.6 Kg., en tanto que al incrementarse la carga, el valor de la magnitud para el de llegada y sin tratamiento térmico se incremento, mientras que para el templado y revenido no se presento un incremento en su magnitud; para este no se muestra un desgaste severo, ya que permanece constante su comportamiento hasta una carga de 2 Kg.

Para la gráfica 29 se muestran los resultados de un acero 9840. En esta gráfica no se observa ninguna variación en el orden de magnitud, ya que es muy despreciable la diferencia que existe entre los set de pernos con tratamiento y sin tratamiento; esto es, presenta la mejor afinidad del sustrato con el recubrimiento, esto lo podemos avalar con el set de probetas de llegada, el cual muestra un gran cambio en los ordenes de magnitud a partir de una carga de 1 Kg. presentando las tres etapas de desgaste, no severo, transición y desgaste severo.

En la gráfica 30 se presentan los resultados del acero M2. La curva mostrada no presenta una transición marcada de un régimen a otro, sin embargo se puede observar que los factores de desgaste para este acero son sensiblemente mayores en relación a los aceros 4140 y 9840. Por esto podemos decir que presenta una afinidad sobre el electrodeósito de Ni-Co-B y con esto se puede decir que mejora la propiedad al desgaste.

En la gráfica 31 y 32 las cuales constan de materiales no ferrosos: Cu y Compósito. Se observa que el factor de desgaste es directamente proporcional a la carga aplicada, y únicamente se tiene una transición de no severo a severo, ya que no se cuenta con otro número considerable de sets; esto como consecuencia de los problemas que se tienen al recubrir dichos substratos, los cuales no presentan buena adherencia del recubrimiento.

4.9 Características topográficas.

La presente sección tiene que ver con las superficies desgastadas de los pernos, así como de las rebabas recolectadas, que se examinaron mediante microscopía electrónica de barrido.

Las características que fueron observadas en diversos pernos aparecieron de manera recurrente, independientemente del tipo de acero y/o condiciones de desgaste. Esto quiere decir que existen diversos mecanismos que están interactuando durante el desarrollo del proceso de desgaste en la morfología de la superficie.

Una característica común encontrada, es la conocida como **delaminación granular**. El término granular es por que después de que aparecen estos regímenes de desgaste, las capas superiores se separan del material, ejemplos típicos se muestran en las figuras 4.1, 4.2 y 4.3.

En nuestros experimentos fue encontrada muy frecuentemente, lo que hace estar de acuerdo con los siguientes autores⁽⁵³⁾, este fenómeno está asociado con regímenes de desgaste no severo.

En las figuras 4.1, 4.2, 4.4 y 4.5 aparece una característica denominada agrietamiento continuo alrededor de los bordes del material que rodea los cráteres formados.

En las etapas iniciales de desgaste adhesivo el régimen de desgaste que predomina es severo y algunas de las características reportadas indican la aparición de surcos de desgaste brillante y la generación de partículas muy brillantes, figuras 4.1, 4.5, 4.8 y 4.9.

La formación de capas de óxido depende de las condiciones de deslizamiento, las cuales pueden variar y probablemente cambiar el óxido presente a otro tipo de óxido.

Estos cambios afectan las características del desgaste, por ejemplo, el cambio en la transición del desgaste a un determinado orden de magnitud que está relacionado con el cambio de tipo de óxido Fe_3O_4 a FeO ⁽⁵⁴⁾, en ambas figuras aparecen partículas como aglomerados de tamaño bastante pequeñas.

Las películas que se forman pueden ser coherentes o protectoras y pueden fallar cuando hay una combinación de esfuerzos (normales y tangenciales).

Otra característica encontrada fue la observada en las figuras 4.2 y 4.10 que presentan características asociadas. Los cráteres superficiales no muy profundos con una base lisa fueron encontrados a cargas mayores indicando que la deposición de material probablemente sucede después de que la falla inicial y el deslizamiento continuo de las superficies.

A otra característica se le ha descrito como placas inclinadas formadas por corte, se observan a cargas altas y a la manifestación de un flujo plástico que es evidente, siendo estas

las que pueden representar a las muestras que tienen valores de resistencia más baja, existe un mecanismo continuo de corte, en esta característica se ha reportado⁽⁵³⁾ que existe un mecanismo continuo de corte, y también se indica que éste solo fue observado en deformación plástica bastante alta. Las muestras en donde aparecen estas características se observan en las figuras 4.4, 4.6 y 4.7 podemos decir que esta característica puede estar relacionada como la principal manifestación morfológica en regímenes de desgaste severo reportado en las curvas de desgaste.

Para complementar el estudio de caracterización morfológica se realizaron microanálisis por medio de la microscopía electrónica de barrido a los polvos recolectados en los correspondientes ensayos.

Las figuras 4.11 y 4.12 representan el microanálisis de los polvos mostrados en la figura 4.9, en donde la textura de los polvos es muy fina, de tal forma que el espectro generado a partir de estos polvos, indica la presencia de un pico de oxígeno con intensidad bastante considerable, acompañado de los elementos de aleación tanto del electrodepósito, como del sustrato.

Por otra parte las figuras 4.13 y 4.14 presentan el microanálisis realizado sobre las partículas desprendidas en el proceso de desgaste mostrado en las micrografías de la figura 4.8; en la cuál es notoria la disminución de la intensidad del pico de oxígeno, presentando además la presencia de los elementos de aleación del sustrato, este espectro indica que el mecanismo de desgaste que actúa en el proceso es totalmente abrasivo. Puesto que la morfología y tamaño de partículas es totalmente diferente en comparación con el tamaño de los polvos mostrado en la figura 4.9 que es de aproximadamente de 20 a 50 μm , y para las partículas de la figura 4.8 que su tamaño es de aproximadamente de 90 a 120 μm .

CAPITULO 5

CONCLUSIONES

- 1.- Las probetas recubiertas (con defecto y sin defecto) presentaron mejores propiedades al desgaste que las que no fueron recubiertas.
- 2.- Los mejores resultados para determinar el espesor óptimo de recubrimiento estuvieron dentro de un rango de 10 μm a 25 μm .
- 3.- No es recomendable el uso de espesores mayores de 50 μm , ya que durante la prueba de desgaste se presentan dos problemas; el primero consiste en un empastamiento del recubrimiento tanto en el disco como en el perno y en segundo término una desfoliación del recubrimiento en la superficie expuesta.
- 4.- Los recubrimientos con defecto tuvieron un comportamiento aceptable para su desgaste inicial, pero estos defectos no pueden ser reproducidos de tal manera que nos asegure una uniformidad del defecto existente.
- 5.- Los recubrimientos de espesores mayores de 50 μm depositados en acero 1018 presentan una desfoliación muy marcada, esto es, la adherencia existente para este sustrato no fue la mejor en cargas mayores de 1 Kg.
- 6.- Las diferentes piezas que fueron tratadas térmicamente después de ser recubiertas en sustratos de acero 1018 (con la finalidad de difundir, y con esto permitir una mayor adherencia entre el sustrato y el recubrimiento) físicamente presentaron un cambio notable en apariencia tornándose negruzcas. Observando una notable mejoría en la propiedad al desgaste, particularmente cuando el tratamiento fue a los 400°C con enfriamiento en agua y aire y a los 900°C con enfriamiento en agua; se puede decir con esto, que se cree o se

presupone que hay una transformación de fase en el recubrimiento, lo cual probablemente lo haga tener una mayor resistencia al desgaste.

7.- Presentaron mejor resistencia al desgaste los aceros 9840 y M2 que los aceros, 1045 y 1018, según se observan en las gráficas de factor de desgaste vs. carga, para las dos primeras en donde el orden de magnitud es de 1.5×10^{-6} g/m y 1.8×10^{-6} g/m respectivamente, mientras que para los aceros 1045 de 5×10^{-6} g/m y para el 1018 es de 4.5×10^{-6} g/m, lo cual indica que en estas últimas pruebas el desgaste es mayor, en tanto que para las primeras la resistencia al desgaste se ve incrementada.

8.- Los sustratos no ferrosos no mejoraron su propiedad al desgaste con el recubrimiento, ya que el recubrimiento no presentó buena adherencia, debido a la poca dureza presentada por los sustratos, lo cual hacía que el recubrimiento se desprendiera rápidamente, y se depositara sobre el disco.

9.- Después de analizar los resultados se pueden dar parámetros para los cuales el recubrimiento da los mejores rendimientos; Estos parámetros son cargas menores de 1 Kg. y temperaturas de tratamiento no mayores de 400°C .

10.- Del estudio realizado por SEM donde se detectaron diversas características morfológicas así como de partículas desprendidas tales como: grietas transversales, delaminación del tipo granular, formación de surcos con la aparición de canales y partículas con gran deformación plástica asociados con los mecanismos de desgaste. Se desprende que diversos mecanismos interactúan durante el desarrollo del proceso de desgaste en la morfología de la superficie.

11.- La resistencia al desgaste se ve mejorada con la presencia de óxidos, los cuales se detectaron a través de microanálisis.

CAPITULO 6
BIBLIOGRAFIA

1. Tomlinson G. A. and Phil Mag; "Wear Mechanisms"; 1929; pag. 46, 905.
2. Vingsbo O; "Wear and Wear Mechanisms"; The American Society of Mechanics Engineering Wear of Materials; 1979; U.S.A.
3. Finkin E. F; "Speculations on the theory of adhesive wear"; Wear; 1972; Vol. 21; pag. 103.
4. Archard J. F; "Contac and Rubbing Flat Surfaces"; J. Appl. Phys; 1953; Vol. 24; pag. 981.
5. Sarkar A. D; "Wear of Metals"; Pergamon Press; 1976; Oxford.
6. Mancilla Prado J; "Electrodeposito de una aleación Pb-Cd a partir de percloratos de Pb-Cd"; Tesis; U. N. A. M.; Facultad de Química; México; 1988.
7. Lowenheim F. A; "Modern Electroplating"; 3ª. Edition; Jhon Wiley and Sons Inc; 1974; U. S. A.
8. Kenneth Graham A; "Electroplating Engineering"; Handbook; Van Nostrand Reinhold Co; 1971; New York.
9. Lowenheim F. A; "Electroplating Fundamentals of Surface Finishing"; Mc Graw-Hill Book Co; 1978; New York.
10. Lowenheim F. A; "Modern Electroplating"; John wiley & Sons. Inc; 1974; New York.
11. Lombs C. F; "Printed Circuits"; Handbook; Mc Graw-Hill; 1979; New York.
12. Bell, T; "A survey of de principles and practice of thermochemical treatments"; 1978. This conference; "Tribology in the eighty's"; April 1983; London U.K.

13. Edenhofer B., "Heat treatment of Metals"; 1974; pag. 1, 23-28 and 59-67.
14. Biddulph R. H., "The Boronising of Metals for Wear and Corrosion Resistance"; 1978.
This conference; "Tribology in the eighty's"; April 1983; London U.K.
15. Perry A. J.; "The Industrial Practice of Chemical Vapour Deposition"; 1978. This conference; "Tribology in the eighty's"; April 1983; London U.K.
16. Creed E. and Jowett; "The Chemical Vapour Deposition of Wear Resistant Tungsten Carbide Coatings on Extrusion Dies"; 1978. This conference; "Tribology in the eighty's"; April 1983; London U.K.
17. Maissel L. I. and Glang R; (edit) , "Handbook of Thin Film Technology"; McGraw Hill Inc. 1970; pag. 1-38; New Yor.
18. Sims R. I., "Metallurgist and Materials Technolgist"; 1976; pag. 8, 23-27.
19. Teer D. G; "Tribology Int"; 1975; pag. 8, 247-251.
20. Dearnaley G. and Goode; "Ion Implanation for Combating Wear and Corrosion". This conference; "Tribology in the eighty's"; April 1983; London U.K.
21. Hartley N. E. W; "Ion Implantation Case Studies". This conference; "Tribology in the eighty's"; April 1983; London U.K.
22. Safranek W. H. and Layer C. H.; "Trans. Inst. Metal Finishing"; 1975; pag. 53, 121-125.
23. Still F. A. and Dennis J. K.; "Electroplating"; 1974. Pag. 9-24, 27.
24. Kedward E. C. and Wright K. W; "The Wear Control of Aircraft Parst using a Composite Electroplate" (Tribomet T104C). This conference; "Tribology in the eighty's"; April 1983; London U.K.
25. Jackson N; "The Electroless Nickel-Boron Coating Process". This conference; "Tribology in the eighty's"; April 1983; London U.K.

26. Jones R. D; "Hot Dip Coating Processes". This conference; "Tribology in the eighty's"; April 1983; London U.K.
27. Murphy J. A; "Surface Preparation and Finishes for Metals"; Mc Graw-Hill; 1971; New York.
28. Forrest P. G; "Fatiga de los metales"; Urmo; 1972; Bilbao.
29. Hansen J; "Tribology: Economic Importance and BMFT sponsorship, metallurgical aspects of Wear"; Deutsche Gesellschaft für Metalkunde; Oberusel; 1981 y 1990.
30. Rabinowicz E; "Tribology IV"; MIT. Cambridge, MA; 1990; USA.
31. Morton P. H; "Surface Engineering and Heat Treatment"; 1991. pag. 21-22.
32. Restall J. E; "Coatings for Protection High-T, Components"; R:A:E Tech. P1137; pag. 27; 1988.
33. Honey F. J; "AIJ: Vac. Sci. and Tech. A"; 1986; vol. 4; pag. 2593..
34. Caballero L. X; "Nickel-Cobalt-Boron-Alloy deposited on a substrate"; U:S Patent. May 25; 1993.
35. Ashby M. F. and Jones D. R. H; "Engineering Materials 1 and 2"; Pergamon Press; 1980, 1986; Oxford.
36. Almond E. A; "Vacuum"; 1954; pag. 34, 835.
37. Ruhle M; "J. Vac. Sci. Tech. A3"; 1985; pag. 749.
38. Kramer B. M. and Yudd P. K; "J. Vac. Sci. Tech. A3"; 1985; pag 2439.
39. Holleck H. J; "Vac. Sci. Tech. A4"; 1986; pag. 2661.
40. Holleck D. and Schultz H; "Thin Solid Films"; 1987; pag. 11, 153.
41. Brookes C. A; "Science of Hard Materials"; Plenum Press; 1983; New York.

42. Wick C. H; "Coatings Improve tool life increase Productivity"; 1986; pag. 26-31.
43. Dossett J. L; "Metals Hanbook"; vol 4; pag. 222.
44. Tucker R. C; "Metals Hanbook"; 9th De. ASM; 1986; vol 11; pag. 241.
45. Gawne D. T. and Ma U; "Friction and Wear of Chromiun and Nickel Coatings"; 1989; vol 129; pag. 123.
46. Feldstein N; "Composite Electroless Plating., fundamentals and Applications"; Mallory G. O. and Haydu J. B; "American Electroplaters and Surfaces Finishers Society"; 1990; pag. 269-288.
47. Eadara. R. and Hoge J; "Meterials Wear Resistance Cuatification"; AFS; Transaction; 1986.
48. Bowden F. P. and Tabor D; "Friction and Introduction to Tribology"; Robert Krieger Publishing; 1982.
49. Arnell R. D., Davies P. B., Halling S. and Whomes T. L; "Tribology Principies and Aplications"; Springer; Veriag; 1991; pag. 1-66.
50. Bharat Bhusan and Gupta B. K; "Handbook of Tribology"; Mcgraw Hill; 1991.
51. Budinski. K.G; "Wear Characteristic of Industrial Platings Selection and Use of Wear Test for Coating"; ASTM769; Bayer R. G; 1982. pag. 118-133.
52. Prestner R. and Prestner D. M; Manchester Materials Science Centre; Paper; "The Importance of the Substrate in Surface Engineering" pag. 134-143.
53. Clarke J. and Sarkar A. D; ""Wear 69" 1981; pag. 1-23.
54. Earles S. W. G. and Hayles M. G; "Wear 20" 1972; pag. 51-57.
55. Roshan D.D. "Wear"; 1974; vol. 30; pag. 93-103.