

SEP

SEIT

DGIT

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACION Y DESARROLLO
TECNOLOGICO

Cenidet

“DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN DISPOSITIVO PARA EL
RECUBRIMIENTO DE SUPERFICIES CURVAS POR FRICCION
SECA’

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
**MAESTRO EN CIENCIAS EN
INGENIERIA MECANICA**
P R E S E N T A :
ING. JOSE MANUEL ROBLES SOLIS

DIRECTOR: Dr. JOSE MARIA RODRIGUEZLELIS

SEP CENIDET DGIT
CENTRO DE INFORMACION

00-0662

CUERNAVACA MORELOS

OCTUBRE DEL 2000



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Cuernavaca, Mor. **2000-SEP-22**

Ing. José Manuel Robles Solís.
Candidato al Grado de Maestro en
Ciencias en Ingeniería Mecánica
P R E S E N T E .

Después de haber sometido a revisión su trabajo de tesis titulada:

"Diseño y Construcción de **un** Dispositivo para el Recubrimiento de Superficies **Curvas** por fricción Seca"

Y habiendo cumplido con todas las indicaciones que el jurado revisor de tesis hizo, se le comunica que se le concede la autorización para que se proceda a la impresión de la misma como requisito para la obtención del grado.

Sin otro particular, quedo de usted

ATENTAMENTE

DR. DARIUSZ SZWEDOWICZ WASIK
JEFE DEL DEPTO. DE INGENIERIA MECANICA.



S.E.P. D.G.I.T.
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACION
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
SUBDIRECCION ACADEMICA



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Cuernavaca, Mor. **2000-SEP.20**

DR. JESUS ARNOLDO BAUTISTA CORRAL
DIRECTOR DEL CENIDET.
P R E S E N T E .

AT": DR. DARIUSZ SZWEDOWICZ WASIK
JEFE DEL DEPTO. DE MECÁNICA.
P R E S E N T E .

Por este conducto, hacemos de su conocimiento que, después de haber sometido a revisión el trabajo de tesis titulado:

“ Diseño y Construcción de un Dispositivo para el Recubrimiento de Superficies Curvas por fricción Seca “

Desarrollado por el Ing. José Manuel Robles Solís, y habiendo cumplido con todas las correcciones que se le indicaron, estamos de acuerdo en que se le conceda la autorización de impresión de la tesis y la fecha de examen de grado.

Sin otro particular, quedamos de usted.

Atentamente
COMISION REVISORA


DR. JOSE MARIA RODRIGUEZ LELIS


DR. JESUS PORCAYO CALDERON


M.C. CLAUDIA CORTES GARCIA


M.C. JORGE COLIN OCAMPO

DEDICATORIAS

A mi Madre

Por el gran amor de madre que siempre me ha brindado, por su confianza y apoyo en todo momento.

A mi padre

Por ser tan maravilloso conmigo, por el gran ejemplo de entrega, valor y fortaleza que he recibido durante toda mi vida.

A mis hermanos

Por ser los mejores hermanos que pueden existir

A todos mis familiares

Por darme el ejemplo de unidad y apoyo.

A mi gran compañera

Por todas las cosas maravillosas que hemos compartido juntos.

AGRADECIMIENTOS

Al todo poderoso, por darme la oportunidad de vivir.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) y a la Secretaría de Educación Pública por el apoyo económico durante la realización de mis estudios de maestría.

A mi asesor el Dr. José María Rodríguez Lelis, por sus enseñanzas, consejos y sobre todo por su amistad.

Al M.C. Jorge Colín Ocampo por su muestra de apoyo y amistad incondicional.

Al Dr. Jesús Porcayo Calderón por su valioso apoyo en la realización del análisis metalográfico.

A los miembros del jurado revisor, Dr. Jesús Porcayo Calderón, M.C. Jorge Colín Ocampo, M.C. Claudia Cortes García por sus consejos para mejorar este trabajo.

Al Ing Hector Hinojosa y al Sr. Carlos Limón Rivera por su invaluable apoyo durante el desarrollo de mi trabajo.

A mis compañeros y grandes amigos, Jorge Ovidio Aguilar (micrófono), Benjamín Ramírez (cuasichool), Víctor Manuel Cruz (barbas), Adán Huerta (tullido), Rutilo Morales (reptiliusz), Vicente George (pescada), José Ramón Quiñones (maízatlan), Francisco Maldonado (flacaman), Silvia Castelar, por permitirme disfrutar de una amistad sincera.

A todos los compañeros del centro que tuve la oportunidad de conocer y convivir con ellos.

Al personal administrativo en especial a Karla Quevedo, Jaime Rosas y Ana Isabel Hernández por su atención durante mis estudios.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Cenidet) y todas las personas que lo conforman.

A todas aquellas personas que tuve la oportunidad de conocer en esta ciudad.

Capítulo II

2. CONCEPTOS BÁSICOS DEL FENÓMENO DE FRICCIÓN.

2.1 Introducción	16
2.2 Mecanismo de fricción seca	16
2.3 Generación de calor entre dos superficies en contacto deslizante	18
2.4 Mecanismo de fricción en el sistema tela-metal	19
2.5 Influencia de la velocidad de deslizamiento en el sistema tela-metal	22
2.6 Influencia de la fuerza normal en el deslizamiento	23
2.7 Fenómeno de adhesión entre sustrato y recubrimiento	25
2.7.1 Generalidades	25
2.7.2 Adhesión entre sustrato y recubrimiento	26
2.7.3 Parámetros que favorecen la adhesión	28
2.7.3.1 Influencia de los materiales de sustrato y recubrimiento	29
2.7.3.2 Preparación del sustrato	29
2.7.3.3 Influencia del método de recubrimiento	29
2.7.3.4 Efecto de envejecimiento	30
2.8 Fenómeno de difusión entre metales	30
2.8.1 Difusión	30
2.8.2 Mecanismo de difusión	32
Referencias	33

Capítulo III

3. DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO PARA LA REALIZACIÓN DE RECUBRIMIENTOS POR EL PROCESO DE DEPOSICIÓN POR TRIBOADHESIÓN.

3.1 Introducción	35
3.2 Descripción del dispositivo de deposición	35
3.2.1 Disco de recubrimiento (fresa)	37
3.2.2 Sistema de rotación del sustrato	37
3.2.3 Sistema de rotación de la fresa	38
3.2.4 Sistema de medición de la fuerza que se ejerce entre la fresa y el sustrato	39
3.2.4.1 Sensor de fuerza	39
3.2.4.2 Sistema adquirente de datos	40
3.2.5 Diseño del sistema alimentador de material de aporte	41
3.2.5.1 Descripción del dispositivo alimentador (dosificador)	41
3.2.5.2 Principio de operación del dosificador	42

Capítulo IV

4. PROCEDIMIENTO DE DEPOSICIÓN Y PRUEBAS EXPERIMENTALES.

4.1 Introducción	44
4.2 Pruebas experimentales	44
4.2.1 Selección del material de aporte	44
4.2.2 Selección del material base	46
4.2.3 Desarrollo de las pruebas experimentales	46
4.2.3.1 Deposición de diamante sobre cobre	47
4.2.3.1.1 Análisis por microscopía óptica	47
4.2.3.1.2 Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM)	49
4.2.3.2 Deposición de diamante en acero para rodamientos	65
4.2.3.2.1 Análisis por microscopía óptica	66
4.2.3.2.2 Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM)	69
4.2.3.3 Deposición con Fe-75Si sobre acero inoxidable AISI 304 .	75
4.2.3.3.1 Análisis por microscopía óptica	77
Referencias	79

Capítulo V

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 Conclusiones	80
5.2 Trabajos futuros	82

APÉNDICE A.

Transductores de fuerza.

A.1 Diseño del transductor de fuerza

A.1.1 Calculo del transductor de fuerza

A.1.2 Calibración del transductor de fuerza

APÉNDICE B.

Programa de interfase entre el multímetro HP 34401A y la computadora personal.

APÉNDICE C.

Planos técnicos del dispositivo para el recubrimiento de superficies curvas por triboadhesión.

APÉNDICE D.

Fuerzas reales que se aplicaron durante las pruebas de deposición por triboadhesión.

Lista de Tablas

Tabla 4.1	Condiciones de prueba de los recubrimientos de diamante sobre cobre.
Tabla 4.2	Porcentaje de elementos en la probeta con recubrimiento
Tabla 4.3	Porcentaje de elementos presentes en los puntos de análisis en sección transversal.
Tabla 4.4	Condiciones de prueba de los recubrimientos de diamante sobre pistas de rodamientos.
Tabla 4.5	Porcentaje de elementos en el acero para rodamientos sin recubrimiento
Tabla 4.6	Porcentaje de elementos en las pruebas 4 y 5 (tabla 4.4)
Tabla 4.7.	Condiciones de prueba de los recubrimientos de Fe-75Si sobre Acero Inoxidable AISI 304.

Lista de Figuras

- Figura 1.1 Densidad de nucleación vs tiempo de pulido
- Figura 1.2 Densidad de nucleación vs tamaño de partículas en la pasta y polvo de diamante.
- Figura 1.3 Espesor de película del MoS_2 /presión de prueba, para 0.1, 1, 3 hr, con un 3% de MoS_2 dispersado en aceite mineral.
- Figura 1.4 Espesor de película del MoS_2 /tiempo (4-pruebas con 3% MoS_2 agregada en grasa Li).
- Figura 2.1 Regiones de posibles fallas en un recubrimiento.
- Figura 3.1 Esquema del dispositivo de deposición sobre superficies curvas
- Figura 3.2 Esquema general de sistema dosificador de polvos.

Lista de Gráficas

- Gráfica 4.1 Espectro de rayos **x** del recubrimiento de diamante en cobre correspondiente a la micrografía 4.11.
- Gráfica 4.2 Espectro de rayos **x** del sustrato de cobre sin recubrimiento.
- Gráfica 4.3 Espectro de rayos **x**. a) punto 1, b) punto 2, c) punto 3, d) punto 4, e) punto 5, f) punto 6.
- Gráfica 4.4 Concentración de carbono **vs** puntos de análisis.
- Gráfica 4.5 Espectro de la partícula de diamante embebida en una matriz de cobre.
- Gráfica 4.6 Espectro de rayos **x**. Se muestran los elementos presentes en el sustrato de acero para rodamientos.
- Gráfica 4.7 Espectros de rayos **x**. a) micrografía 4.27a, b) micrografía 4.27b

Lista de Fotografías

- Fotografía 2.1 Sección oblicua de la superficie de cobre, después de que un deslizador duro ha pasado la superficie 15 veces. Se muestran marcas de inclusiones oxidadas
- Fotografía 3.1 Máquina disetada para el proceso de deposición por triboadhesión sobre superficies curvas.
- Fotografía 3.2 Fresas utilizadas para la realización de los recubrimientos.
- Fotografía 3.3 Sistema de rotación del sustrato.
- Fotografía 3.4 Sistema de rotación de la fresa.
- Fotografía 3.5 Componentes del sistema de medición de la fuerza que se ejerce sobre el sustrato.
- Fotografía 3.6 Montaje del transductor. a) vista frontal, b) vista lateral.
- Fotografía 3.7 Sistema adquisidor de datos.
- Fotografía 3.8 Unidad alimentadora: (1) contenedor de polvos, (2) gabinete de control, (3) motor vibrador y (4) flecha de arrastre de polvos.

Lista de Micrografías

- Micrografía 4.1 Aspecto y tamaño de partícula de diamante (2000 X).
- Micrografía 4.2 Aspecto y tamaño de partícula de la aleación Fe-75Si (500X).
- Micrografía 4.3 Substrato de cobre sin recubrimiento a 800 aumentos.
- Micrografía 4.4 Superficie de cobre a 800 aumentos después que **se** realizó la prueba sin alimentación de polvo (prueba 4, tabla 4.1).
- Micrografía 4.5 Recubrimiento de diamante sobre el substrato de cobre (800 aumentos prueba No 3 en la tabla 4.1).
- Micrografía 4.6 Substrato de cobre sin recubrimiento a 1000 aumentos.
- Micrografía 4.7 Recubrimiento sobre la superficie de cobre, la cual muestra los impactos de las partículas durante el proceso de recubrimiento.
- Micrografía 4.8 Recubrimiento sobre la superficie de cobre a 2000 aumentos.
- Micrografía 4.9 Recubrimiento sobre la superficie de cobre, presenta una concentración de partículas de tamaño menores a 5 micras.
- Micrografía 4.10 Recubrimiento sobre la superficie de cobre. Se observa la presencia de una partícula embebida totalmente en el material base.
- Micrografía 4.11 Recubrimiento sobre la superficie de cobre a 1000 aumentos.
- Micrografía 4.12 Mapeo correspondiente a la micrografía 4.11. a) mapeo de cobre, b) mapeo de carbono.
- Micrografía 4.13 Recubrimiento sobre cobre en la zona transversal
- Micrografía 4.14 Recubrimiento sobre cobre (zona transversal). Se muestra una partícula de diamante totalmente embebida en la superficie del cobre.
- Micrografía 4.15 Recubrimiento sobre cobre (zona transversal). Se muestra una partícula de diamante embebida en el cobre a una profundidad aprox. 40 μm .
- Micrografía 4.16 Mapeo correspondiente a la micrografía 4.15. a) mapeo de cobre. b) mapeo de carbono
- Micrografía 4.17 Recubrimiento sobre cobre (zona transversal). Se observan partículas de diamante sobresaliendo de la superficie del cobre.
- Micrografía 4.18 a) microestructura del cobre sin recubrimiento tomada a' 200 aumentos en **el** microscopio de barrido electrónico. b) microestructura del cobre sin recubrimiento tomada a 200 aumentos en **el** microscopio óptico.

- Micrografía 4.19 Cobre con pureza 99.00, rolado en caliente y calentado en una atmósfera reductora antes del rolado
- Micrografía 4.20 a) transformación de la microestructura del cobre a 500 aumentos en el microscopio de barrido electrónico. b) microestructura del cobre a 200 aumentos en el microscopio óptico,
- Micrografía 4.21 a) y b) Zona afectada por el calentamiento friccional vista en el microscopio Óptico a 500 aumentos. En la zona de transformación se observan partículas embebidas en una matriz de cobre.
- Micrografía 4.22 Superficie sin recubrimiento de acero para rodamientos
- Micrografía 4.23 Superficie recubierta en la prueba número 2.
- Micrografía 4.24 Superficie recubierta en la prueba número 4.
- Micrografía 4.25 Superficie recubierta en la prueba número 5.
- Micrografía 4.26 Superficie de acero para rodamientos, sin recubrimiento.
- Micrografía 4.27 a) y b) Superficie de los recubrimientos correspondientes a las pruebas 4 y 5 respectivamente.
- Micrografía 4.28 a) y b) Mapeos carbono correspondientes a las micrografías 4.27a y 4.27b respectivamente.
- Micrografía 4.29 a) y b) Superficies recubiertas atacadas con ácido fluorhídrico a 500 aumentos, correspondientes a las pruebas 4 y 5 (tabla 4.4) respectivamente.
- Micrografía 4.30 Frontera o límite de recubrimiento correspondiente a la prueba 4 (tabla 4.4).
- Micrografía 4.31 Ampliación a 1000 aumentos de la parte inferior de la micrografía 4.30.
- Micrografía 4.32 Ampliación a 500 aumentos de la parte superior de la micrografía 4.30.
- Micrografía 4.33 Ampliación a 2000 aumentos de la superficie recubierta en la prueba número 4 de la tabla 4.4. Se observa que las partículas se encuentran embebidas y cubiertas por una capa de acero.
- Micrografía 4.34 Substrato de acero inoxidable AISI 304 sin recubrimiento.
- Micrografía 4.35 Superficie de la prueba número 4 correspondiente a la tabla 4.7.

Nomenclatura

A	Porcentaje atómico
a	Área de contacto [m^2]
Al	Aluminio
ASTM	American Society of Mechanical Engineering
BCC	Cúbico centrado en el cuerpo
C	Carbono
c	Distancia del eje neutro a la fibra mas alejada [m]
Cl	Cloruro
Cr	Cromo
Cu	Cobre
CVD	Deposición Química en fase Vapor
D	Diámetro externo [m]
d	Diámetro interno [m]
E	Módulo de Young [Pa]
F	Fuerza [N]
FCC	Cúbico centrado en las caras
Fe	Fierro
HCL	Ácido Clorhídrico
HP	Hewlet Pacard
I	Momento de inercia [m^4]
L	Longitud [m]
M	Momento [Nm]
Mo	Molibdeno
Ni	Níquel
O	Oxígeno
P	Presión [N/m^2]
PVD	Deposición Física en fase Vapor
S	Módulo de sección [m^3]
S	Sulfuro
SAE	Society Automotive Engineering
S_e	Factor de extensómetro .
Si	Silicio
Ti	Titanio
w	Carga [gr]
W	Porcentaje en peso atómico

Simbología griega

AE	Energía de activación
AEN	Sensibilidad [mV/V]
AR	Cambio en la resistencia [Ω]
σ	Esfuerzo [Pa]
σ_{flu}	Esfuerzo de fluencia [Pa]
σ_{ult}	Esfuerzo Último [Pa]
σ_{tra}	Esfuerzo de trabajo [Pa]
ϵ	Deformación [$\mu m/m$]
ν	Relación de Poisson

INTRODUCCIÓN

Una encuesta que realizó la Federación de Maquinaria de Japón [1] reveló que el 25% de todos los problemas en este tipo de dispositivos son a causa del desgaste. Entre los componentes que sufren mayor desgaste se encuentran: cojinetes, cilindros, anillos de pistón, levas, frenos y embragues. Asimismo, en el reporte Jost (ver referencia en [2]), se menciona que un 30 % de la energía producida en el mundo se pierde por fenómenos relacionados con fricción. Con esto en mente, cualquier investigación relacionada con la reducción de los efectos de fricción e incremento de vida Útil de componentes de maquinaria se encuentra justificada.

Una de las maneras de reducir los efectos de fricción y desgaste, es a través del tratamiento de superficies, y en especial del uso de recubrimientos. Muchos autores definen el tratamiento de la superficie como una intencional y exacta alteración de las propiedades Ópticas, químicas, eléctricas y mecánicas de la superficie del sólido. En el caso de recubrimientos, las superficies de ingeniería tienen una amplia variedad de técnicas a su disposición, tales como: recubrimiento fosfórico, óxido negro, deposición química de vapor, deposición física de vapor, procesos de electro-deposición, y, recientemente, la técnica denominada como triboadhesión o fricción seca que fue dada a conocer en 1993 por E. Nagy [3].

La técnica de triboadhesión consiste básicamente de un disco que gira a altas velocidades sobre la superficie del material a recubrir y entre estos se adiciona el material de recubrimiento en forma de polvo. Dicha técnica en la actualidad se encuentra sometida a intensos estudios por el sector académico e industrial, ya que el fenómeno por medio del cual se logra la deposición no se encuentra entendido en su totalidad.

En la presente investigación se implementó la técnica de recubrimientos por triboadhesión aplicada a superficies curvas. La investigación se enfocó a la

deposición en tres tipos de sustratos: acero para rodamientos, cobre y acero inoxidable AISI 304. Los materiales de aporte que se emplearon son: diamante y fierro silicio. Para llevar a cabo el proceso, se diseñó y construyó un dispositivo para el depósito en superficies curvas.

Los depósitos realizados, se analizaron con microscopía Óptica y de barrido electrónico, con lo que se demostró la existencia de material de aporte hasta un espesor de 40 μm , encontrándose partículas con tamaños que fluctúan desde el orden de nanómetros hasta 10 μm .

Este trabajo esta integrado por cinco capítulos. El primero presenta una breve reseña histórica de la tribología, su desarrollo y tendencias de estudio, con especial énfasis en recubrimientos superficiales. El segundo explica los aspectos básicos en el fenómeno de fricción en estado seco.

En el capítulo tres se muestra el diseño y funcionamiento del dispositivo que se empleó en las pruebas de recubrimientos. El capítulo cuatro presenta el desarrollo de las pruebas de recubrimiento y su análisis. Finalmente en el capítulo cinco se dan las conclusiones y recomendaciones que se generaron durante este trabajo.

REFERENCIAS.

- [1] Yoshitsugu Kimura. "Updating the fracture theory of wear", (en: J. of Phys. Appi., 25, 1992) pp. A177-A184
- [2] Zygmunt Haduch. "Significado tecnológico y económico de las investigaciones tribológicas en procesos de fricción y desgaste", (en: Gestión tecnológica, 1, Mayo 1986) pp 7-11
- [3] Dingley D J, The Nagy Coating Proces, H H wills Physics Laboratory, University of Bristol, United Kingdom, 1993 (Bristol BS8 1 TL).

CAPÍTULO I

1. ANTECEDENTES

1.1 Introducción

Como define T. Bell [1], la tribología es la ciencia y tecnología que trata la interacción de las superficies en movimiento relativo, los temas y prácticas relacionados con ello incluyen los fenómenos de: fricción, lubricación y desgaste. Estos fenómenos en la actualidad son el foco de interés de muchos investigadores ya que cerca de 113 de la energía que se produce por la humanidad y sus máquinas se pierde por fricción, lo que repercute en cuantiosas pérdidas económicas.

En este capítulo se presenta brevemente el desarrollo y tendencias de estudio de la tribología durante los últimos 30 años, con especial énfasis a los últimos estudios referentes a recubrimientos superficiales.

1.2. Estado del arte

La palabra tribología fue inventada hace aproximadamente 30 años y se deriva de los vocablos griegos: **tribos** que significa frotamiento y **logos** que significa estudio. En general, en la actualidad la siguiente se acepta como una definición formal de **tribología**: Es la ciencia y tecnología de la interacción de superficies en movimiento relativo, los temas y prácticas relacionadas con ella. Esta, básicamente incluye los fenómenos de fricción, lubricación y desgaste.

A raíz del nacimiento de la tribología como una nueva disciplina científica, se comenzaron a realizar fuertes investigaciones en este campo [2]. Los primeros antecedentes de la tribología pueden encontrarse en la prehistoria, donde la tecnología de frotación jugó un papel importante en la obtención del fuego. La

primera referencia histórica, que tal vez se tenga, se remonta a la construcción de pirámides de Egipto, en donde se utilizaron grasas de animal o pasta de babosas para lubricar los sistemas deslizantes [3].

La era moderna de la tribología, se puede decir que se originó en el siglo **XIX** con los estudios de Reynolds sobre lubricación hidrodinámica [4]. Otros antecedentes aportados antes del siglo **XX**, son los trabajos de Leonardo da Vinci [5] quien estableció que el desgaste dependía de la carga aplicada y que la dirección de éste, dependía de la dirección del vector de carga, obteniéndose con esto, los primeros indicios de la existencia del desgaste por fricción. Posteriormente, Charles Hatchet de 1798 a 1803 construyó varias máquinas para medir el desgaste en monedas de oro. Más tarde, en 1938 Siebel mencionó que a causa de la existencia de diferentes tipos de desgaste no es posible su determinación basándose en una prueba única [6].

En los años 50s destaca el trabajo del británico J. F. Archard [7], quien con base en los trabajos de Bowden y Tabor establece por primera vez leyes que rigen al menos un tipo de desgaste de elementos en contacto. A pesar de que para muchos investigadores las leyes de fricción habían sido comprobadas desde los tiempos de da Vinci, el origen del fenómeno de fricción no podía ser explicado. Sin embargo, entre 1954 y 1956 Frank Bowden y David Tabor publicaron dos grandes libros [8, 9] en los que muestran un amplio panorama sobre los mecanismos de fricción, lubricación y adhesión; con lo que se abrieron las puertas para un entendimiento más generalizado de lo que ahora se conoce como "Tribología."

En 1966 se realizó en Gran Bretaña, el primer intento serio de un gobierno por evaluar el posible impacto industrial que se tendría con la aplicación correcta de las prácticas tribológicas conocidas hasta entonces. Éste se llamó **Reporte del Ministerio de Educación y Ciencia de la Posición Presente y Necesidades de la industria**, el cual también se conoce como el **Reporte Jost** en honor a Mr. Peter Jost quien lo encabezó. En el reporte, se concluye que a través de una correcta práctica de la tribología, Inglaterra podría ahorrarse anualmente 500 millones de libras esterlinas. Después de la publicación del "Reporte de Jost", se

propuso en la Gran Bretaña comenzar a impartir la tribología en todos los niveles de educación. Se le definió entonces como: “la ciencia y tecnología que conciernen a las superficies que intervienen entre si durante el movimiento relativo, así como los problemas más prácticos unidos a estos fenómenos” [10].

La importancia de la fricción y el desgaste se ha reconocido no sólo porque son fenómenos relacionados a superficies; sino además, por el crecimiento comercial de diversas tecnologías para tratamiento de superficies con un costo accesible [11]. La fricción y el desgaste son función de la formación y destrucción de las capas superficiales, por esto, los tratamientos de superficie y los recubrimientos se encuentran dentro de las principales tendencias de estudio en tribología [12].

El desafío por mejorar la calidad y seguridad de los productos a dado un surgimiento global para diseñar y manufacturar superficies perfectas, las cuales posean propiedades superficiales de acuerdo a una aplicación destinada. Las superficies de ingeniería, tienen una amplia variedad de tratamientos y procesos de recubrimiento para la modificación de sus propiedades.

En 1992, Richard Cowan [13] realizó una clasificación de las técnicas de alteración de ‘superficie existentes a la fecha, y las dividió en tres áreas principales: deposición atómica, deposición de masa y modificación directa de la superficie. En ese mismo año, T. Bell [14] elaboró una segunda clasificación de acuerdo a los espesores de película que se pueden lograr por cada una de las técnicas de alteración de superficie. Él mencionó la factibilidad de optimar y combinar propiedades para obtener un diseño de la superficie que resista las condiciones de aplicación a las que esté sometido. Posteriormente, Dr. Gabe [15] realizó una última clasificación referente a recubrimientos; para ello tomó en cuenta: el tipo de recubrimiento, el proceso de aplicación y algunas limitaciones sobre la elección de los materiales respecto a la relación beneficio / costo.

Los elementos de máquina que están sujetos a tribocontacto a causa de su continuo desgaste, por lo general se ven sometidos a una modificación de sus propiedades superficiales, por lo cual, se requieren métodos que proporcionen un

recubrimiento con buena adhesión, así como un material de recubrimiento que proporcione las características tribológicas que se desean. Dentro de los métodos que en la actualidad se utilizan con mayor éxito se encuentran: Deposición Física en Fase Vapor, DFV (en inglés PVD) y Deposición Química en Fase Vapor, DQV (en inglés CVD). Éste último, por lo general se emplea con más frecuencia, a causa de las temperaturas asociadas al proceso (700-1000°C) que promueven la difusión en la interfase, lo que mejora en general la adhesión del recubrimiento al sustrato.

En 1992 F. H. Stott y D. G. Mitchell [16] realizaron estudios de fricción y desgaste a recubrimientos cerámicos aplicados por CVD y PVD. Posteriormente en 1998, Staia y Puchi [17] elaboraron un estudio de las propiedades tribológicas de los recubrimientos CVD, aplicados bajo diferentes condiciones de deposición sobre un sustrato de acero inoxidable 316L, utilizando nitruro de titanio (TiN) como material de aporte. Staia y Puchi concluyen que, en general, las probetas recubiertas poseen mayor coeficiente de fricción y menor velocidad de desgaste que el metal base, así mismo, en sus resultados encontraron que al variar las condiciones de deposición existe una gran variación en la estructura morfológica de los recubrimientos modificando con esto su resistencia al desgaste y a la abrasión.

Otros estudios fueron realizados por Byell et al. [18] quien por su parte elaboró una comparación de los recubrimientos de TiN y (Ti,Al)N depositados sobre herramientas de corte mediante CVD. Byell concluye que los recubrimientos de TiN demostraron mejor resistencia al desgaste que los de (Ti,Al)N. Por otra parte, aunque los recubrimientos de (Ti,Al)N mostraron una dureza inferior a causa de su más alta plasticidad, la cual varía de acuerdo al contenido de aluminio, se observó un incremento en la resistencia a la oxidación y mejor desempeño a altas temperaturas, a causa de la síntesis de Al₂O₃ y los fuertes enlaces covalentes entre el aluminio y los átomos de nitrógeno.

Por otra parte Q. H. Fan, [19] investigó el efecto de adicionar energía en forma de microondas al proceso CVD, además de presentar un estudio sistemático sobre el

efecto que las variables del proceso tienen sobre el recubrimiento y el sustrato. Los recubrimientos fueron llevados a efecto utilizando diamante y cobre como material de aporte y base respectivamente. Q. H. Fan observó que si la superficie se prepara mediante un pulido con pasta de diamante, éste afecta fuertemente la nucleación del diamante sobre el cobre, lo cual se atribuye a pequeños cristales de diamante que se quedan atrapados durante el proceso de pulido. En las pruebas realizadas se modificó el tiempo, material y tamaño de las partículas que se utilizan en el pulido, se encontró que la densidad de nucleación incrementa con el tiempo de pulido; ver figura 1.1. Sin embargo, este crecimiento no es lineal ya que presentó saturación en un tiempo de 10 min.

Los materiales que se emplearon en el proceso de pulido fueron: Al_2O_3 en pasta, diamante en polvo y diamante en pasta, En la figura 1.2 se observa que a medida que disminuye el tamaño de partícula de la pasta de diamante se presenta una nucleación mayor. Tendencia similar se observó cuando la pasta de diamante se reemplazó por polvo de diamante, sin embargo, se presentó mayor densidad de nucleación. Caso contrario ocurrió cuando se pulió con Al_2O_3 en pasta ya que la nucleación de diamante fue pobre.

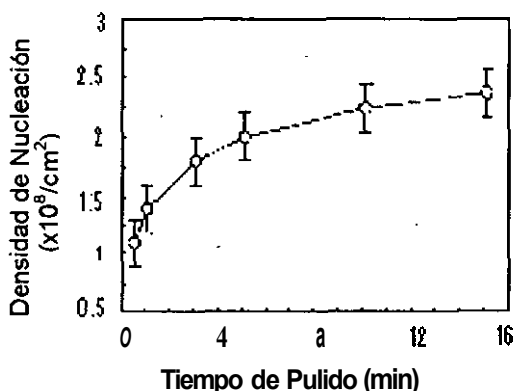


Figura 1.1 Densidad de nucleación vs tiempo de pulido [19].

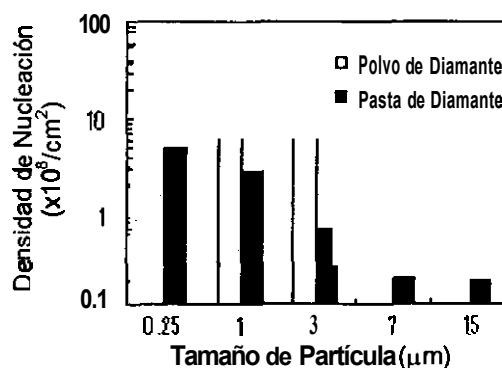


Figura 1.2 Densidad de nucleación vs tamaño de partículas en la pasta y polvo de diamante [19].

Por otro lado, se observó que en general, el recubrimiento de diamante presenta una débil adhesión a causa de la poca afinidad del cobre y el carbón, así mismo, se concluyó que diferentes coeficientes de expansión térmica, en espesores de película menores de $15\mu\text{m}$ provocan un fenómeno de agrietamiento, el cual se puede disminuir ya sea con un control del crecimiento del grano; lo que genera un alivio de esfuerzos, o al aplicar una capa intermedia de titanio. Estas investigaciones fueron de vital importancia para conocer la capacidad de aplicación de diamante sobre diferentes materiales y en especial sobre metales no ferrosos como el cobre dado que entre estos materiales no se forman carburos, por lo que la obtención de un buen recubrimiento por el método CVD presenta serios problemas.

Dentro de las investigaciones tribológicas referentes a recubrimientos y tratamientos superficiales, J. Gansheimer y R. Holinski en 1973 [20] encontraron que se genera una especie de recubrimiento sobre la superficie bajo condiciones de fricción. Ellos experimentaron con Bisulfuro de Molibdeno (MoS_2) agregado en 3% en peso a un aceite mineral y a una grasa de aceite mineral base litio para determinar el comportamiento del MoS_2 como aditivo. Las pruebas se efectuaron utilizando un anillo de acero parcialmente inmerso en un baño de aceite y girando a 500 r.p.m. contra un bloque de acero. El análisis mostró que una película de MoS_2 se forma sobre la superficie del metal bajo condiciones de fricción moderada, sin embargo, bajo condiciones severas, el MoS_2 se logró difundir dentro de la superficie, formando componentes metálicos y carburos.

De las pruebas que se efectuaron, se observó que a baja presión sólo pequeñas cantidades de MoS_2 se depositan sobre la superficie. Cuando se incrementa la presión y el tiempo de prueba, la película de MoS_2 crece (Figuras 1.3 y 1.4), sin embargo, el espesor no incrementa en forma indefinida ya que cuando se alcanza un espesor crítico de película, éste es constante.

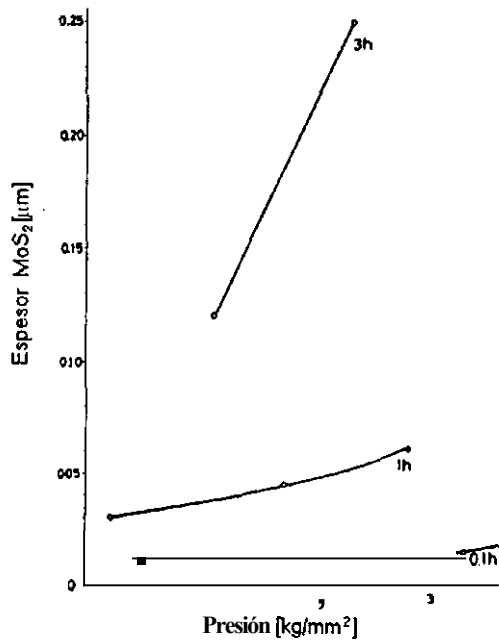


Figura 1.3. Espesor de película del MoS_2 / presión de prueba, para 0.1, 1, 3 hr, con un 3% de MoS_2 dispersado en aceite mineral [20].

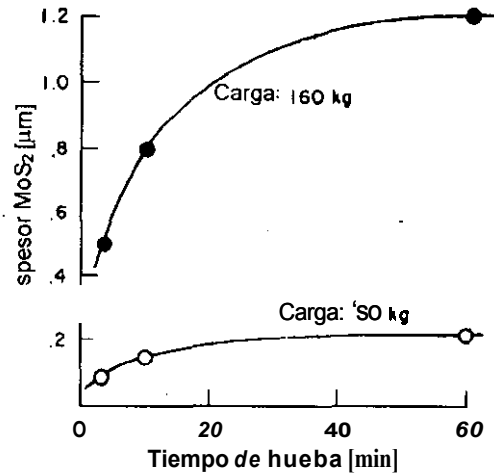


Figura 1.4. Espesor de película del MoS_2 / tiempo (4-pruebas con 3% MoS_2 agregada en grasa Li) [20].

Entre más severas fueron las condiciones de prueba se observó un mayor desgaste, lo que generó una superficie oscura con tonalidades azules alrededor de la huella de desgaste; lo que indicó, que la temperatura excedió los 300°C durante la fricción, además de que aumentó la cantidad presente de MoS_2 . El análisis bajo el microscopio indicó que el contenido de carbón se concentra en aquellas áreas donde existen altas cantidades de Molibdeno, por la tendencia de este elemento a formar carburos.

Por otra parte, el porcentaje de sulfuro y molibdeno no corresponden a la relación 2:1 de la molécula de MoS_2 , dado que la presencia de molibdeno fue esencialmente más baja. Esto indica que el MoS_2 reacciona químicamente con el hierro de la superficie del metal, formándose una capa de reacción. Las reacciones químicas del MoS_2 fueron reportadas posteriormente por Godfrey y Bisson [21] donde muestran que el MoS_2 reacciona con el polvo de hierro formando sulfuro de hierro. Knappwost [22] encontró en experimentos similares que para temperaturas arriba de los 700°C ocurre la reacción:

$\text{MoS}_2 + 2\text{Fe} \rightarrow 2\text{FeS} + \text{Mo}$. Por lo tanto, dicha reacción pudo ocurrir durante las condiciones de prueba.

Por su parte J. Ferrante y D. H. Buckley [23] encontraron una segregación de Al sobre la superficie de la aleación Cu-Al después de calentarla; ellos sugieren que superficies segregadas similares podrían observarse bajo exposición a temperatura y esfuerzos superficiales, como ocurre en condiciones de fricción. De lo anterior, Narayan [24] señaló que en materiales que no forman carburos, la manera de generar adhesión es por radiación laser, con lo que se funde la superficie del cobre para que partículas de otro material puedan incrustarse en el sustrato, con lo que se forma un recubrimiento.

En 1993 el Fis. E. Nagy [25] aprovechando los fenómenos que se producen en el proceso de fricción, dio a conocer una técnica nueva para la producción de recubrimientos superficiales, la que se conoce como triboadhesión o fricción seca. Ésta, consta básicamente de una fresa que gira a velocidades periféricas supersónicas que pasa sobre la superficie del sustrato a una distancia crítica, y entre estos se adiciona el material de recubrimiento en forma de polvo. Las principales variables que gobiernan este proceso son: velocidad de giro de la fresa, velocidad de avance del sustrato, distancia entre el sustrato y la fresa y cantidad y tamaño del polvo suministrado.

Los primeros trabajos efectuados por E. Nagy se realizaron sobre materiales recubiertos con capas poliméricas, y no fue hasta 1989 cuando experimentó con recubrimientos metálicos y cerámicos sobre superficies de acero y de vidrio.

Posteriormente D. J. Dingley [26], realizó una investigación referente a la deposición de diamante sobre sustratos de cobre y acero inoxidable ferrítico. El aparato que utilizó para la deposición fue una réplica del que utilizó anteriormente E. Nagy. En general, los resultados de Dingley se pueden resumir en lo siguiente:

- Se comprobó la existencia de un recubrimiento delgado de diamante sobre la superficie de cobre.

- Los substratos de acero también fueron recubiertos con una capa menos perceptible que en el caso del cobre.
- Los microscopios de transmisión y barrido electrónico mostraron que los cristales de diamante tenían entre 20 y 40nm de diámetro, es decir, de 10 a 20 veces más pequeños que el tamaño de grano original. Lo que indicó que existió una reacción química, ya que el recubrimiento fue un compuesto de diamante duro y una mezcla de carbón amorfo.

En 1997 J. M. Rodríguez L., et al [27] iniciaron una investigación referente a recubrimientos por triboadhesión. La primera etapa de esta investigación consistió en corroborar la viabilidad del recubrimiento. Los materiales que se utilizaron fueron pintura para cemento y lámina de acero galvanizado como material de aporte y substrato respectivamente. En esta etapa se comprobó la factibilidad del proceso y se observó el gran potencial de la técnica utilizada. Las principales conclusiones fueron:

- Se logró depositar pintura de cemento en la superficie de lámina galvanizada por medio de fricción.
- Las partículas de pintura penetra'ron a una profundidad aproximada de 5 micras de la superficie, formando parte de la estructura del material base.

En la segunda etapa, se realizaron pruebas con polvos metálicos tales como Níquel –Aluminio (Ni 5Al) y Carburo de Cromo (Cr_3C_2 -CrNi) sobre lámina de acero SAE 1010 [28]. El análisis de estas pruebas comprobó que las partículas del material de aporte se fraccionan, tal y como lo mencionó Dingley [29], además, de que se logró depositar Cr_3C_2 -CrNi en lámina de acero SAE 1010.

Con base en lo anterior, y dado que se ha experimentado sólo en superficies planas, en la presente investigación se aplica dicha técnica sobre superficies curvas, ya que en el campo industrial existen elementos que poseen un radio de curvatura, los cuales son tratados superficialmente, por ejemplo, ejes, rodamientos, correderas, pistones, camisas, levas, embragues, etc.

REFERENCIAS.

- [1] BELL. T "Surface engineering: its current and future impact on tribology", (en: Journal of Phys. Appi., 25 1992) pp. A297-A306
- [2] Morales Espejel G. E, Skrzypinski A, Rusek P, Pérez U A, Haduch Z, "Desarrollo de la Tribología en el Mundo", Reporte técnico 1997, ppl-6
- [3] SKF: Lubricación de rodamientos. Publicación PI 400/I Sp 1985, Suecia: Palmeblads, pp 2-4.
- [4] Stolarski T.A. Tribology in Machine Design, first published (New York, 1990), p.275
- [5] Morales Espejel G. E: op cit
- [6] Ibid.
- [7] Archard J F, "Elastic Deformation and Laws of Friction", (en: Proc. R. Soc. A 243) pp 190-205
- [8] Bowden F. and Tabor D, The Friction and Lubrication of Solids first published (lithography in Great Britain at The University Press, Oxford, part I, 1950) pp 105-111
- [9] Bowden F. and Tabor D, The Friction and Lubrication of Solids first published (lithography in Great Britain at The University Press, Oxford, part II, 1950) pp 105-111
- [10] Zygmunt Haduch. "Significado tecnológico y económico de las investigaciones tribológicas en procesos de fricción y desgaste", (en: Gestión Tecnológica, 1, Mayo 1986) pp 7-11
- [11] BELL. T: op cit
- [12] Martinez P Francisco, "La tribología. su importancia y desarrollo en el mundo en Cuba. Tendencias en las investigaciones y su aplicación", (en: La Tribología Ciencia y Técnica para el mantenimiento, ed. LIMUSA. c1997), p.10
- [13] Cowan S. R. and Ward O. W., "Surface engineering. . . an enigma of choices", (en: Journal Of Phys. Appi., 25 1992) (Agosto 1995).pp. A285-A291

- [14] BELL. T: op. Ut.
- [15] Gabe D.R. "Metallic Coatings for Protection". (en: Metallic and Inorganic Coatings, Department of Materials Engineering and Design, Loughborough University of Technology, England), pp **63-73**
- [16] Stott H. F., Mitchell G D and Wood C G "The Influence of temperature on the friction and wear of thin ceramic coatings in carbon dioxide", (en: Journal of Phys. Am. **25**, **1992**) pp. **A177-A184**
- [17] Staia y Puchi S. E. "Propiedades Tribológicas de **Tin-CVD** en Condiciones de deslizamiento sin lubricación", (www.coppe.ufrj.br/~notimat/materia/Vol1N2/artigo8/artigo.htm) Venezuela, **18**, Julio **1998**
- [18] H Byell V. A., Minevich A. A., Stepanenko V. A., Gick A. L. and Kholodiiov V. O.. "Wear resistance and structure of (Ti, **Al**)N coatings", (en: Journal of Phys. Appl., **25** **1992**) p. **A292**
- [19] Fan H. Q., Pereira E., "Diamond Deposition on Copper: studies on nucleation, growth, and adhesion behaviors", **21** August **1998**
- [20] Gansheimer J. y Holinski R. "Molybdenum Disulfide In Oils and Greases Under Boundary Conditions", (en: Transactions of the ASTM, April **1973**) pp **242-247**
- [21] Godfrey D and Bisson **E** E, "Bonding of Molybdenum Disulfide to Various Materials to Form a Solid Lubricating Film **I**", Nat'l Advisory Committee for Aeronautics, **1952**
- [22] Gansheimer J. y Holinski R.: op cit. p **245**
- [23] Ferrante, J. and Buckley, D. H., "A Review of Surface Segregation, Adhesion and Friction Studies Performed on Copper-Aluminum, Copper-Tin and Iron-Aluminum Alloys", (en: ASLE Transactions, **15**, **1**, **1972**) pp **18124**
- [24] Narayan J, Godbole P., Matera G. and Singh R. R., (en: J. Appl. Phys. **71**, **1992**) p.966
- [25] Dingley D J, The Naav Coating Process, H H wills Physics Laboratory, University of Bristol, United Kingdom, **1993** (Bristol **BS8 1 TL**)
- [26] Dingley D.J.: op cit.

- [27] **Rodríguez L. J., Proceso para recubrir placas metálicas con óxidos metálicos por fricción seca, Mexico: Cenidel, Proyecto CoSNET 597-P 1997**
- [28] **Aguilar A. J. “Diseño y Construcción de un Dispositivo Utilizado para Recubrir Superficies Metálicas con Óxidos Metálicos por medio de Fricción Seca”. (Tesis de Maestría, México: Cenidel, Agosto de 1999)**
- [29] **Dingley D. J.: op cit.**

CAPÍTULO II

2. CONCEPTOS BÁSICOS DEL FENÓMENO DE FRICCIÓN.

2.1. Introducción

El fenómeno físico por medio del cual se logra la deposición por fricción seca no se encuentra entendido en su totalidad. Sin embargo, se ha demostrado que con el empleo de la fricción seca se es capaz de depositar una gran variedad de recubrimientos en igual variedad de materiales. En este capítulo se realiza un estudio de los fenómenos que suceden durante la fricción en estado seco, con el fin de entender el mecanismo por medio del cual se lleva a cabo la deposición de partículas en forma de polvo sobre el sustrato.

2.2. Mecanismo de fricción seca.

Cuando dos cuerpos sólidos se encuentren deslizándose uno sobre el otro, existe una resistencia que se opone a este movimiento, la cual se llama fricción. Se considera usualmente que la fricción es una causa de molestia y desde los primeros tiempos el hombre ha realizado intentos por tratar de eliminarla o reducirla a un valor pequeño.

El investigar las leyes y fuerzas que gobiernan el sistema de fricción ha llevado a estudiar la constitución atómica de los materiales en contacto, y a definir los procesos físico químicos que suceden en las superficies y capas exteriores de los

elementos en contacto. A través del paso del tiempo han surgido un sinnúmero de hipótesis sobre el mecanismo de fricción, tales como las de Amontons, Coulomb, Bowden, Tomlinson, Kragelski entre otras, en las que se consideran los diferentes parámetros del mecanismo de fricción.

Las primeras observaciones sobre las leyes de fricción se realizaron por Leonardo da Vinci [1] y sus conclusiones son: primero, la fricción hecha por el mismo peso será igual a la resistencia a empezar el movimiento, aunque el contacto puede ser de diferentes amplitudes o longitudes. Segundo, la fricción produce doble esfuerzo si el peso es incrementado al doble. Por su lado, el Ing. Francés Amontons estableció, en 1699, las leyes sobre fricción, inscribiéndolas de la manera siguiente:

Primera ley. La fricción es independiente del área de contacto entre los sólidos

Segunda ley. La fricción es proporcional a la carga entre las superficies.

Con estas dos leyes y para un particular par de superficies, se obtuvo que la relación fricción / carga era constante, y esta constante fue denominada “**coeficiente de fricción**”

Posteriormente, las observaciones de Amontons fueron verificadas en 1781 por Coulomb quien realiza una clara distinción entre lo que sería **fricción estática**, la fuerza que se requiere para iniciar el movimiento, y **fricción cinética**, la fuerza que se requiere para mantener éste. Él demostró que la fricción cinética podría ser apreciablemente más baja que la fricción estática. Además, que la fricción cinética es casi independiente de la velocidad de deslizamiento. Esta última observación muchas veces es citada como la **tercera ley de la fricción**.

Aunque la fricción estática es generalmente mayor que la fricción cinética, la diferencia usualmente no es notoria. Esto a causa de que el mecanismo básico de fricción en estado seco, para un caso en particular, se mantiene esencialmente sin cambio; la única alteración es el tiempo real de contacto en algún instante. Si el mecanismo de fricción cambia por algún agente externo, una alteración en la

fricción puede ocurrir. La diferencia en magnitud de la fricción estática y cinética, básicamente se presenta como un movimiento de pegado-deslizamiento lo que, se conoce en inglés como “stick-slip” [2].

Cuando dos materiales o especímenes se ponen en deslizamiento, después de que la fuerza de fricción estática se vence, se presenta un movimiento intermitente de pegado-deslizamiento (stick-slip). Durante el pegado (stick) la parte superior del deslizador (crestas) se encuentra en contacto con la parte más baja del otro espécimen (valles), hasta la restitución de la fuerza necesaria para iniciar el deslizamiento. Posteriormente ocurre un rápido deslizamiento, y continua hasta que la superficie del deslizador llega a estar otra vez firmemente pegada o sujeta a la superficie del otro espécimen en contacto.

En general, la investigación de la fricción seca es más problemática, a causa de que está basada en los fenómenos moleculares que suceden en la capa exterior del cuerpo sólido. Ellos dependen de la composición y estructura del material, del estado de la superficie y del ambiente en general. Por eso, los coeficientes de fricción varían aún para un mismo material. Este problema se complica todavía más en el caso de tomar en cuenta las variedades de movimientos: rotatorio, giratorio, deslizante, recíproco o alguna forma mixta.

2.3 Generación de calor entre dos superficies en contacto deslizante

El área de contacto tiene una importante influencia sobre la temperatura desarrollada durante el deslizamiento. La energía perdida durante el deslizamiento se disipa principalmente en forma de calor, y esto ocurre sobre algunas pequeñas regiones en contacto. Cálculos completamente primitivos sugieren que las temperaturas que se alcanzan en las capas superficiales pueden ser muy altas. En un intento por medir dicha temperatura, Bowden y Tabor [3] realizaron un experimento en el cual se empotraron termómetros en el sólido, cerca de la

superficie. Sólo se encontró un pequeño aumento en la temperatura, lo que se atribuyó principalmente, a que no fue posible acercarse lo suficiente a la superficie. Posteriormente se desarrollaron numerosos métodos para la medición de temperatura en la interfase, tal como el método termoelástico, método fotográfico o visual, método de celda infrarroja, etc.

Todos los modelos sobre cálculos de temperaturas señalan que el incremento de temperatura está en función de la carga y la velocidad, y se incrementa entre más baja es la conductividad térmica de los cuerpos, es decir, en malos conductores térmicos, el calor que se genera en la interfase es mucho mayor que en aquellos que poseen buena conductividad térmica, como es el caso de los metales.

Cálculos numéricos señalan que para velocidades y cargas moderadas, la temperatura de la superficie puede ser alta, aunque la temperatura del cuerpo no llegue a tener un cambio apreciable. Se ha encontrado para metales [4], que la temperatura que se alcanza no sobrepasa el punto de fusión, aunque éste se alcanza rápidamente. Si las superficies en contacto están oxidadas, las temperaturas que se logran pueden ser mucho mayores que el punto de fusión del propio material, ya que los Óxidos influyen en el valor del punto de fusión. Con metales de altos puntos de fusión, se consiguen fácilmente temperaturas momentáneas de 500 a 1000 °C; estas temperaturas están confinadas en una delgada capa superficial, mientras el total de la masa permanece frío. Las altas temperaturas que se generan pueden durar milésimas de segundo o menos.

Por otro lado, se ha comprobado experimentalmente que el calentamiento friccional trae consigo un bajo coeficiente de fricción a causa del ablandamiento que sufren las superficies en contacto [5].

2.4 Mecanismo de fricción en el sistema tela- metal

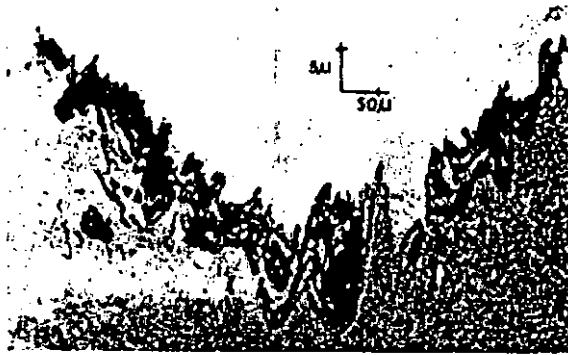
Dentro del mecanismo de fricción existente entre un metal y una fibra ya sea natural o sintética, se presenta un proceso el cual se denomina pulido. Los

primeros trabajos encaminados a la explicación de este proceso según reportan Bowden y Tabor [6], fueron realizados por Newton, Herschel y Rayleigh. Ellos consideraron al pulido como un proceso de esencialmente fina abrasión.

Posteriormente Sir George Beilby, [7] quien estableció el conocimiento clásico del mecanismo de pulir, mostró que la capa pulida posee una estructura diferente a la del material antes de pulir, ya que ésta pierde sus propiedades cristalinas y aparentemente fluye sobre la superficie de manera que se rellenan las irregularidades. Las altas temperaturas provocadas por la fricción, producen un ablandamiento local o fusión del material, lo que permite que el material en estado plástico o fundido sea untado sobre las áreas más frías, donde éste solidifica rápidamente, para formar lo que se conoce como la capa Beilby, en honor a Sir George Beilby.

Estudios realizados a la capa Beilby muestran que ésta posee un tamaño de grano fino correspondiendo casi a una estructura amorfa. Aunque no se entiende porqué una estructura amorfa que se forma en estas condiciones pueda encontrarse estable. Estudios realizados por Bowden y Tabor [8] han derramado alguna luz respecto a esto. Ellos experimentaron con un deslizador semiesférico duro, que se deslizaba repetidamente sobre la superficie de un bloque de cobre limpio, aquí se encontraron inclusiones enterradas en la superficie del cobre.

En la fotografía 2.1 se muestra una sección oblicua de la pista después de que el deslizador ha atravesado la superficie 15 veces. La evidencia sugiere que las inclusiones son óxido de cobre, las cuales han sido formadas sobre la superficie después de cada deslizamiento y entonces desplazadas debajo de la superficie durante la intensa deformación, la cual acompaña la próxima pasada del deslizador. De hecho, el tamaño de grano en la vecindad de las inclusiones es sumamente pequeño y no excede el tamaño medio de la distancia entre las partículas.



Fotografía 2.1 Sección oblicua de la superficie de cobre, después de que un deslizador duro ha pasado la superficie 15 veces. Se muestran marcas de inclusiones oxidadas [8].

Así, durante el repetido frotado o pulido de un metal, un gran número de pequeñas partículas pueden ser adicionadas en la capa superficial distorsionada, sin embargo, el tamaño de las partículas es muy importante, ya que, aunque el deslizador produce altas temperaturas instantáneas o de flash localizadas, éstas son de muy corta duración, en estas condiciones, la coalescencia o fusión de las partículas de un tamaño relativamente grande no ocurrirá. Por el contrario, si las partículas son de un tamaño relativamente pequeño, el metal alrededor de estas partículas puede, por lo tanto, retener una estructura cristalina extremadamente fina. De esta manera una capa superficial de un tamaño de grano relativamente pequeño, similar a la de un material amorfo, podría ser formada y mantenerse estable.

Aunque la naturaleza exacta de la capa pulida está todavía sujeta a considerables discusiones, es claro que el calor friccional que se genera durante el frotamiento, logra llevar fácilmente la temperatura de la superficie a un alto valor. Esto sugiere que el ablandamiento térmico local o la fundición, pueden jugar un importante papel en el proceso de pulido.

Teniendo en mente que el proceso de pulido se logra gracias a las temperaturas friccionales es claro que el punto de fusión del pulidor es un factor determinante. Si el pulidor se funde o se ablanda a una temperatura más baja que el espécimen, éste fundirá o fluirá primero y tendrá comparativamente poco efecto sobre el

espécimen, es decir, la relativa dureza del sólido y el pulidor, medida a la temperatura ambiente, carece completamente de importancia, ya que la cantidad de flujo de la superficie está gobernado no por las propiedades del sólido y el pulidor a la temperatura ambiente, sino por sus propiedades mecánicas a las altas temperaturas desarrolladas entre las superficies deslizantes.

Ahora, si se considera un pulidor con geometría circular girando a una velocidad relativamente mucho mayor que la velocidad de deslizamiento del espécimen pulido, la temperatura interfacial tendrá poco efecto sobre el pulidor, ya que el tiempo de contacto es relativamente mas corto y de esta manera el calor friccional tendrá un efecto mayor sobre el espécimen.

2.5 Influencia de la velocidad de deslizamiento en el sistema tela-metal

Con un incremento en la velocidad de deslizamiento, se produce un mayor calentamiento friccional que puede producir ablandamiento de la superficie, o en caso extremo fundición de la misma. Esto ocurre a moderada velocidad de deslizamiento con hielo y a extrema alta velocidad con metales. Con estas condiciones, la fricción puede ser extremadamente baja, a causa de la formación de una película deformada o fundida [9].

Con el objetivo de investigar el efecto de la fricción a altas velocidades de deslizamiento, Bowden y Tabor [10] realizaron una investigación en la que utilizaron una esfera de acero girando sobre una superficie de cobre. Ellos diseñaron un aparato centrífugo con el cual obtuvieron velocidades de '1000 a 2000 m.p.h. (1600 a 3200 km/hr), logrando así, realizar la medición del coeficiente de fricción sobre un enorme rango de velocidades. Sus resultados confirman que conforme la velocidad de deslizamiento se incrementa, la fricción disminuye. Por otro lado, el daño en la superficie de cobre se modifica, ya que a moderadas velocidades se observa un daño menos marcado con signos de flujo superficial

que el que presenta a bajas velocidades, y por otra parte, a mucho más altas velocidades (1200 m.p.h, 1920 kmlhr.) el daño en la superficie es de carácter diferente, y efectivamente muy ligero. A estas enormes velocidades la capa superficial de cobre se aproxima a un estado fundido y se forma una delgada capa de cobre, la que actúa como lubricante, en la misma manera que un esquí funde una capa de agua sobre el hielo.

Lo anterior conduce a asegurar que la resistencia a la fricción para el deslizamiento de metales a muy altas velocidades de deslizamiento puede ser mucho menor que a velocidades normales, y que el desgaste producido por unidad de distancia de deslizamiento puede ser mucho menor, lo que indica que el problema de desgaste cuando se tienen las superficies deslizándose a muy altas velocidades no es grave.

Esto sugiere que el desgaste por unidad de área para un sistema tela-metal que se encuentre deslizándose a altas velocidades es mínimo, ya que la generación de altas temperaturas interfaciales se logra fácilmente, concentrándose en el área de contacto, a causa del bajo coeficiente de conducción de calor que posee la tela, con lo que se logra un rápido ablandamiento o fundición de la superficie del metal.

2.6 Influencia de la fuerza normal en el deslizamiento

Dentro de los sistemas en contacto, la fuerza normal o presión de contacto juega un papel importante, ya que de ella depende en gran medida la magnitud de factores tales como: adhesión, fricción y temperaturas generadas en la interfase de contacto.

El contacto entre cuerpos sólo ocurre en las puntas y en los picos de las asperezas. Sobre el resto de la superficie puede haber pequeños vacíos, y a ligeras cargas, la magnitud de las fuerzas en la Superficie es extremadamente pequeña con lo que, los vacíos sobre la superficie están completamente separados y no tienen interacción uno con el otro. La carga es por lo tanto llevada

sólo en las puntas de las asperezas, con lo que éstas se deforman primero elásticamente, y conforme la carga sobrepasa el valor del límite elástico de alguno de los materiales, se presenta una etapa de deformación plástica.

Un estudio efectuado por Bowden y Tabor [11] muestra que cuando la carga (w), es superior a 0.4 del valor de la dureza a la indentación del metal, se dan los primeros indicios de flujo plástico, y puede de esta manera frecuentemente ocurrir a mínima carga. Así, para materiales duros para los cuales el módulo de Young es 2×10^{12} dinas/cm² y el valor de dureza a la indentación es de 600 kg/mm², una aspereza que tiene un radio $r = 10^{-4}$ se deformará plásticamente cuando la carga sea menor que una milésima parte de un gramo. Esto muestra claramente que la carga mínima causará un flujo plástico hasta que el área de contacto sea suficiente para soportar la carga. Consecuentemente, si se dobla la cantidad de carga, el área de contacto se duplicará, manteniendo el campo de presión constante, con lo que se podría pensar que el área de contacto real dependerá del número de puntos en contacto. Si se realiza un análisis simple sobre la presión que se ejerce a un cuerpo, se verifica que el área de contacto real depende del número de puntos en contacto.

Se supone una serie de áreas de contacto a_1, a_2, a_3, \dots , cada una soporta una carga w_1, w_2, w_3, \dots , donde: $w_1 = P a_1$; $w_2 = P a_2$; $w_3 = P a_3$; entonces la carga total W soportada por todas las asperezas será:

$$W = w_1 + w_2 + w_3 = P(a_1 + a_2 + a_3) = PA$$

Por consiguiente, el área total de contacto es directamente proporcional a la carga e independiente de la forma o tamaño de la superficie.

La cantidad de flujo plástico de las puntas en contacto se incrementa por la combinación de esfuerzos normales y tangenciales, es decir, el deslizamiento en combinación con la carga favorece la deformación plástica, formando así, una capa superficial totalmente deformada.

Para el caso particular en el cual se tiene un sistema aro-rueda, el contacto está

determinado por un área específica y bien localizada, la cual ha sido estudiada anteriormente por Hertz [12] quien señala que, cuando dos cuerpos que tienen superficies curvas se presionan uno contra el otro, la magnitud de la carga puede transformar el contacto de punto en contacto de línea, y éste a su vez en contacto de área, donde el esfuerzo que se desarrolla en ambos cuerpos es tridimensional.

2.7 Fenómeno de adhesión entre substrato y recubrimiento

2.7.1 Generalidades.

Es importante señalar que existe una conexión entre fricción y adhesión. La fricción es esencialmente la fuerza cortante, y la adhesión, la fuerza de tensión de la junta formada en la región de contacto real. De acuerdo con la teoría de plasticidad, los esfuerzos normal y tangencial no pueden ser tratados como cantidades independientes. El flujo plástico de la junta es causado por la combinación de estos esfuerzos [13].

Por otro lado, la experiencia común indica que no se observa fuerza de adhesión cuando dos materiales son presionados al mismo tiempo. Bowden y Tabor sugieren dos razones por las cuales no es detectable la adhesión normal. Primero, las superficies están en continuo cambio a causa la absorción de películas delgadas en el contacto con la atmósfera. Segundo, la que es más importante, las juntas de adhesión que se forman entre las asperezas más bajas, están posiblemente descargadas a causa de que la carga es llevada principalmente entre las asperezas más altas, las cuales se encuentran sujetas posiblemente a compresión elástica; de esta manera, la adhesión que se desarrolla en los puntos de contacto real es progresivamente anulada gracias a las fuerzas de restitución del mismo material. Para materiales con altos módulos de elasticidad, la compresión es más significativa que la adhesión y por lo tanto la adhesión no es detectada.

Johnson et al [14] investigaron el contacto entre una esfera de vidrio y una superficie plana de goma y gelatina, los cuales son materiales con bajos módulos de elasticidad. Ellos encontraron buena concordancia entre los valores experimentales y las predicciones teóricas. Fuller et al [15] combinaron la teoría de Johnson con la de Greenwood y Williamson [16] y la aplicaron al modelo de una superficie rugosa en el estudio de la adhesión entre sólidos elásticos y el efecto de la rugosidad en reducción de la adhesión.

2.7.2 Adhesión entre substrato y recubrimiento

Cuando se desea la aplicación de un recubrimiento, por cualquiera de las técnicas de aplicación de éstos, es necesario que exista buena adhesión entre el substrato y el recubrimiento. La manera en la cual el material se adhiere puede estar grandemente influenciada por la tecnología de aplicación del recubrimiento.

H. K. Pulker y A. J. Perry [17] señalan que en los nuevos diccionarios técnicos de química y física, la adhesión está definida como el lazo o fuerza de lazo entre dos materiales o dos cuerpos, incluyendo el lazo de moléculas individuales en la interfase de las superficies.

La **ASTM** define a la adhesión como " la condición en la cual dos superficies se mantienen unidas ya sea por fuerzas de Valencia, por una ancla mecánica o por una combinación de éstas". Estas fuerzas de lazo pueden ser de Van der Waals, electrostáticas, y/o de lazo químico, las cuales interactúan en la interfase.

Para fines del presente estudio, se entiende la adhesión como un sinónimo de la adherencia de un recubrimiento al substrato, es decir, la fuerza de adhesión es el trabajo necesario para separar la interfase entre el substrato y el recubrimiento.

Existen diferentes métodos para la medición de la adhesión, los cuales pueden ser clasificados y divididos de acuerdo a varios criterios, tales como: mecánicos y no mecánicos; destructivos y no destructivos, de los cuales su selección es de acuerdo al margen de error que se requiera, y al tiempo necesario para la

realización de la medición. A causa de los efectos que el método de medición trae, no es posible realizar una comparación entre estos.

En general, la falla del recubrimiento y de este modo la separación del mismo, puede aparecer en alguna de las 5 regiones que se ilustran en la figura 2.1. La región 1 es la parte interna del recubrimiento y la región 5 es la masa total del sustrato, la cual no se encuentra en interfase con el recubrimiento. Si la separación ocurre en cualquiera de estas dos regiones, la falla será de tipo cohesiva. La región 3 puede ser definida por una capa interfacial muy difundida. Se encuentran también dos zonas de transición 2 y 4.

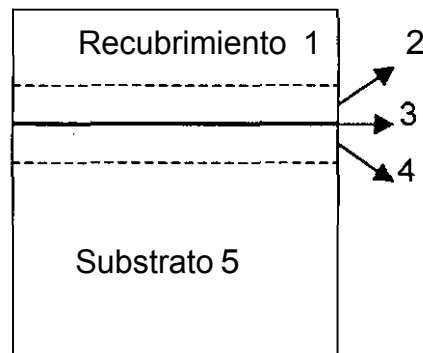


Figura 2.1 Regiones de posibles fallas en un recubrimiento

La fractura del recubrimiento puede suceder en cualquiera de las cinco regiones. Si la separación del recubrimiento del sustrato toma lugar a un lado o alrededor de la capa interfacial, la fuerza o energía necesaria para la separación es una medición experimental de la adhesión. Sin embargo, si la separación toma lugar en el interior de la película o del sustrato, se tiene una fractura cohesiva, esto indica que las fuerzas de adhesión son más fuertes que las fuerzas de cohesión. Desde un punto de vista cualitativo, la adhesión se considera mala, si la separación se da en la capa interfacial. Sin embargo, si la separación ocurre dentro del sustrato en una región ajena a la interfase, la adhesión es buena.

En general la calidad de la adhesión entre sólidos, por ejemplo una película y su sustrato, depende en gran medida de la microestructura de la capa interfacial que se forma. Existen cinco tipos de capas interfaciales que se pueden formar:

- 1) **Capa interfacial mecánica.** Este tipo de capa interfacial se forma sobre un substrato poroso o áspero. El material de aporte cae dentro de los poros, La adhesión depende en gran medida de las características físicas (particularmente de la fuerza cortante y la plasticidad) de los materiales,
- 2) **Monocapa sobre monocapa.** Esta interfase se caracteriza por una gran transición del material de la película al material del substrato. La región de transición tiene un espesor de 2.5 \AA . En esta interfase no ocurre difusión y solamente poca o nada de reacción química.
- 3) **Capa interfacial con lazo químico.** Este tipo de capa interfacial se caracteriza por una composición química constante a lo largo de la retícula. La formación de la capa interfacial resulta de la reacción química de átomos de la película con átomos del substrato, la cual puede ser influenciada por la atmósfera presente a la hora de la reacción. En este tipo de lazo químico se pueden formar óxidos, nitruros, carburos, etc.
- 4) **Capa interfacial formada por difusión.** Esta capa interfacial se caracteriza por un constante cambio en la retícula a lo largo de la zona de transición película-substrato. Por lo menos se requiere parcial solubilidad para que exista la difusión. La energía necesaria debe ser suministrada por un agente externo.
- 5) **Capa interfacial formada por pseudodifusión.** Este tipo de capas se pueden formar por la implantación de partículas altamente energizadas, donde la película se condensa sobre la superficie del substrato. La pseudodifusión tiene las mismas ventajas que la difusión, sólo que ésta puede formarse con materiales que no son mutuamente difundidos.

Rara vez existe un sólo tipo de capa interfacial. En la práctica, frecuentemente ocurre la combinación de varios tipos de capas interfaciales simultáneamente.

2.7.3 Parámetros que favorecen la adhesión

La adhesión de películas delgadas se ve principalmente influenciada por parámetros que dependen de la selección de los materiales para el recubrimiento y para el substrato, así como también por la preparación del substrato, el proceso de recubrimiento y el manejo de la película-substrato una vez que se completa el

proceso de recubrimiento. En la siguiente sección se discute cada uno de los parámetros en forma detallada.

2.7.3.1 Influencia de los materiales de sustrato y recubrimiento.

En muchas ocasiones el material del sustrato ya se encuentra establecido y sólo se desea modificarle ciertas características, por ejemplo: protección a la corrosión, baja fricción, alta dureza, etc. La selección de la combinación de materiales se encuentra limitada por la aplicación a la que se tenga destinado el sustrato. En muchas ocasiones la selección de la combinación de materiales determina si la capa interfacial producida será por difusión, por lazo químico, o por cualquier otro tipo de posible lazo interfacial. Si se espera que la adhesión entre los materiales seleccionados será débil, entonces la adhesión puede ser mejorada por la adición de una capa intermedia.

2.7.3.2 Preparación del sustrato.

La formación de la capa interfacial y por ende la adhesión, es fuertemente influenciada por la estructura física y química de la superficie del sustrato, así como también por la morfología de la superficie (plasticidad, ondulaciones y rugosidad).

La composición química de la Superficie en ocasiones es diferente de la del resto del material. Un previo tratamiento de la superficie tal como abrasión y pulido, puede cambiar no sólo la estructura mecánica, sino también la estructura química de la superficie.

2.7.3.3 Influencia del método de recubrimiento.

La formación de la capa interfacial está fuertemente influenciada por el proceso de recubrimiento. Se tienen estudios que demuestran que en los métodos de deposición física de vapor, la adhesión es influenciada por el ángulo de incidencia al cual las partículas golpean la superficie. No hay diferencia observable entre ángulos de 0 a 48°, pero para valores de ángulo de 60° la microestructura de la película llega a ser porosa y la adhesión es menor

La temperatura del sustrato tiene fuerte influencia sobre el efecto de adhesión. La difusión y la producción de átomos propensos a la reacción se ve afectada por la temperatura del sustrato. Esto puede ser explicado en términos de las reacciones entre la película y el sustrato.

2.7.3.4 Efecto de envejecimiento.

En muchos casos el sistema película-sustrato no se encuentra todavía estable aún cuando el proceso de recubrimiento ha finalizado y continúan ciertos cambios físicos y químicos hasta que se alcanza una condición estable. La adhesión de la película puede sufrir marcados cambios durante este tiempo.

Los tres procesos responsables del efecto de envejecimiento generalmente son: reacciones químicas en la interface, difusión a través de la capa interfacial, cambios en la estructura del cristal (recristalización). Estos procesos son fuertemente dependientes de la temperatura a la cual se lleva a cabo el proceso y la rapidez con la que ésta se disipa.

2.8 Fenómeno de difusión entre metales

2.8.1 Difusión

La difusión puede ser definida [18] como el mecanismo por el cual la materia es transportada a través de la materia. En los gases, el movimiento es relativamente veloz. Los movimientos de los átomos en los líquidos son, en general, más lentos que los de los gases. En los sólidos, estos movimientos atómicos quedan restringidos, ya que los enlaces mantienen a los átomos en las posiciones de equilibrio. Sin embargo, las vibraciones térmicas que tienen lugar en los sólidos permiten que algunos átomos se muevan. La difusión de átomos en los metales y aleaciones es particularmente importante si consideramos el hecho de que la mayor parte de las reacciones en estado sólido llevan consigo movimientos atómicos.

P. G. Shewmon [19] señala que en la difusión de aleaciones existen dos factores de principal interés, los cuales son: El cambio en la frecuencia de saltos de los átomos alrededor de los pares deslizantes, y el tipo de fuerzas que causan la atracción entre las dos entidades. Aún con el progreso que se tiene en la medición de estos efectos, todavía no es posible entender en su totalidad el fenómeno con el que se está tratando.

Muchos procesos involucrados en la producción y utilización de materiales en ingeniería están relacionados con la velocidad a la cual los átomos se mueven en estado sólido. En muchos de estos procesos las reacciones ocurren en estado sólido, lo que implica reagrupamientos espontáneos de átomos en nuevas y más estables ordenaciones atómicas. Así, para que esta reacción se lleve a efecto los átomos deben tener suficiente energía para superar una barrera de energía de activación. La energía adicionada para lograr esto es llamada energía de activación **AE**. De acuerdo a la cantidad de energía adicionada se encontrará mayor número de vacíos moleculares [20].

Un cierto número de vacíos en los metales pueden ser generados por deformación plástica del metal, por rápido enfriamiento de altas a bajas temperaturas, y por bombardeo con partículas energéticas (neutrones). Las vacantes pueden intercambiar sus posiciones con las de sus vecinos. Este proceso es importante en la migración o la difusión de átomos en el estado sólido, particularmente a altas temperaturas donde la movilidad de los átomos es mayor. El más bajo empaquetamiento atómico en los bordes de grano, permite una difusión de átomos mayor en esa región.

Como la difusión atómica implica movimientos atómicos, un incremento en la temperatura dará lugar a un incremento en la velocidad de difusión; se ha encontrado experimentalmente que la dependencia de la temperatura con la velocidad de difusión de muchos sistemas se puede expresar por la ecuación de Arrhenius

$$D = D_0 e^{-Q/RT}$$

D= Difusibilidad m^2/s

D_0 = Constante de proporcionalidad, m^2/s , (independiente de la temperatura en el margen para el que esta ecuación es válida)

Q= Energía de activación de las especies en difusión, J/mol o cal/mol

R= Constante molar de los gases = $8,314 \text{ j/(mol k)}$ ó $1.947 \text{ cal / (mol k)}$

T= Temperatura, k

El efecto de la deformación plástica sobre la difusión se encuentra bajo activa investigación. Excesivas vacancias se podrían generar por movimientos de dislocación durante la deformación, incrementando el coeficiente de difusión.

2.8.2 Mecanismo de difusión.

Existen dos mecanismos principales de difusión de los átomos en una estructura cristalina: a) el mecanismo **de** vacantes o sustitucional, y **b)** el mecanismo intersticial.

a) En el mecanismo de difusión por vacante o **sustitucional**, los átomos pueden moverse en las redes cristalinas desde una posición a otra, si hay presente suficiente energía de activación, la cual es proporcionada por vibración térmica de los átomos y si existen vacantes u otros defectos cristalinos en la estructura para que ellos las ocupen. Las vacantes en metales y aleaciones son defectos en equilibrio y contribuyen a que tenga lugar la difusión sustitucional de los átomos. Según va aumentando la temperatura del metal se producirán más vacantes ya que habrá más energía térmica disponible, por tanto, el grado de difusión será mayor a temperaturas más elevadas.

La proporción de átomos de un elemento que pueden disolverse en otro, puede variar desde una fracción de su peso atómico hasta el 100% del mismo. Las condiciones siguientes favorecen la solubilidad cuantitativa de un elemento a otro:

- La diferencia entre los diámetros atómicos de los elementos no debe exceder el 15% mayor de su diámetro.
- La estructura cristalina de los dos elementos debe ser la misma

- No debe haber diferencia apreciable en las electronegatividades de los elementos, a fin de evitar su reacción.
- Los dos elementos deben tener la misma Valencia.

b) El mecanismo de difusión **intersticial** de los átomos en redes cristalinas tiene lugar cuando los átomos se trasladan de un intersticio a otro continuo al primero, sin desplazar permanentemente a ninguno de los átomos de la matriz de la red cristalina. Para que el mecanismo intersticial sea efectivo, el tamaño de los átomos que se difunden debe ser relativamente pequeño comparado con el de los átomos de la matriz. Los átomos pequeños como el de hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y carbono, pueden difundirse intersticialmente en algunas redes cristalinas metálicas, por ejemplo, el carbono puede difundirse intersticialmente en el hierro alfa BCC y hierro gama FCC.

REFERENCIAS.

- [1] Eowden F. and Tabor D, Friction and Lubrication first published (lithography in Great Britain by Latimer Trend 8 Co. Ltd., Whitstable 1956) pp 2-4
- [2] Eowden F. and Tabor D, The Friction and Lubrication of Solids first published (lithography in Great Britain at The University Press, Oxford, part I, 1950) pp 105-111
- [3] Eowden F. and Tabor D, 1956: op. cit., p 44
- [4] Bowden F. and Tabor D, The Friction and Lubrication of Solids first published (lithography in Great Britain at The University Press, Oxford, part I, part II 1950 and 1964) Part I, Chapter II, part II, Chapter XXII.
- 151 Krafft M. Joseph "Surface Friction in Ballistic Penetration" (en: J. Appl. Phys. 26.10, October 1955) p.1248
- [6] Bowden F. and Tabor D, 1956: op. cit., p 52

- [7] Beilby Sir George, "Aggregation and Flow de Solids", 1st ed. London, Macmillan & Co.
- [8] Bowden F. and Tabor D, 1956: op. *cit.*, p 54
- [9] Kraffl M. Joseph: op cit.
- [10] Bowden F. and Tabor D, 1956: op. *cit.*, pp 61-64
- [11] Bowden F. and Tabor D, op. *cit.*, part I, Chapter I, part II, Chapter I.
- [12] Sarkar A D, Desaaste de Metales, Edit. Noriega Limusa, 1990
- [13] Bowden F. and Tabor D, 1956: op. *cit.*, p 20
- [14] Johnson K. L., "Note on the Adhesion of Elastic Bodies", (en: J.Appl. Phvs., 9, 1958) pp.199-200
- [15] Fuller D. D., "Theory and Practice of Lubrication for Engineers" Wiley, New York. 1956.
- [16] Greenwood, J. A. and J. B. Williamson "Contact of Nominally Flat Surfaces" (en: Proc. R. Soc. London. A, 295,1966) p. 300
- [17] Pulker H.K. and Perry A.J. "Adhesión". (en: Surface Technology, 14, 1981) pp 25-39.
- [18] Smith W F, Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería en Materiales, segunda edición. Edit. McGraw Hill, 1993, pp 141-172
- [19] Shewmon G P and Winslow R F "Diffusion in Metals", (en: An Chemical Enaineering Fundamentals Review, Vol.52, No.4 April 1960) pp 343-346
- [20] Smith W F: op cit.

CAPÍTULO III

3. DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO PARA LA REALIZACIÓN DE RECUBRIMIENTOS POR EL PROCESO DE DEPOSICIÓN POR TRIBOADHESIÓN.

3.1. Introducción

El proceso de recubrimientos por triboadhesión está influenciado principalmente por la velocidad de giro de la fresa, velocidad de avance del sustrato, cantidad de flujo másico de polvo y fuerza de contacto entre la fresa y el sustrato. De acuerdo a lo anterior, y dado que se pretende aplicar la técnica de triboadhesión a superficies curvas, el principal objetivo de este trabajo consistió en diseñar un dispositivo que se ajustara a las condiciones requeridas. La máquina que se diseñó consiste esencialmente de: un dispositivo para alimentar polvos de material de recubrimiento, un motor que transmita el movimiento a un disco que gire entre 11,000 y 30,000 r.p.m. y un sistema que proporcione el giro a la superficie que va a ser recubierta. En el presente capítulo se muestra el diseño y funcionamiento de los componentes del dispositivo de deposición sobre superficies curvas.

3.2 Descripción del dispositivo de deposición

Los componentes principales del dispositivo para la deposición por triboadhesión sobre superficies curvas se presentan en forma esquemática en la figura 3.1. Se puede observar que consta principalmente de: a) disco de recubrimiento, b)

sistema de rotación del sustrato, c) sistema de rotación de la fresa, d) sistema de medición de la fuerza que se ejerce en el sustrato y e) sistema de alimentación de material de aporte. Cada uno de los sistemas anteriores se compone a su vez de diversos elementos. El arreglo general del dispositivo se muestra en la fotografía 3.1

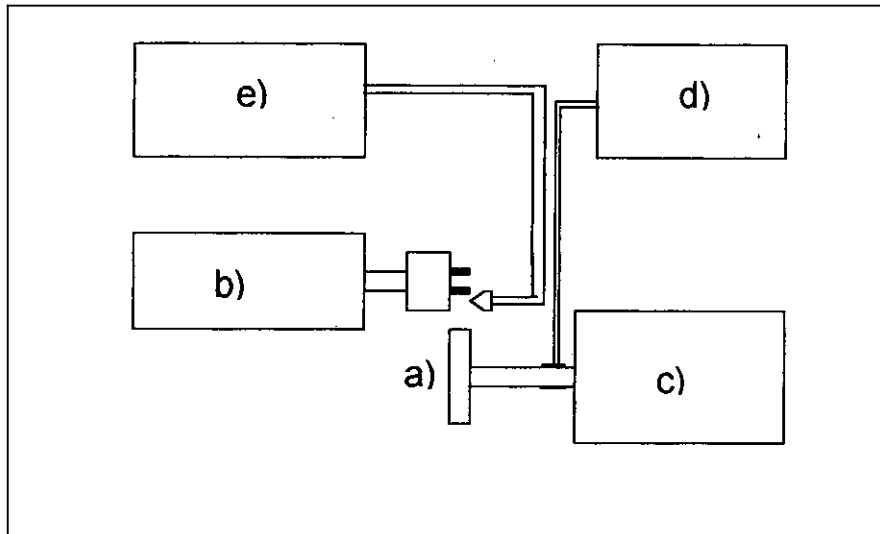
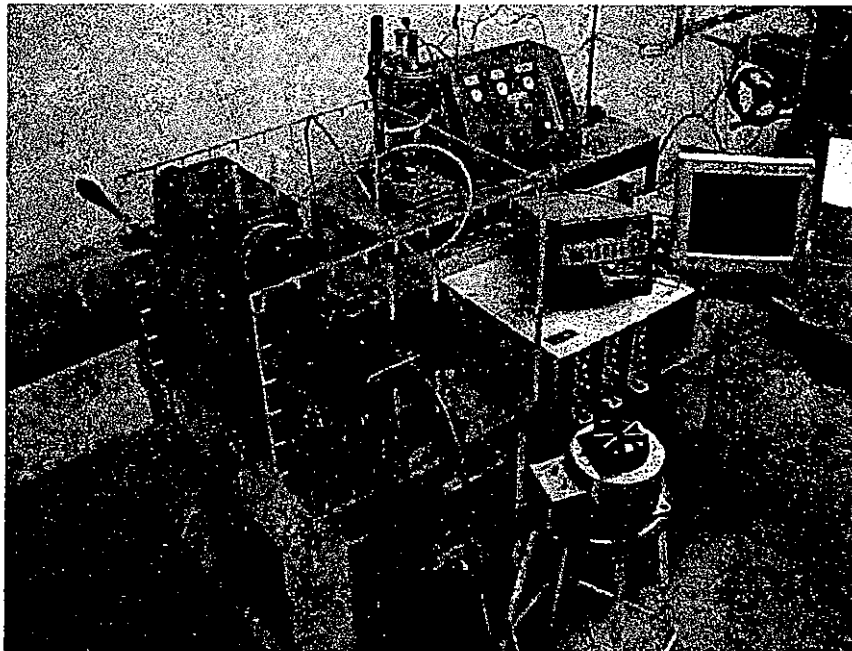


Figura 3.1 Esquema del dispositivo de deposición sobre superficies curvas.

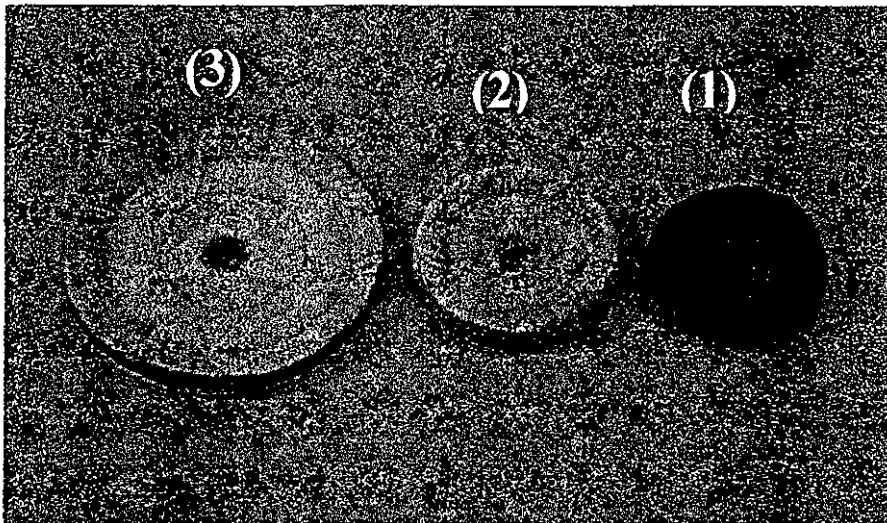


Fotografía 3.1. Máquina diseñada para el proceso de deposición por triboadhesión sobre superficies curvas

3.2.1 Disco de recubrimiento (fresa)

En la fotografía 3.2 se presentan las fresas elaboradas en tela 100% algodón. Las fresas 1 y 2 se elaboraron con un diámetro de 80 mm y constan de 25 capas de tela unidas con adhesivo y reforzadas por medio de costuras circulares. Las fibras tejidas dentro de los últimos 10mm de radio fueron deshiladas.

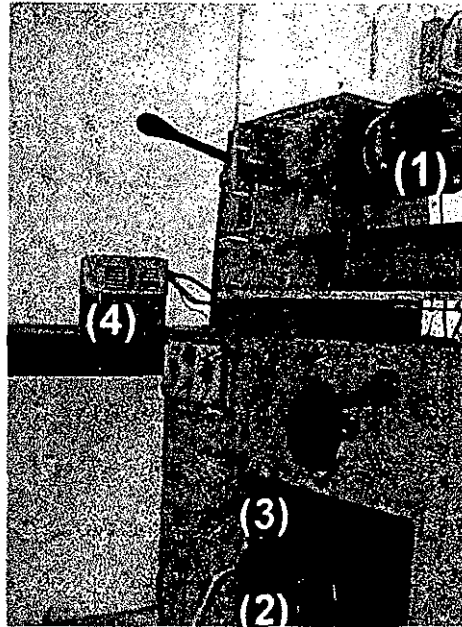
La fresa número 3 se elaboró con un diámetro de 120 mm y 18 capas de tela; las fibras fueron deshiladas los últimos 15 mm de radio.



Fotografía 3.2. Fresas utilizadas para la realización de los recubrimientos

3.2.2 Sistema de rotación del sustrato.

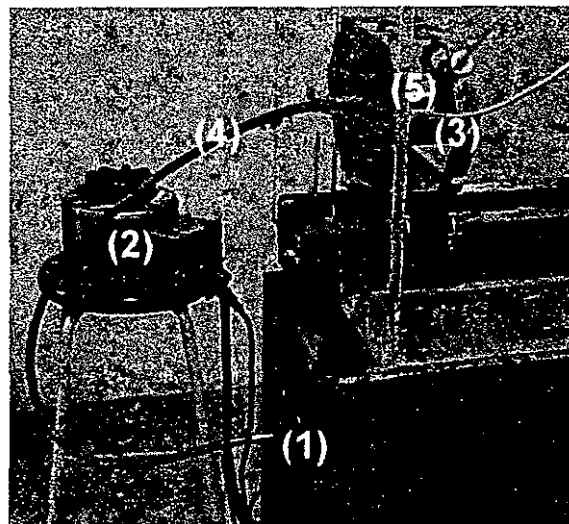
El sistema que se implementó para proporcionar el movimiento de rotación al sustrato, se montó sobre la base de un torno revólver, como se puede apreciar en la fotografía 3.3. La forma de sujeción del sustrato se realizó mediante el acoplamiento de un mandril (1), con el que se tiene auto-alineación de la pieza. La transmisión de la potencia, se suministra por un motor de 5hp (2). Se implementó un reductor (3) y un variador de velocidad (4), para el control de la velocidad de rotación del sustrato. El rango de velocidades del sistema es de 4.75 a 3600 r.p.m.



Fotografía 3.3. Sistema de rotación del sustrato

3.2.3 Sistema de rotación de la fresa

En la fotografía 3.4 se pueden ver los componentes del sistema de rotación de la fresa. Aquí la potencia se transmite a través de un motor de 1hp, que posee una velocidad de giro de 30000 r.p.m. (1). La velocidad de giro del motor se regula mediante una resistencia variable (2). El rango de velocidad de rotación de la fresa es de 0 a 30000 r.p.m..

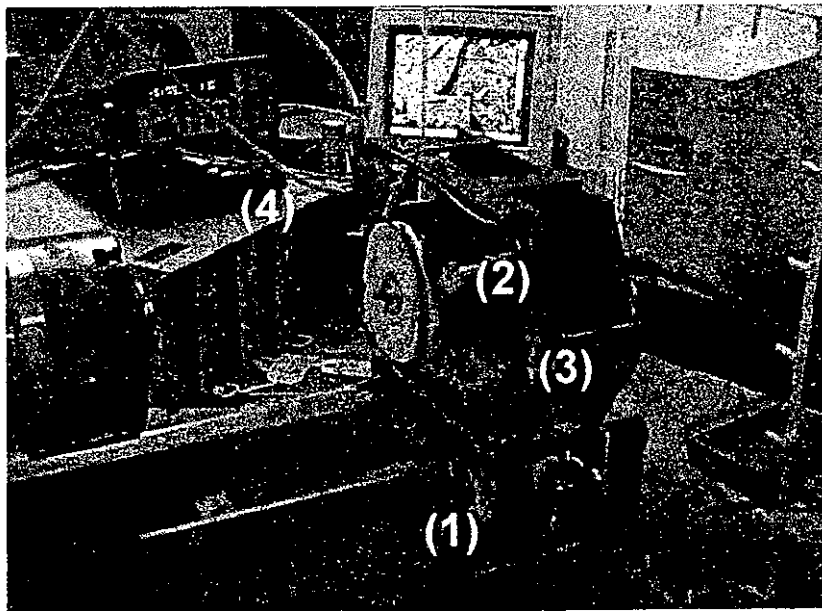


Fotografía 3.4 Sistema de rotación de la fresa

La transmisión del movimiento de giro del motor a la fresa (3), se logra mediante una flecha flexible (4), y una flecha transmisora (5), que se localiza en el interior del sensor de fuerza. Con este arreglo se evita que las vibraciones propias del motor interfieran con la medición de la fuerza que se ejerce sobre el sustrato.

3.2.4 Sistema de medición de la fuerza que se ejerce en el sustrato.

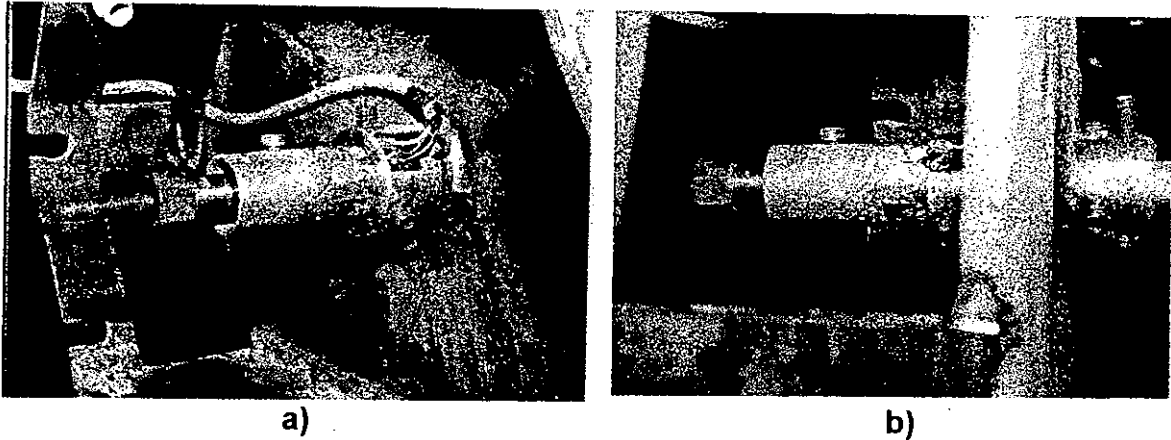
Como se puede observar en la fotografía 3.5 la fuerza que se ejerce en el sustrato se aplica en forma horizontal mediante un sistema de desplazamiento de tornillo sin fin (1). El sistema de medición de la fuerza cuenta con un sensor tipo viga fabricado en aluminio que funciona como cantiliver (2), un marco base de sujeción (3) y un sistema adquireedor de datos (4).



Fotografía 3.5. Componentes del sistema de medición de la fuerza que se ejerce sobre el sustrato

3.2.4.1 Sensor de fuerza

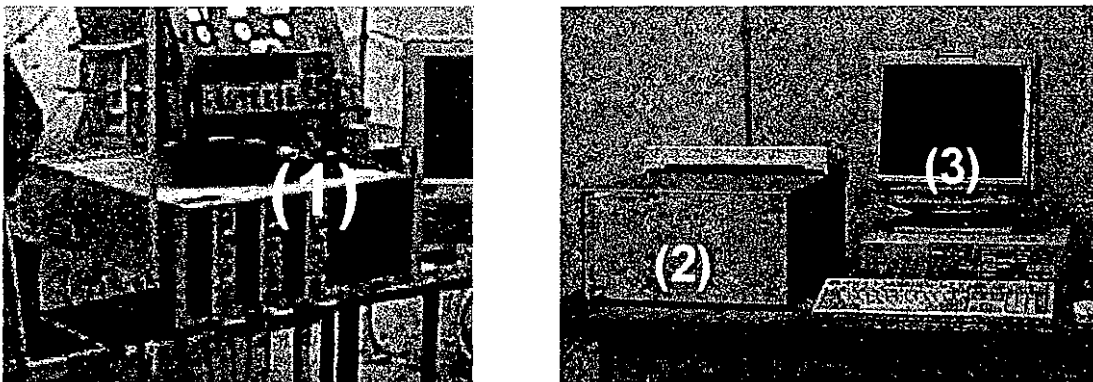
Dentro de los diseños de sensores de fuerza (transductores) se seleccionó el tipo viga ya que su sensibilidad se presenta solo a cargas de flexión. En la fotografía 3.6 se aprecia el montaje del transductor. El diseño, Cálculos y calibración se presentan en el apéndice A.



Fotografía 3.6. Montaje del transductor. a) vista frontal, b) vista lateral.

3.2.4.2 Sistema adquisidor de datos

En general, los transductores proporcionan la medida de la fuerza en forma de mV, por lo que esta señal se tiene que amplificar y procesar. En la fotografía 3.7 se muestra el sistema adquisidor de datos que se utilizó en este caso en particular. El sistema consta de un amplificador de señales modelo 2210 marca Measurement Group (1), un analizador de espectros HP modelo 3566, con una frecuencia de muestreo de 0-12.8 kHz y 8 canales disponibles (2) y una computadora personal Hewlet Pacard (3).



Fotografía 3.7 Sistema adquisidor de datos.

3.2.5 Diseño del sistema de alimentación del material de aporte.

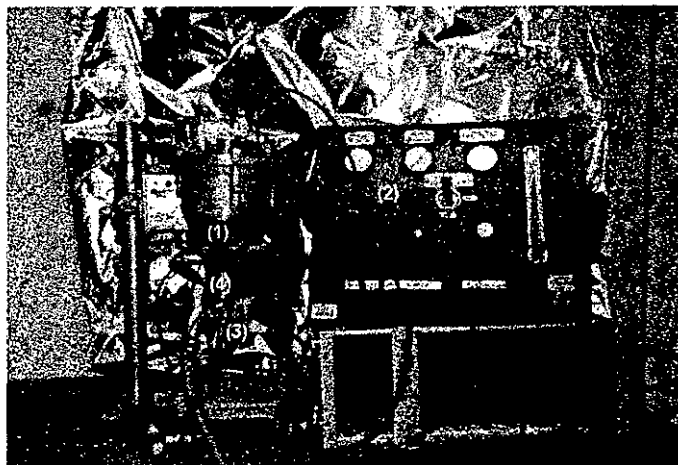
3.2.5.1 Descripción del dispositivo alimentador (dosificador)

La unidad alimentadora de polvos, es un sistema que utiliza como principio de funcionamiento la gravedad, diferencia de presión, fuerza mecánica de vibración y un fluido de trabajo, que en este caso es aire comprimido.

Algunas de las características son:

- Variación de la velocidad de salida del polvo.
- Rápida desconexión del contenedor.
- Porcentajes de alimentación precisos por largos periodos de tiempo.
- Facilidad en el mantenimiento y accesibilidad a todos los componentes
- Tapa transparente para observar el nivel de polvos.
- Capacidad de manejo de una diversificación de tamaños de polvos.
- Variación del porcentaje de alimentación de polvos.

El sistema dosificador de polvos como se puede observar en la fotografía 3.8, esta compuesto principalmente de: contenedor de polvos (1), gabinete de control (2), motor vibrador (3) y flecha de arrastre de polvos (4). Cada uno de los elementos del dispositivo juega un papel importante para lograr alimentación constante.



Fotografía 3.8. Unidad alimentadora: (1) contenedor de polvos, (2) gabinete de control, (3) motor vibrador y (4) flecha de arrastre de polvos.

3.2.5.2 Principio de operación del dosificador

En la figura 3.2 se muestra un esquema general del sistema dosificador de polvos, el cual consiste básicamente de: a) Circuito alimentador de aire, b) Circuito de aire en el contenedor y c) Circuito de arrastre.

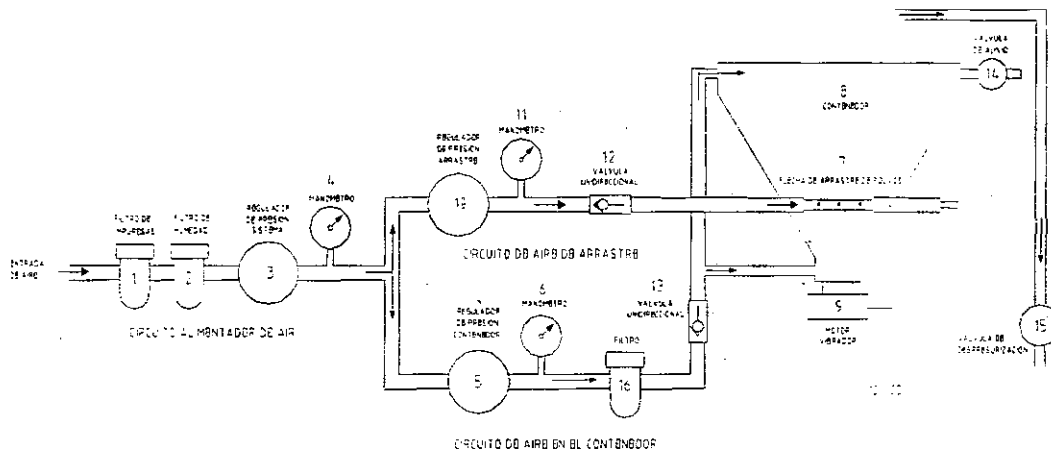


Figura 3.2. Esquema general de sistema dosificador de polvos.

a) Circuito alimentador de aire

El aire comprimido, se suministra por un compresor de 5 HP. Con la finalidad de eliminar impurezas y humedad del aire de alimentación, se tienen dos filtros (1) y (2) en la entrada del circuito alimentador de aire. El sistema dosificador de polvos opera con una presión de aire de alimentación inferior a la presión que suministra el compresor, por lo que mediante una valvula reguladora de presión (3) se puede variar la presión del aire del sistema a un valor deseado, la presión seleccionada se registra en el manómetro (4). Aquí, el flujo de aire de alimentación se divide en dos circuitos: Circuito de aire en el contenedor y Circuito de arrastre.

b) Circuito de aire en el contenedor

El circuito de aire en el contenedor tiene como objetivo presurizar el contenedor (8) e inyectar polvo en el interior de la flecha de arrastre (7). Para esto, se cuenta con una válvula reguladora de presión (5) que tiene como finalidad reducir la presión del aire de alimentación, la presión en el interior del Circuito de aire del

contenedor se registra por el manómetro (6). Para evitar aglomeraciones de polvo a causa de la humedad del aire, éste se filtra (16) antes de presurizar el contenedor (8). Nótese en la figura 3.2 que el contenedor se presuriza tanto en la parte superior como en la parte inferior, con lo que se logra inyectar partículas de polvo en el interior de la flecha de arrastre, esto es posible ya que la flecha de arrastre contiene pequeños orificios sobre su superficie. El porcentaje de alimentación de polvo que se inyecta en el interior de la flecha de arrastre es directamente proporcional a la presión existente en el contenedor, por lo que la válvula reguladora de presión (5) también se utiliza para controlar el porcentaje de alimentación de polvo.

Para asegurar un control adecuado del suministro de polvo en la flecha de arrastre, es indispensable mantener en movimiento constante el polvo en el interior del contenedor, lo que se logra con un excitador (9) que se encuentra sujeto en la parte inferior del contenedor. El motor se alimenta por una fuente de corriente directa de 12 V y debe permanecer en funcionamiento mientras el sistema dosificador esté en operación. Para desactivar la alimentación de polvo se instaló una válvula de esfera (15) que se utiliza para despresurizar el contenedor, esta válvula debe permanecer cerrada mientras el sistema dosificador se encuentra en funcionamiento

Como medida de seguridad, el contenedor cuenta con una válvula de alivio (14), que está calibrada para soportar una presión máxima de 14 kg/cm².

c) Circuito de arrastre

El objetivo del circuito de arrastre es suministrar el aire para transportar el polvo que se encuentra en el interior de la flecha de arrastre hasta la boquilla de inyección de polvos. Para que exista flujo de polvo la presión de aire en el circuito de arrastre debe ser inferior a la presión existente en el contenedor, por lo que ésta se controla por la válvula (10) y se registra en el manómetro (11). La válvula unidireccional (12) no permite que el flujo de polvo fluya en sentido contrario, cuando existiese un aumento en la presión exterior del sistema.

CAPÍTULO IV

4. PROCEDIMIENTO DE DEPOSICIÓN Y PRUEBAS EXPERIMENTALES

4.1 introducción

En este capítulo se describe la metodología para la aplicación de recubrimientos por triboadhesión sobre superficies curvas, así como las pruebas de laboratorio, su análisis y discusión. Las pruebas experimentales se llevaron a cabo utilizando dos tipos de material de aporte: diamante sintético y una aleación en polvo de hierro con un 75% de silicio (Fe-75Si). El tamaño de partícula del primero es de 2-10 μ m y del segundo de 0-60 μ m. El polvo de diamante se aplicó a sustratos de cobre y acero para rodamientos. El Fe-75Si se utilizó para recubrir sustratos de acero inoxidable AISI 304. El análisis de los recubrimientos se realizó mediante el empleo de microscopía óptica y de barrido electrónico.

4.2 Pruebas experimentales

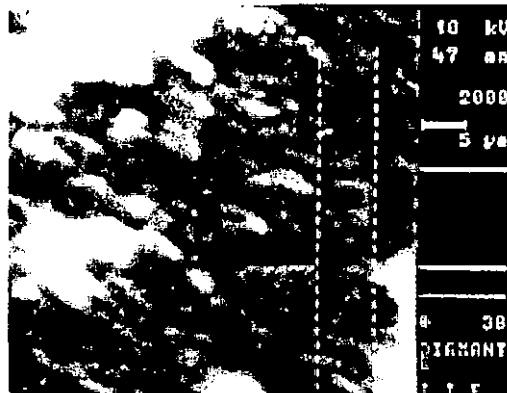
4.2.1 Selección del material de aporte

Cuando se realiza un recubrimiento, la selección del material de aporte se efectúa en función de las propiedades que se requieren en la superficie del sustrato. En el caso de rodamientos, el desgaste depende en gran medida del coeficiente de fricción y la dureza. Con esto en mente, el diamante con una dureza de 10 en escala Mohs (7000 knoop) y un coeficiente de fricción que oscila de 0.05 a 0.1 ofrece las características requeridas para reducir la fricción e incrementar la dureza superficial del metal, con lo que se consigue incrementar la vida útil del sustrato.

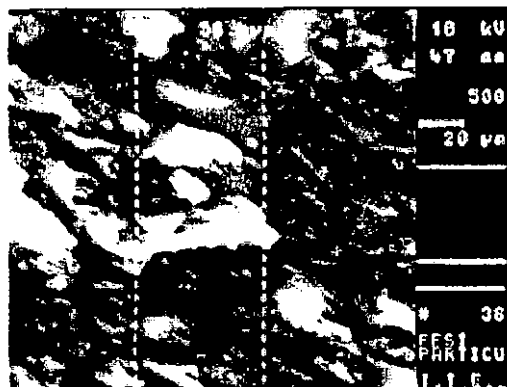
Por otra parte, el hierro-silicio (Fe-75Si) es un material con propiedades anticorrosivas y se emplea para recubrir tubos de caldera fabricados en acero

inoxidable. La deposición del Fe-75Si sobre acero inoxidable se realiza mediante la técnica de proyección térmica de polvo por flama, y para lograrlo eficientemente se requiere la aplicación de una capa de anclaje de níquel-cromo (Ni-20Cr). Considerando el potencial de la técnica de triboadhesión, la aplicación de Fe-75Si se realizó con el objetivo de valorar la capacidad de este proceso para depositar Fe-75Si sobre acero inoxidable AISI 304 sin utilizar una capa de anclaje.

En trabajos anteriores [1], se observó que con tamaños de partículas inferiores a 60 micras, la formación del recubrimiento se favorece; esto concuerda con William F. Smith [2], quien menciona que “El tamaño atómico tiene efecto en el fenómeno de difusión en aleaciones metálicas”. Tomando en cuenta lo anterior y dados los tamaños de partícula que se encuentran comercialmente [3], se seleccionó un tamaño de partícula de 2 a 10 micras para el diamante y de 20 a 60 micras para el Fe-75Si; micrografías 4.1 y 4.2 respectivamente.



Micrografía 4.1. Aspecto y tamaño de partícula de diamante (2000 X).



Micrografía 4.2. Aspecto y tamaño de partícula de la aleación Fe-75Si (500 X).

4.2.2 Selección del material base

En el presente trabajo se seleccionaron tres tipos de sustratos: acero para rodamientos, acero inoxidable AISI 304 y cobre. El primero fue suministrado por la compañía SKF de México, mediante un convenio de cooperación para evaluar la técnica de triboadhesión en sus rodamientos. El acero inoxidable AISI 304 se seleccionó, para determinar la capacidad de deposición de Fe-75Si sobre éste.

El cobre se eligió por ser un material donde la presencia de carbono (diamante) es fácilmente detectable, además de poseer un bajo punto de fusión (1083 °C). Por otra parte, el hecho de que el cobre no forme carburos produce una débil adhesión de la película de diamante cuando se aplica por la técnica CVD [4]. El método que se emplea comúnmente para recubrir cobre con diamante es aplicar una película intermedia de algunos materiales tales como: Si, Mo y Ti, los cuales sí forman carburos; por tanto, eliminar esta capa intermedia y poder aplicar el recubrimiento sobre la superficie del cobre traería numerosas ventajas. Actualmente, uno de los principales obstáculos que impiden realizar el recubrimiento de diamante en cobre por CVD son los altos esfuerzos térmicos que se inducen en la película de diamante, a causa de la diferencia entre los coeficientes de expansión del diamante y del cobre.

4.2.3 Desarrollo de las pruebas experimentales

El proceso de recubrimientos mediante la técnica de triboadhesión aplicado a superficies curvas, está influenciado principalmente por los siguientes parámetros: velocidad de rotación del sustrato y de la fresa, flujo másico de polvo, fuerza ejercida entre la fresa y el sustrato, así como el tiempo de contacto entre el sustrato y la fresa (con alimentación de material de aporte). Los parámetros antes mencionados están en función tanto del material base como del material de aporte.

4.2.3.1 Deposición de diamante sobre cobre

En la tabla 4.1 se muestran los parámetros que se seleccionaron en las pruebas de deposición de diamante sobre cobre. En éstas, se modificó la fuerza aplicada entre la fresa y el sustrato, así como el sentido de rotación de los mismos, manteniendo constantes los parámetros restantes, a excepción de las pruebas 4 y 5, donde se eliminó la alimentación del material de aporte, esto con el objetivo de establecer diferencias entre un proceso de pulido y uno de deposición.

Tabla 4.1 Condiciones de prueba de los recubrimientos de diamante sobre cobre

No	Velocidad de giro de la fresa (r.p.m.)	Velocidad de giro del sustrato (r.p.m.)	Cantidad aproximada de polvo suministrado (gr/min)	Fuerza promedio entre la fresa y el sustrato * (N)	Giro del sustrato	Tiempo de prueba (seg.)	Valoración visual del recubrimiento después de frotado en agua	Observaciones
1	22,000	4.75	1	0.6	2	60	Nulo	Sin recubrimiento
2	22,000	4.75	1	0.73	1	60	Intermitente	Cabeceo en el giro del sustrato
3	22,000	4.75	1	0.908	1	60	Bueno	Las puntas de la fresa se tornaron negras
4	22,000	4.75	Sin polvo	1.19	11	60	Nulo	No existió cambio apreciable en la tonalidad. la fuerza fue pequeña.
5	22,000	4.75	Sin polvo	1.5	1	60	Nulo	Si se marw la franja. pero se tomo un poco opaco

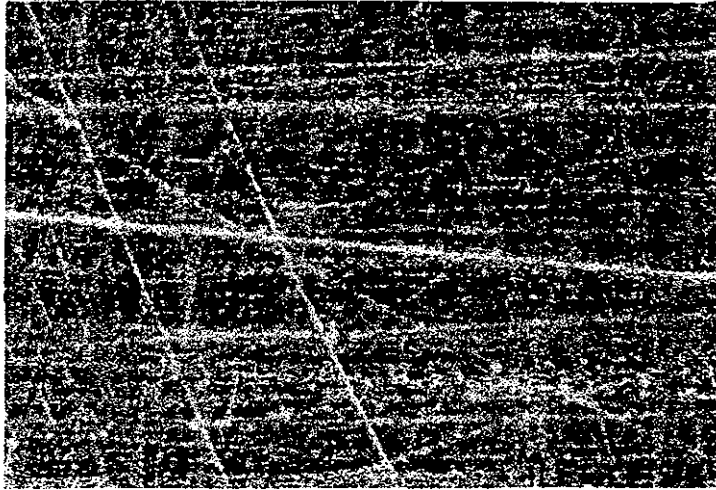
2. mismo sentido que la fresa
 *Análisis de fuerza apéndice C

En general, se observó la presencia de recubrimiento cuando el sentido de giro del sustrato es contrario al de la fresa. Los recubrimientos que se obtuvieron presentaron un cambio de tonalidad en la superficie, perceptible a simple vista, ya que en la presencia de recubrimiento la superficie se torna brillante.

4.2.3.1.1 Análisis por Microscopía Óptica

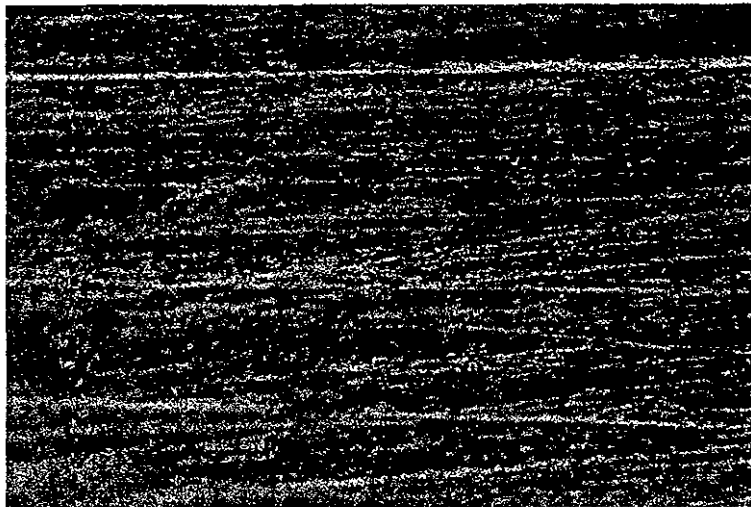
Las pruebas de la tabla 4.1 se analizaron mediante microscopía óptica, para establecer diferencias en la morfología de los recubrimientos.

Antes del análisis con el microscopio óptico, las probetas con recubrimiento se frotaron con algodón y agua abundante, con lo que se logró eliminar el material no depositado. La micrografía 4.3 muestra el sustrato sin recubrimiento a 800 aumentos. La superficie del material presenta un rayado en dirección aleatoria, **esto** a causa de la abrasión que se generó al lijar el material base, para eliminar residuos grasos y de Óxido antes del proceso de deposición.



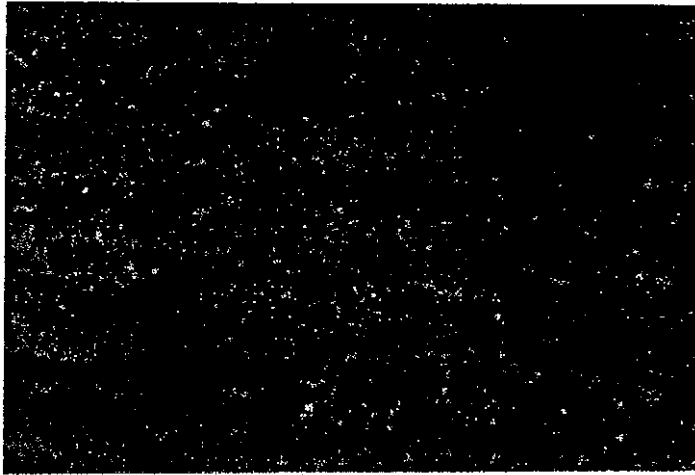
Micrografía 4.3. Substrato de cobre sin recubrimiento a 800 aumentos

En la micrografía **4.4** se muestra la superficie de cobre después que se realizó el pulido (prueba **4**), en esta se aprecia que las líneas de abrasión que inicialmente se observaron en la micrografía 4.3 se conservan, pero en menor escala.



Micrografía 4.4. Superficie de cobre a 800 aumentos después que se realizó la prueba sin alimentación de polvo (prueba 4, tabla 4.1)

En contraste con las micrografías 4.3 y 4.4, en la micrografía 4.5 se muestra el sustrato con recubrimiento (prueba número 3). Se puede apreciar que el rayado inicial del material desaparece completamente, y en su lugar se observa una superficie de aspecto arenoso, y se infiere que se debe a la deposición de material de aporte sobre la superficie del material base.



Micrografía 4.5. Recubrimiento de diamante sobre el sustrato de cobre (800 aumentos prueba No 3 en la tabla 4.1).

4.2.3.1.2 Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM)

Se utilizó un microscopio de barrido electrónico marca ZEISS-960 y un sistema de microanálisis EDAX acoplado al microscopio. Se seleccionó el recubrimiento que se obtuvo en la prueba número 3 (tabla 4.1), ya que presentó mejores características en el análisis por microscopía óptica. A menos que se especifique en forma particular, en lo sucesivo las micrografías que se muestran en esta sección corresponden al recubrimiento logrado en la prueba antes mencionada.

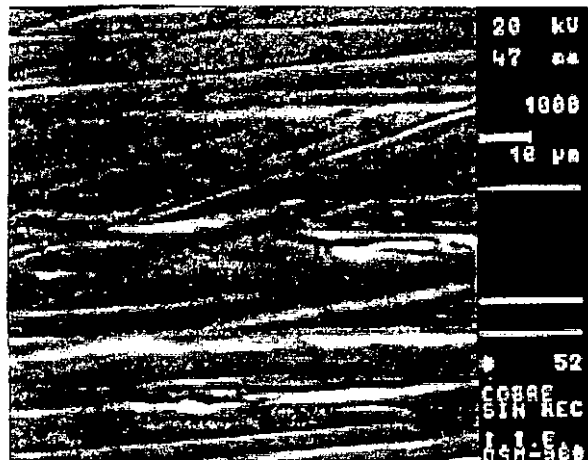
Se llevaron a **cabo dos** tipos de análisis tanto en forma superficial como transversal:

- a) *Morfológico*, para determinar los aspectos y cambios en morfología de la superficie analizada.
- b) Microanálisis, para determinar los elementos químicos presentes (espectro de rayos **X**), la cantidad y distribución (mapeo de elementos) de éstos.

Análisis superficial.

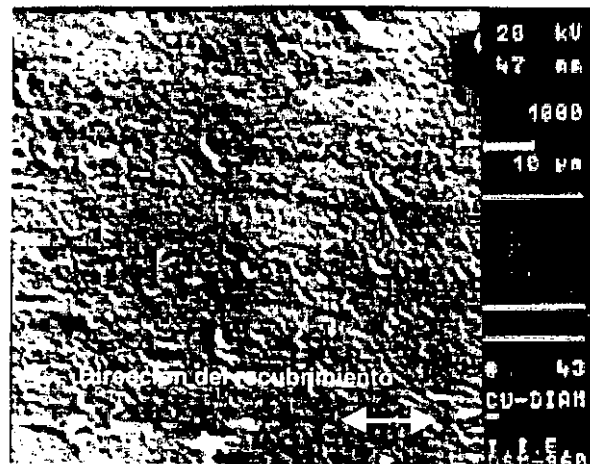
Análisis morfológico

Se efectuó el análisis de la superficie de cobre sin recubrimiento. En la micrografía 4.6 se observa al igual que en la micrografía 4.3 el acabado superficial del substrato de cobre.



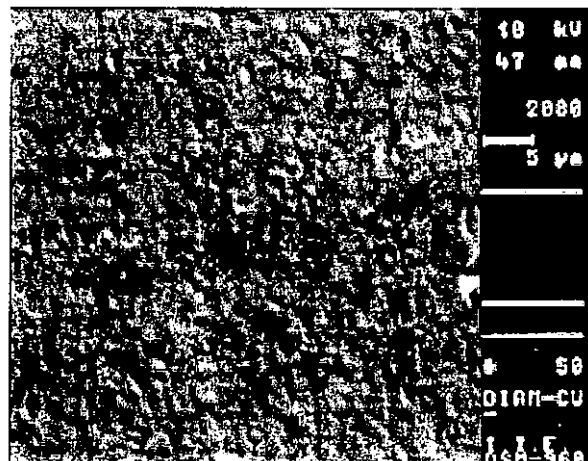
Micrografía 4.6. Substrato de cobre sin recubrimiento a 1000 aumentos

La micrografía 4.7 muestra la superficie de cobre con recubrimiento a 1000 aumentos. Se observa que el aspecto y la morfología sufrió un cambio radical ya que las líneas del acabado que se observaron en la micrografía 4.6 desaparecieron, y en su lugar existe una superficie que asemeja una cáscara de melón. Se detectó la formación de cavidades originadas por los impactos de las partículas de diamante sobre el material base, lo que muestra que parte del proceso de recubrimiento es influenciado por un proceso mecánico, ya que las partículas impactan sobre la superficie con una gran energía cinética, la cual es capaz de rasgar y deformar la superficie del material base.



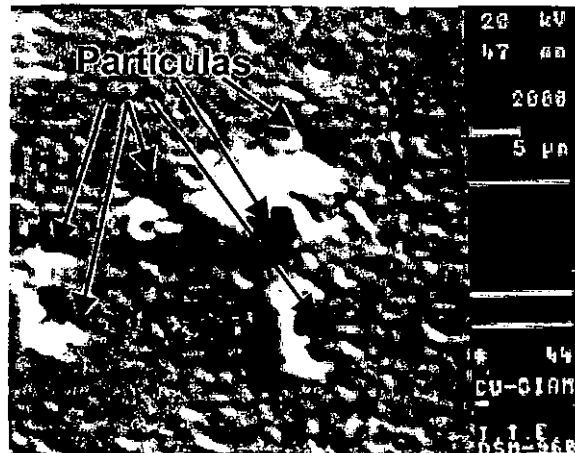
Micrografía 4.7. Recubrimiento sobre la superficie de cobre, la cual muestra los impactos de las partículas durante el proceso de recubrimiento

La micrografía 4.8 presenta una ampliación a 2000 aumentos de la parte superior de la micrografía 4.7. Se observa la superficie con granos (puntos negros) en distintos tamaños, con lo que se infiere que se tratan de partículas atrapadas en la matriz de cobre.



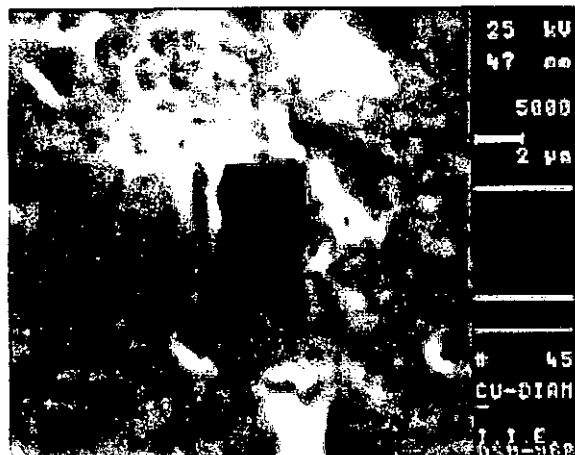
Micrografía 4.8. Recubrimiento sobre la superficie de cobre a 2000 aumentos

Por otra parte, la micrografía 4.9 muestra una ampliación a 2000 aumentos de las cavidades de mayor tamaño que se encontraron en la micrografía 4.7. Se comprueba la presencia de partículas adheridas a la superficie del material base. No se encontraron partículas de tamaño mayor a 5 micras, lo que se puede explicar por dos razones: 1) las partículas se fraccionaron, o 2) el aumento en energía cinética de las partículas de mayor tamaño, causa que éstas sólo colisionen y reboten sobre la superficie.



Micrografía 4.9. Recubrimiento sobre la superficie de cobre, presenta una concentración de partículas de tamaño menores a 5 micras.

Para poder observar la forma de unión de las partículas que se detectaron en la micrografía 4.9 se realizó una ampliación a 5000 aumentos (micrografía 4.10). Se observa que la partícula se encuentra embebida sobre una superficie totalmente deformada hasta una profundidad igual al tamaño de la partícula, ya que se aprecia el resalte de material base en la frontera o perfil de la misma

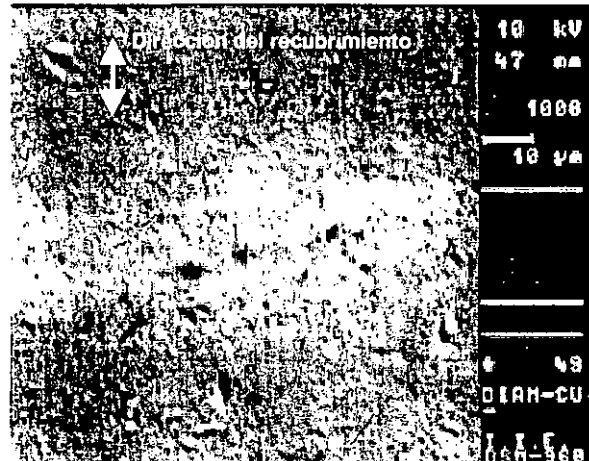


Micrografía 4.10 Recubrimiento sobre la superficie de cobre. Se observa la presencia de una partícula embebida totalmente en el material base.

De lo anterior, se puede decir que las partículas golpean contra la superficie del substrato quedando sujetas por las fuerzas de adhesión, por lo que se deduce que en partículas menores a un tamaño crítico existe mayor probabilidad de que éstas queden atrapadas, lo que concuerda con Rabinowicz [5], quien encontró, que para uniones menores a un tamaño crítico, los efectos de superficie influyen de manera

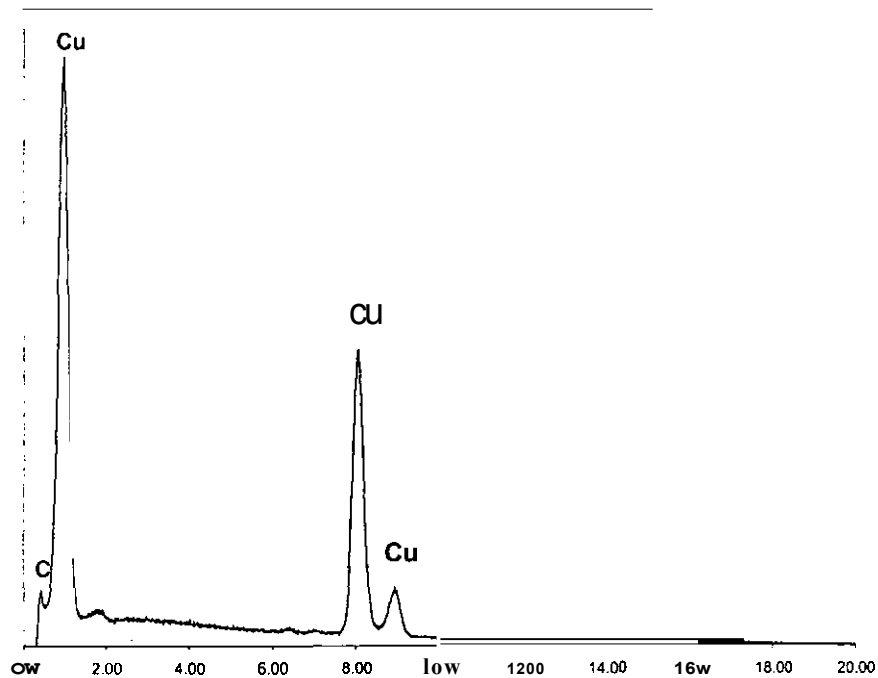
positiva en las fuerzas de adhesión entre las asperezas de las dos superficies en contacto.

b) Microanálisis. La micrografía 4.11 muestra una superficie con gran cantidad de partículas de diamante, en gran variedad de tamaños.



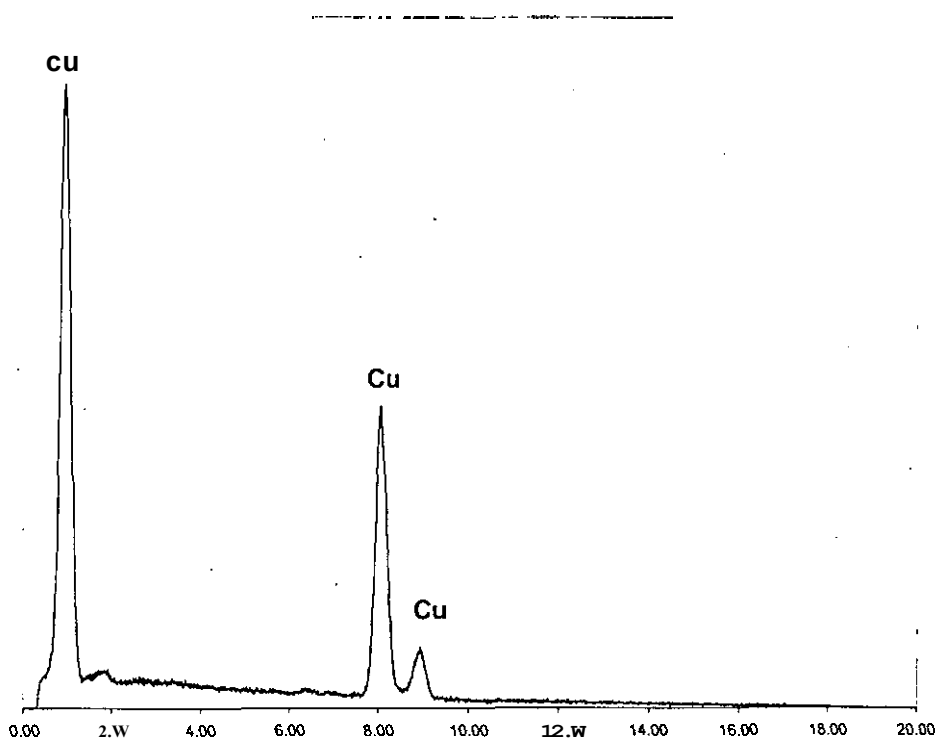
Micrografía 4.11 Recubrimiento sobre la superficie de cobre a 1000 aumentos.

En la gráfica 4.1 se presenta el espectro de rayos x correspondiente a la micrografía 4.11, en éste se observa un pico de carbono, elemento que indica la presencia de diamante en la superficie del cobre.



Gráfica 4.1. Espectro de rayos x del recubrimiento de diamante en cobre correspondiente a la micrografía 4.11.

Por otra parte, los elementos componentes del material base, se muestran en el espectro de la gráfica 4.2. Se puede observar de la comparación de las gráficas 4.1 y 4.2 que en la segunda no existe presencia de carbono, de lo que se deduce, que el carbono indica la presencia de diamante depositado sobre el sustrato de cobre.

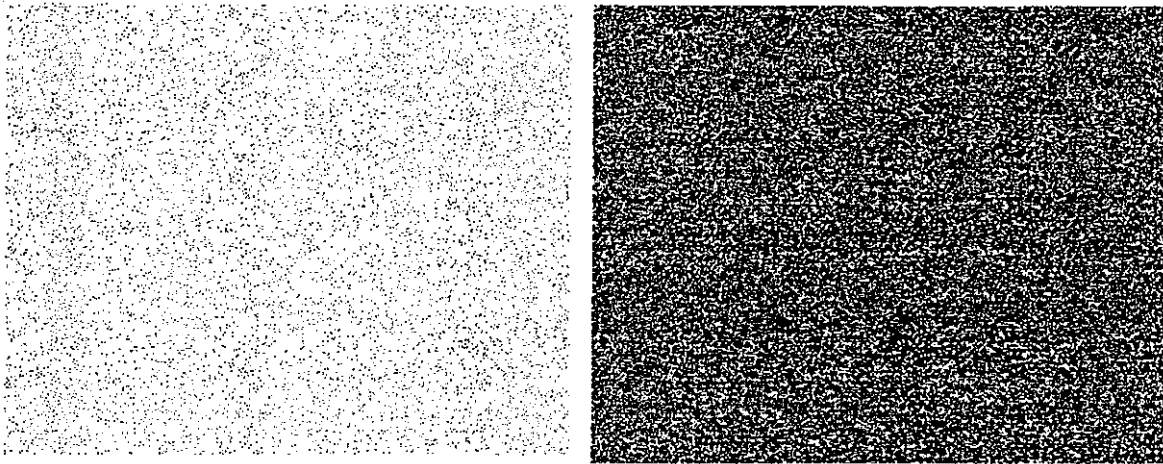


Gráfica 4.2. Espectro de rayos x del sustrato de cobre sin recubrimiento.

El mapeo de elementos se efectuó sobre la superficie con recubrimiento que se observa en la micrografía 4.11. Se realizó un mapeo para detectar cobre (Cu) y otro para carbono (C), micrografías 4.12a y 4.12b respectivamente.

Se puede observar de la micrografía 4.12a la distribución de cobre sobre la superficie en forma de píxeles o puntos negros. La micrografía 4.12b presenta la distribución de diamante sobre la superficie, en la cual se aprecia una superficie totalmente recubierta con concentración de puntos en las regiones donde se encuentran partículas de mayor tamaño.

Es importante resaltar que aún en las partes donde mediante el análisis morfológico (micrografía 4.11) no fue posible observar partículas, se encuentra alguna cantidad considerable de carbono, lo cual es muestra de la existencia de partículas de tamaños del orden de micras y/o nanómetros.



a)

b)

Micrografía 4.12 Mapeo correspondiente a la micrografía 4.11.
a) mapeo de cobre. b) mapeo de carbono.

El resultado del *análisis cuantitativo de elementos* se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Porcentaje de elementos en la probeta con recubrimiento

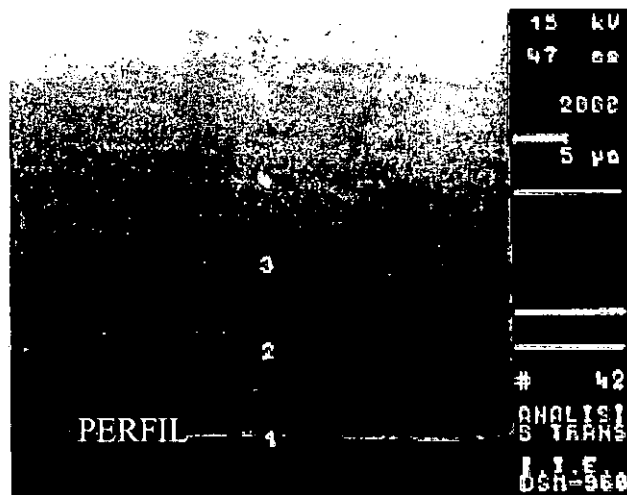
Elemento	W %	A %
C	16.72	47.66
Cu	83.28	52.34
Total	100.00	100.00

En la tabla 4.2, la segunda columna muestra el porcentaje en peso que ocupan los elementos en el área analizada, mientras que la tercera columna representa el porcentaje atómico de los elementos en la misma área. Se puede observar que para este caso existe un porcentaje en peso de carbono depositado de casi un 17% y de acuerdo con el análisis de mapeo de elementos, se encuentra uniformemente distribuido en toda la superficie.

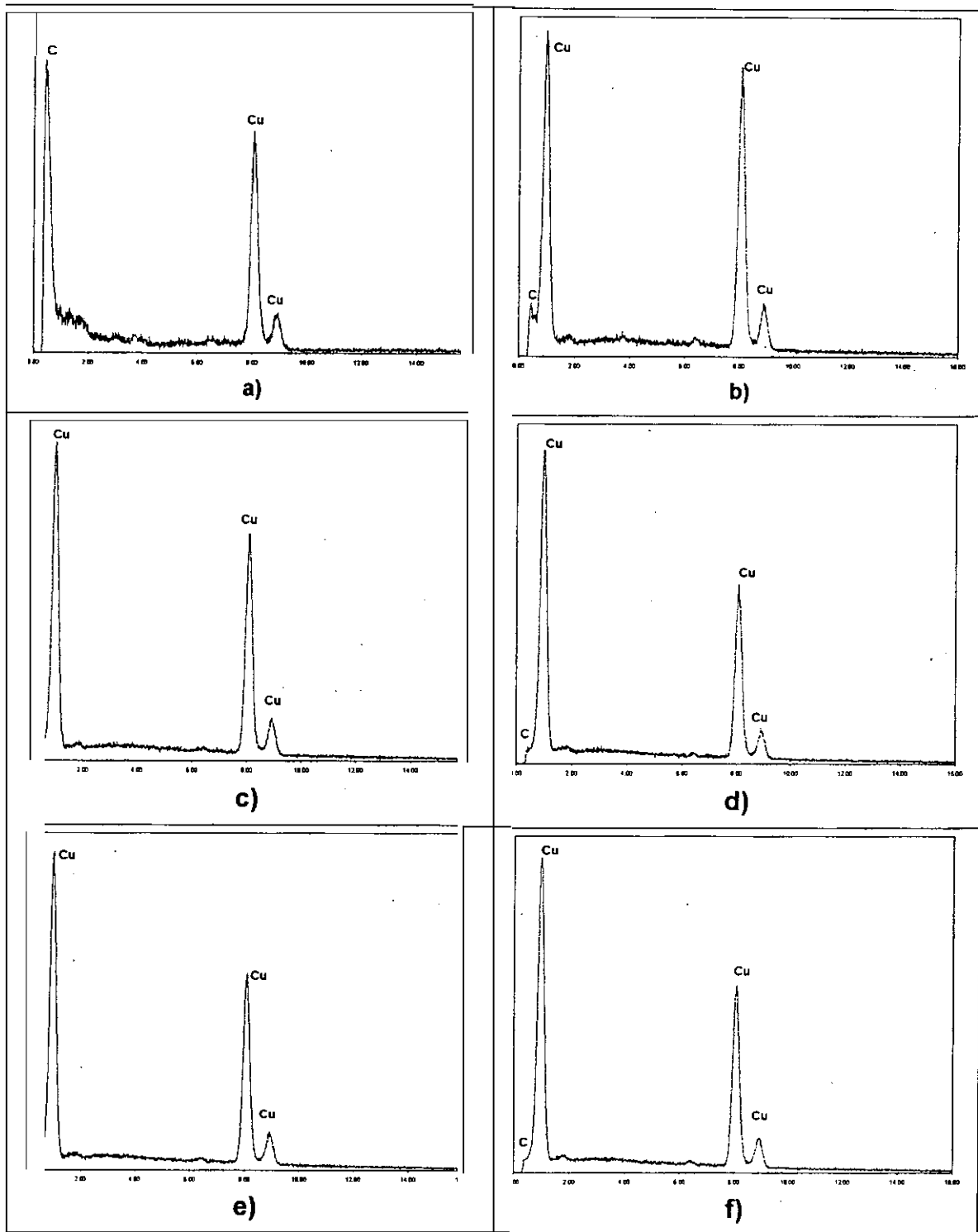
Análisis Transversal

Para determinar la profundidad de penetración del recubrimiento, se realizó el análisis del sustrato en forma transversal. En la micrografía 4.13 se presenta la sección transversal del sustrato de cobre a 2000 aumentos. La profundidad de penetración del recubrimiento se determinó al realizar un barrido sobre una línea en la cual se seleccionaron seis puntos separados aproximadamente una distancia de $5\mu\text{m}$.

El punto etiquetado con el número 1 corresponde a la superficie del sustrato, mientras que el número 6 corresponde a la profundidad máxima analizada. La gráfica 4.3 muestra el espectro de los elementos presentes en los 6 puntos de análisis, así mismo, en la tabla 4.3 se muestra la cuantificación de los elementos en los puntos de análisis.



Micrografía 4.13 Recubrimiento sobre cobre en la zona transversal.

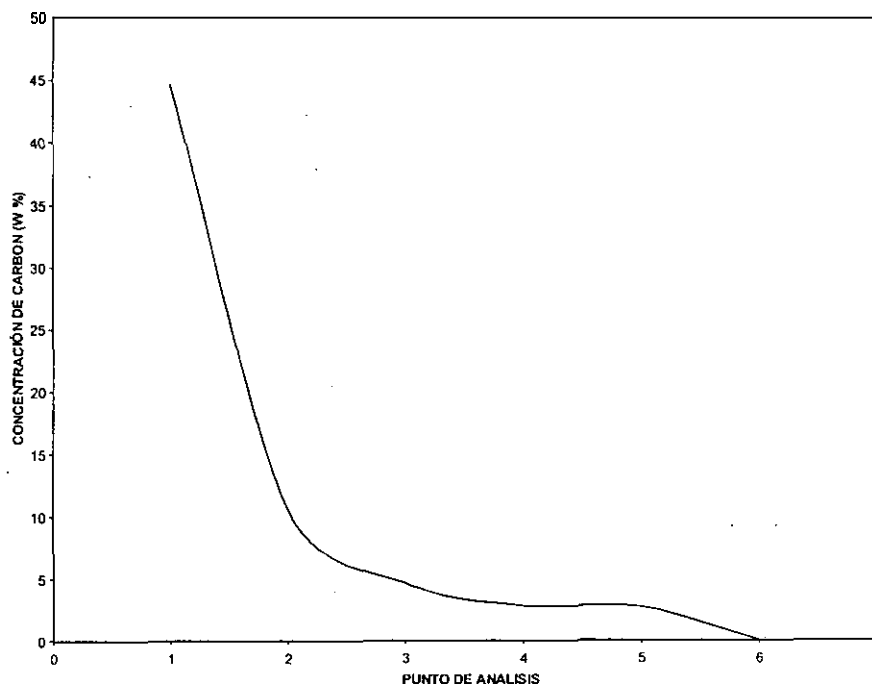


Gráfica 4.3 Espectro de rayos x. a) punto1, b) punto 2, c) punto 3; d) punto 4, e) punto 5, f) punto 6

Tabla 4.3 Porcentaje de elementos presentes en los puntos de análisis en sección transversal

Elemento	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
C (W %)	44.59	10.68	4.65	2.85	2.7	0.0
Cu (W %)	55.41	89.32	95.35	97.15	97.3	100
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

De la gráfica 4.3 y la tabla 4.3 se puede establecer la presencia de carbono, lo que corrobora la existencia de un recubrimiento en la superficie.

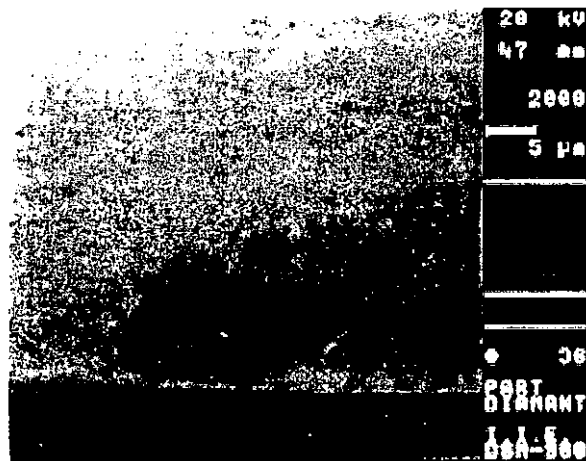


Gráfica 4.4. Concentración de carbono vs puntos de análisis.

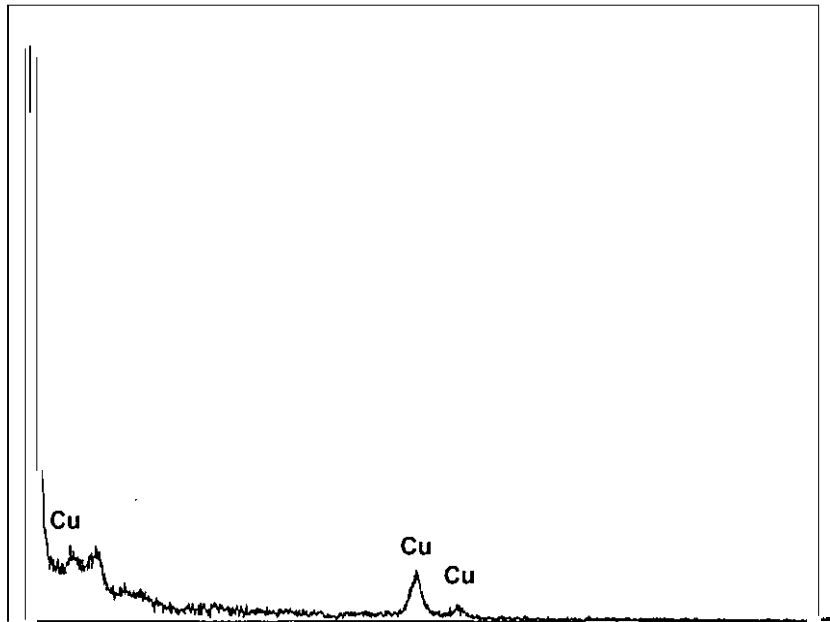
La gráfica 4.4 muestra la concentración de carbono contra los puntos de análisis. En ésta se observa el decremento de contenido de carbono de acuerdo a la profundidad. Se puede considerar que el recubrimiento se encuentra de manera substancial a una profundidad aproximada de 5 a 10 μm .

Es importante señalar que en la sección transversal aumentó la concentración de carbono en la superficie con respecto al 17% encontrado en el análisis superficial, esto es atribuible a dos razones. 1) en el punto de análisis existió mayor concentración de partículas y 2) los rayos X durante el microanálisis, penetran a una profundidad determinada, la cual depende del voltaje de excitación. Cuando se analiza superficialmente, los rayos X excitan el cobre presente debajo del recubrimiento, dado que la lectura es una relación en porcentaje de elementos presentes, la cuantificación de carbono es menor. Por el contrario, en sección transversal se elimina este problema ya que el análisis se realiza por decirlo de alguna manera en forma de capas. Esta última explicación es más aceptada

Por otra parte, aún cuando en la micrografía 4.13 se comprobó la existencia de recubrimiento, no es perceptible el tamaño de las partículas, lo cual difiere con la micrografía 4.14, en la que se observa una especie de mancha en el contorno de la superficie, que de acuerdo al análisis de elementos que se muestra en la gráfica 4.5 resultó ser una partícula embebida en una matriz de cobre con un tamaño aproximado de $10\mu\text{m}$. Lo anterior muestra que partículas de gran tamaño también pueden ser embebidas en la superficie y formar parte del material base.



Micrografía 4.14. Recubrimiento sobre cobre (zona transversal)
Se muestra una partícula de diamante totalmente embebida en la superficie del cobre.



Gráfica 4.5. Espectro de la partícula de diamante embebida en una matriz de cobre.

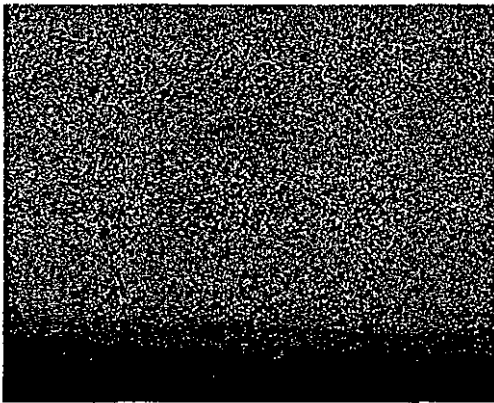
Aunque el caso anterior no es lo general del recubrimiento, es decir, existen partículas en forma similar aisladas a lo largo de todo el recubrimiento, se puede establecer con certeza, que en el proceso de triboadhesión las partículas pueden penetrar la superficie del sustrato y ser cubiertas totalmente, tal y como se demuestra en la micrografía 4.15 en la cual se encuentra una partícula de diamante embebida a una profundidad aproximada de 40 μm .



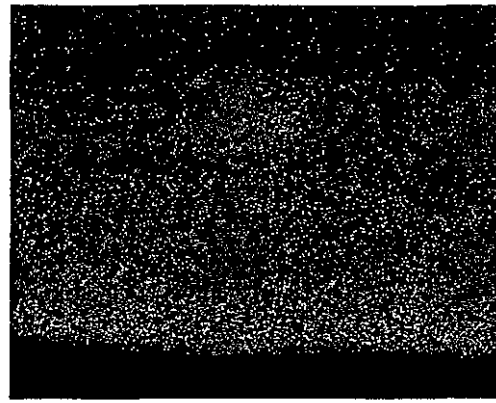
Micrografía 4.15. Recubrimiento sobre cobre (zona transversal). Se muestra una partícula de diamante embebida en el cobre a una profundidad aprox. 40 μm

De la misma manera que en sección superficial, también se llevó a cabo un mapeo en la sección transversal. El mapeo de elementos se muestra en la

micrografía 4.16. En la micrografía 4.16b (mapeo de carbono) en contraste con la micrografía 4.16a (mapeo de cobre) se comprueba que en efecto existe un recubrimiento en la región superficial ya que existe una alta densidad de puntos en esa zona, aún cuando no es posible observar en la micrografía 4.15 el tamaño de las partículas embebidas.



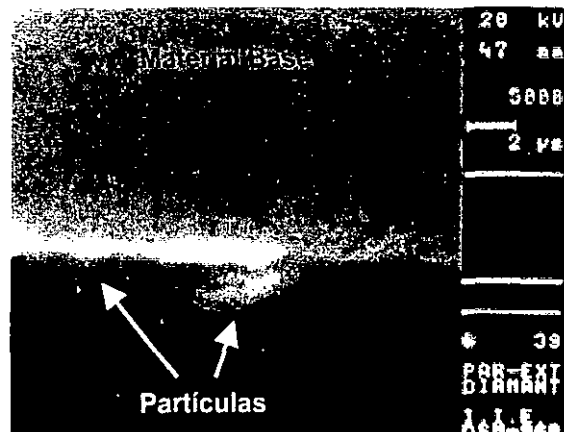
a)



b)

Micrografía 4.16. Mapeo correspondiente a la micrografía 4.15.
a) mapeo de cobre, b) mapeo de carbono.

Por otra parte, en la micrografía 4.17 se observa a 5000 aumentos otra zona transversal del recubrimiento. Se detectan partículas de distintos tamaños sobresaliendo del perfil de la muestra. Aún cuando en ésta toma no fue posible observar la profundidad de penetración de las partículas ya que éstas se encontraban en un nivel inferior a la zona transversal que se analizó, se pudo evidenciar que en la superficie el recubrimiento se presenta con una morfología aleatoria de crestas y valles



Micrografía 4.17. Recubrimiento sobre cobre (zona transversal).
Se observan partículas de diamante sobresaliendo de la superficie del cobre.

Análisis microestructural transversal

Se efectuó un análisis microestructural simple en sección transversal, con el objetivo de detectar posibles cambios en la microestructura a causa de calentamiento friccional.

De acuerdo con la norma E407-93 de la ASTM [6] la solución de ataque para revelar la microestructura del Cobre es la siguiente:

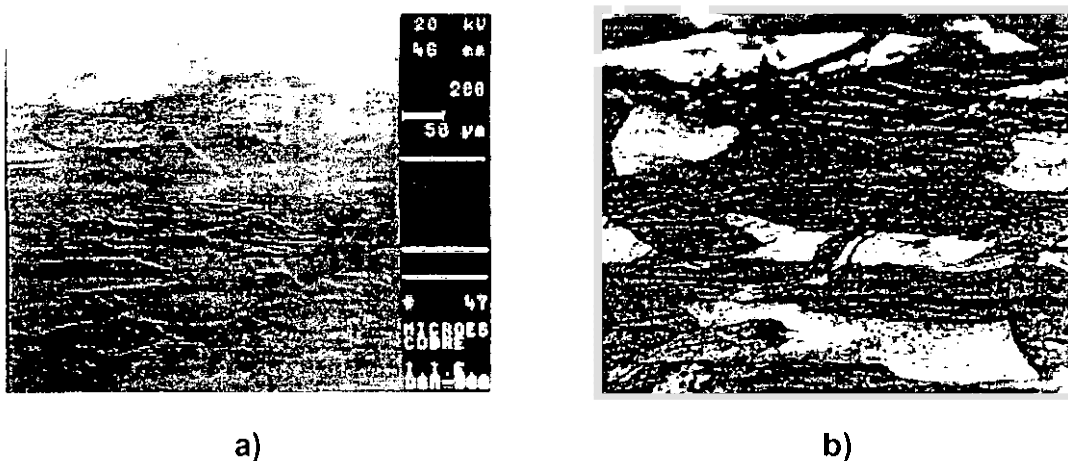
5g FeCl_3 Cloruro Férrico

50ml HCl Ácido Clorhídrico

100ml Agua Destilada

El ataque se efectuó por inmersión durante un tiempo de 1min y posteriormente, las probetas se lavaron con agua para eliminar cualquier residuo de la solución de ataque. Las probetas se analizaron en el microscopio óptico y en el de barrido electrónico.

Las micrografías 4.18a y 4.18b muestran la microestructura del cobre sin recubrimiento, la cual, de acuerdo al Metals Handbook de metalografía (micrografía 4.19) [7] por similitud corresponde a un cobre con pureza 99.00, rolado en caliente y calentado en una atmósfera reductora antes del rolado. Se observan los granos alargados en la dirección del rolado.

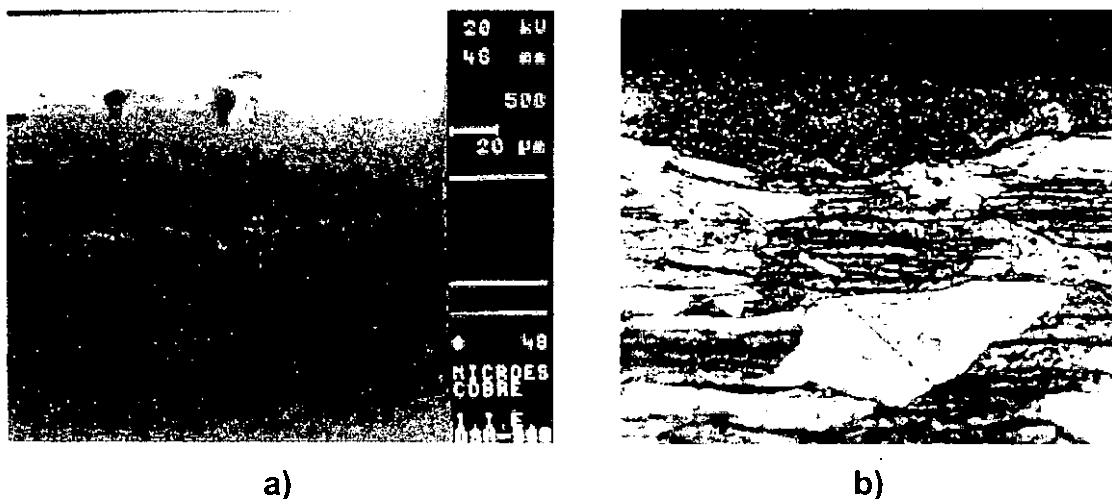


Micrografía 4.18. a) microestructura del cobre sin recubrimiento tomada a 200 aumentos en el microscopio de barrido electrónico. b) microestructura del cobre sin recubrimiento tomada a 200 aumentos en el microscopio Óptico.



Micrografía 4.19. Cobre con pureza 99.00, rolado en caliente y calentado en una atmósfera reductora antes del rolado [7].

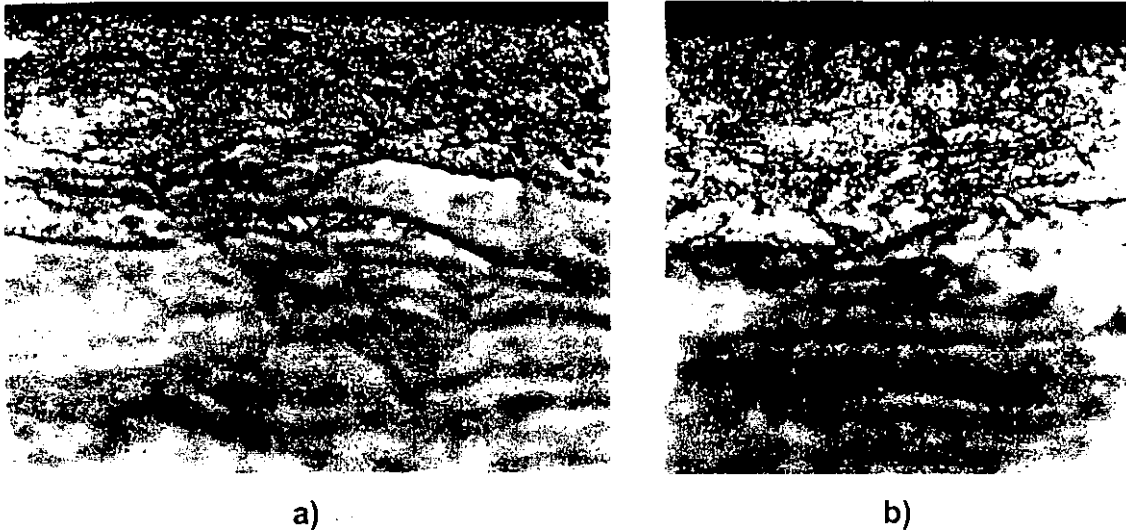
En las micrografías 4.20a y 4.20b se puede observar un cambio en la microestructura en la región cercana a la superficie. Este cambio se atribuye al aumento de temperatura en la superficie ya que existe una transformación de grano a causa del calentamiento friccional el cual de acuerdo a la escala de la micrografia 4.20a afectó una profundidad de $40\mu\text{m}$ aproximadamente, lo que concuerda con la profundidad a la cual se encontraron partículas de diamante embebidas (Micrografía 4.15).



Micrografía 4.20. a) transformación de la microestructura del cobre a 500 aumentos en el microscopio de barrido electrónico. b) microestructura del cobre a 200 aumentos en el microscopio óptico.

Por otra parte, para que exista una transformación microestructural del cobre, la temperatura tiene que ser superior a la temperatura de recristalización del material base (para el cobre 500°C aproximadamente) [8], por lo tanto se puede inferir que la temperatura que se generó durante el proceso de triboadhesión es igual o mayor a dicha temperatura.

En las micrografías 4.21a y 4.21b se muestra la zona afectada por el calentamiento friccional vista en el microscopio Óptico a 500 aumentos. Se puede observar en la parte superior de ambas micrografías una gran cantidad de partículas en forma de puntos negros, embebidos en la matriz de cobre.



Micrografía 4.21 a) y b) Zona afectada por el calentamiento friccional vista en el microscopio óptico a 500 aumentos. En la zona de transformación se observan partículas embebidas en una matriz de cobre.

Por lo tanto se puede establecer que el espesor del recubrimiento dependerá de la profundidad a la cual afecte el calentamiento friccional, ya que bajo estas condiciones se pueden embeber partículas de otro material, las cuales quedarán atrapadas en una matriz del material base durante el proceso de enfriamiento.

4.2.3.2 Deposición de diamante en acero para rodamientos

El recubrimiento de diamante se aplicó sobre las pistas de rodadura. Las pruebas se realizaron manteniendo constante el tiempo de prueba. Los demás parámetros fueron modificados, con el objetivo de verificar la influencia de éstos sobre la formación del recubrimiento.

Las condiciones de prueba se describen en la tabla 4.4

Tabla 4.4. Condiciones de prueba de los recubrimientos de diamante sobre pistas de rodamientos

No	Velocidad de giro de la fresa (r.p.m.)	Velocidad de giro del sustrato (r.p.m.)	Cantidad aproximada de polvo suministrado (gr/min)	Fuerza promedio entre el sustrato y la fresa * (N)	Diámetro de la fresa (cm)	Tiempo de prueba (seg.)	Valoración visual del recubrimiento después de frotado en agua	Observaciones
1	22,000	4.25	1	3.5	8	120	Superficie brillante	Sólo existió un cambio en la tonalidad del sustrato. La fresa se tornó de color oscuro
2	22,000		Sin polvo	3.5	8	120	Superficie brillante	La fresa se tornó de color oscuro
3	30,000			1.2	12	120	nulo	No existió cambio apreciable en la tonalidad. La fresa se tornó de color oscuro
4	30,000			2.24	12	120	Superficie brillante	La fresa se tornó de color oscuro, y en el lado que se tenía mayor fuerza de contacto las fibras de la tela se adhirieron al sustrato
5	30,000	4.75		10.5	1.08	12	120	Superficie más brillante que las anteriores

- *Análisis de fuerza apéndice C*

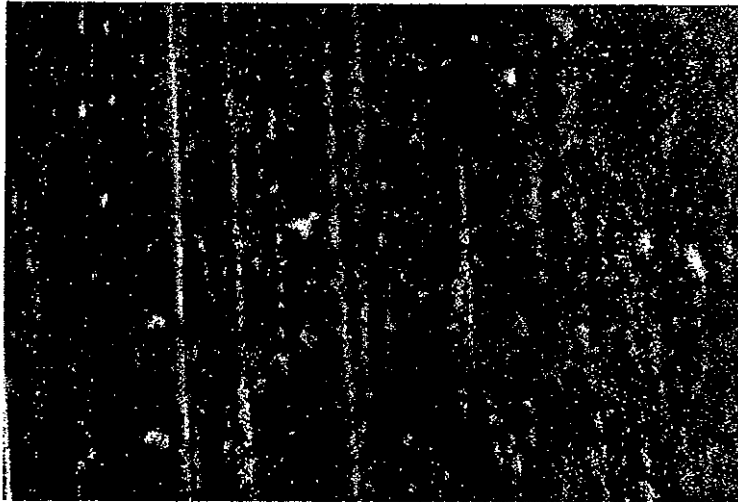
En la tabla 4.4 se puede observar que las pruebas de recubrimiento 1 y 2 se llevaron a cabo con una velocidad de rotación de la fresa y del sustrato de 22000 y 4.25 r.p.m. respectivamente, utilizando una fresa de diámetro de 8cm, con la que se ejerció una fuerza de 3.5 N sobre el sustrato. Por otra parte, en las pruebas 3, 4, 5 se incrementó la velocidad de rotación tanto de la fresa como del sustrato 30000 y 4.75 r.p.m. respectivamente, para este caso se utilizó una fresa de 12cm de diámetro, así como una fuerza entre la fresa y el sustrato de 1.2, 2.24 y 1.08N para cada prueba respectivamente. A excepción de la prueba 3, en la cual no se aplicó alimentación de polvo, en general, la superficie recubierta presenta una apariencia brillante.

Nótese en las observaciones de la tabla 4.4 que durante las pruebas realizadas, las fibras de la fresa se tornan de color oscuro, lo que se atribuye a una carga excesiva entre la fresa y el sustrato, sin embargo el proceso de deposición se lleva a cabo.

En la siguiente sección se comparan las pruebas obtenidas en la tabla 4.4 para verificar la influencia de los parámetros en la formación del recubrimiento.

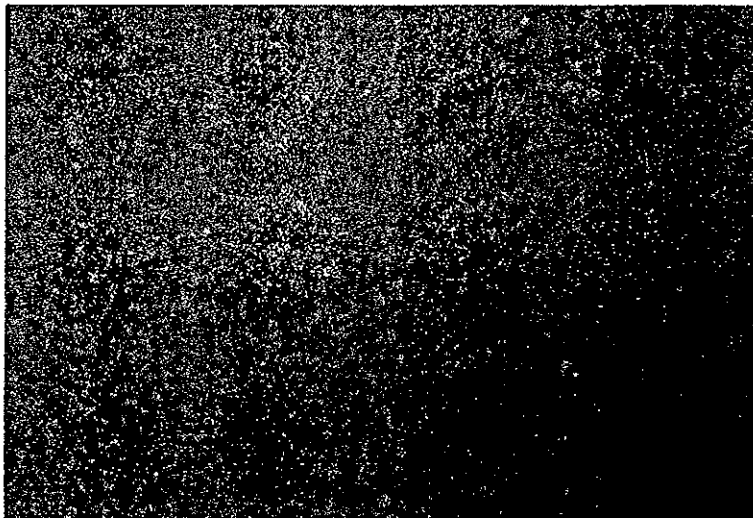
4.2.3.2.1 Análisis por Microscopía Óptica

El análisis por microscopía óptica se efectuó a los sustratos de la tabla 4.4 que presentaron mejores características en la valoración visual. La micrografía 4.22 corresponde al **sustrato sin recubrimiento**. Se observa que la superficie del material base presenta un aspecto rayado en la dirección en la que se efectuó el proceso de lijado del material base, realizado para asegurar que éste se encuentre libre de Óxido y grasa antes del proceso de deposición.



Micrografía 4.22. Superficie sin recubrimiento de acero para rodamientos

En la micrografía **4.23** se muestra la superficie a 800 aumentos del recubrimiento obtenido en la **prueba número 2**. En comparación con la micrografía **4.22**, se observa que el rayado del material desapareció y la superficie se encuentra cubierta con una especie de capa de arena.



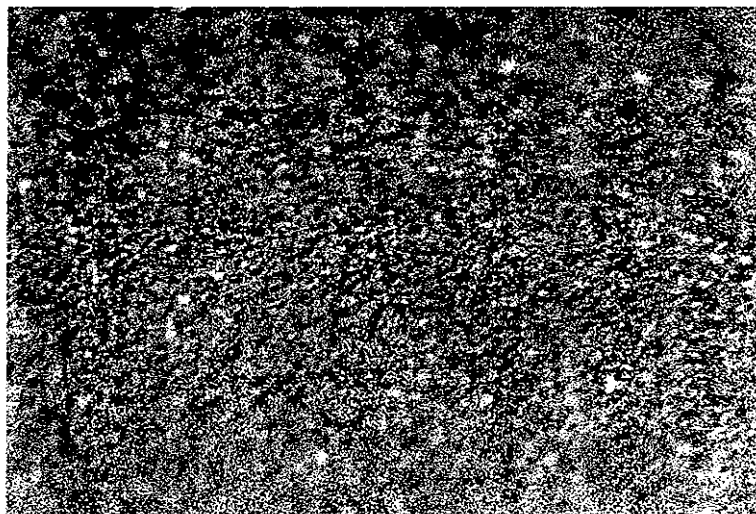
Micrografía 4.23. Superficie recubierta en la prueba número 2.

Por otra parte, en la micrografía **4.24** se muestra la zona con recubrimiento a 800 aumentos de la **prueba número 4**. Se aprecia una superficie uniformemente recubierta con una capa que asemeja arena. A esta magnificación no fue posible establecer diferencias entre los recubrimientos obtenidos en las pruebas **2** y **4**.



Micrografía 4.24. Superficie recubierta en la prueba número 4.

En la micrografía 4.25 se puede observar la superficie a 800 aumentos de la **prueba número 5**. Se aprecia un aspecto arenoso y sin rayas, sin embargo, al compararla con la prueba número 2 (micrografía 4.23), se percibe un cambio en el tamaño de los granos y, aunque a esta magnificación no fue posible identificar la naturaleza de la textura, se cree que es a causa de la existencia de una aglomeración mayor ocasionada por la más alta temperatura friccional que se genera por el aumento de la velocidad tangencial en la fresa.

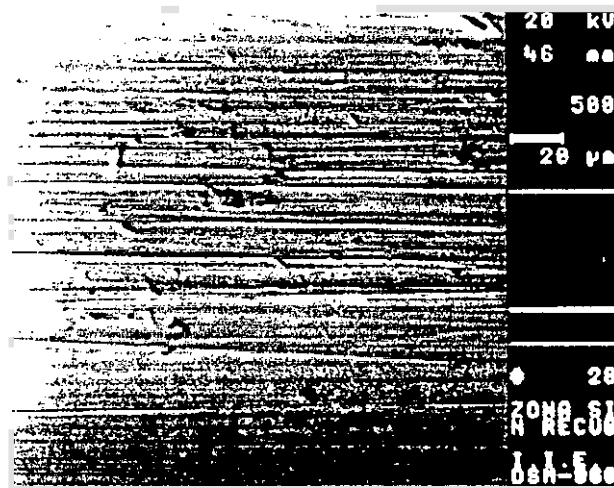


Micrografía 4.25. Superficie recubierta en la prueba número 5

4.2.3.2 Análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

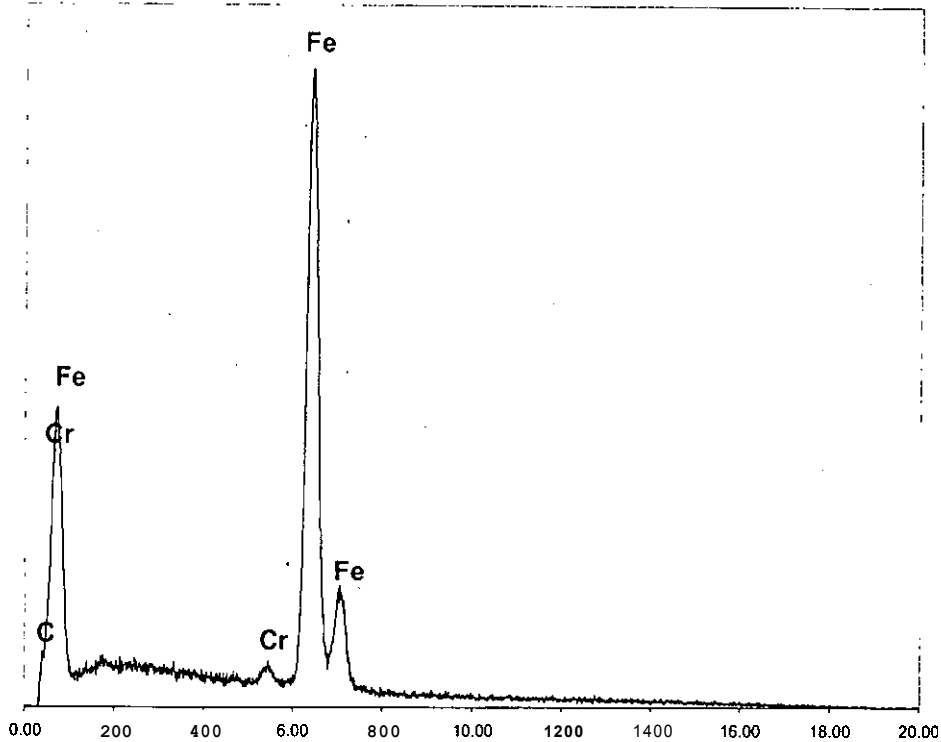
El análisis se efectuó a las pruebas 4 y 5 de la tabla 4.4, ya que presentaron mejores características en el análisis por microscopía óptica. Las probetas seleccionadas se examinaron en forma superficial mediante los análisis: a) morfológico, y b) microanálisis.

En el análisis **morfológico** se realizó inicialmente la observación de la superficie sin recubrimiento (micrografía 4.26) a 500 aumentos. Al igual que en el análisis por microscopía Óptica, se perciben crestas y valles en la dirección del lijado.



Micrografía 4.26. Superficie de acero para rodamientos, sin recubrimiento.

El espectro de rayos x del material base se muestra en la gráfica 4.6. Se puede observar que los principales elementos son: hierro, cromo y carbono. Las proporciones de éstos se muestran en la tabla 4.5.



Gráfica 4.6. Espectro de rayos x. Se muestran los elementos presentes en el sustrato de acero para rodamientos

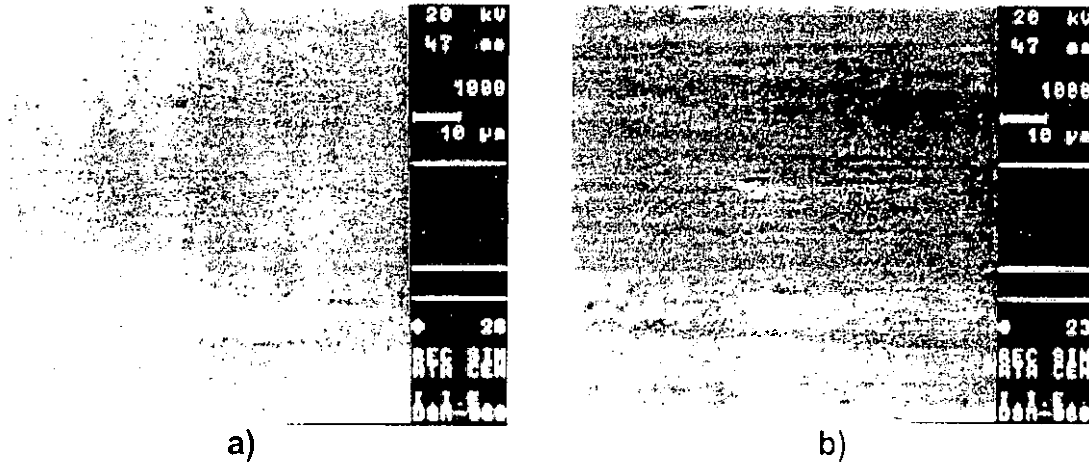
Tabla 4.5 Porcentaje de elementos en el acero para rodamientos sin recubrimiento

Elemento	W %	A %
C	8.52	27.06
Cr	1.52	1.30
Fe	89.96	71.64
Total	100.00	100.00

En la tabla 4.5, la segunda columna muestra el porcentaje en peso que ocupan los elementos en el área analizada, mientras que la tercera representa el porcentaje atómico de los elementos en la misma área. Se detecta una concentración de 8.52% en porcentaje en peso para el carbono, por lo que la presencia de carbono (diamante) en los recubrimientos será relativa a la cuantificación anterior.

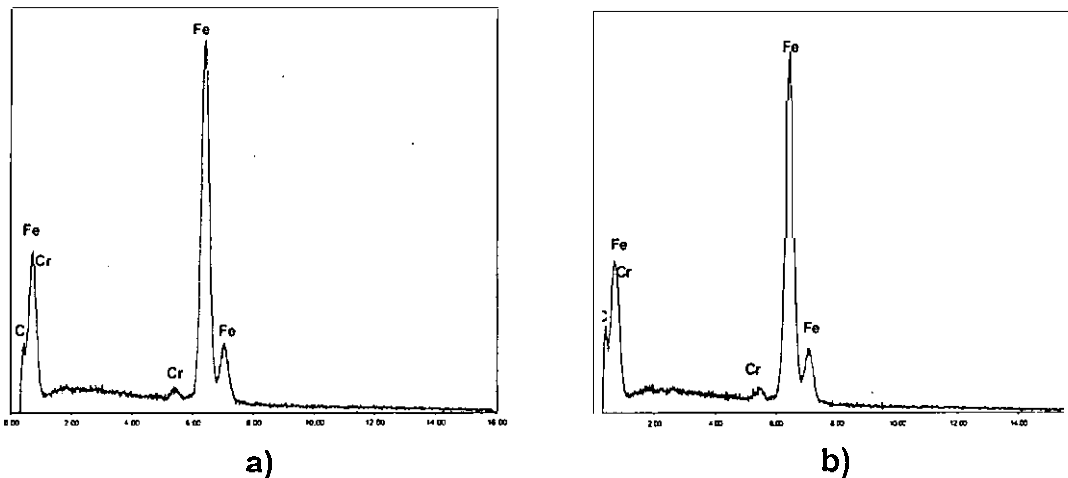
En las micrografías 4.27a y 4.27b se observan las superficies a 1000 aumentos de los recubrimientos 4 y 5 respectivamente, en las cuales en comparación con la micrografía 4.26, se presenta una morfología radicalmente diferente, ya que las líneas del acabado del material base no se perciben y se presenta una superficie

en apariencia lisa. No se aprecian, a esta magnificación, cambios significativos entre las micrografías 4.27a y 4.27b.



Micrografía 4.27. a) y b) Superficie de los recubrimientos correspondientes a las pruebas 4 y 5 respectivamente.

Los espectros de las gráficas 4.7a y 4.7b corresponden a las micrografías 4.27a y 4.27b respectivamente. Se comprueba la existencia de recubrimiento, ya que en contraste con el espectro del material base (gráfica 4.6) se observa un contenido mayor de carbono. La cuantificación de elementos se presenta en la tabla 4.6.



Gráfica 4.7. Espectros de rayos x, a) micrografía 4.27a, b) micrografía 4.27b

Tabla 4.6 Porcentaje de elementos en las pruebas 4 y 5 (tabla 4.4).

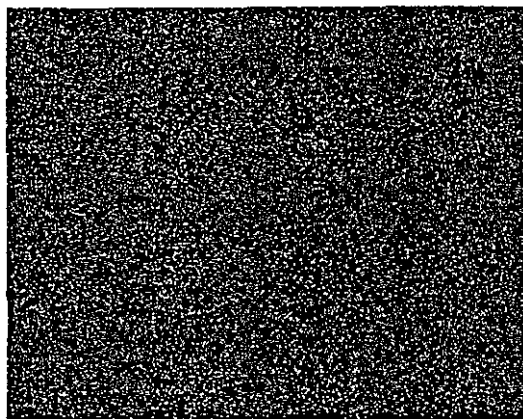
Elemento	Prueba 4	Prueba 5
C W %	17.83	23.82
Cr W %		
Fe W %	81.163	75.17
Total	100.00	100.00

En la primer columna de la tabla 4.6 se muestran los componentes químicos principales de los substratos analizados. En la segunda y tercera columna se presenta el porcentaje de los elementos encontrados en las pruebas 4 y 5 respectivamente.

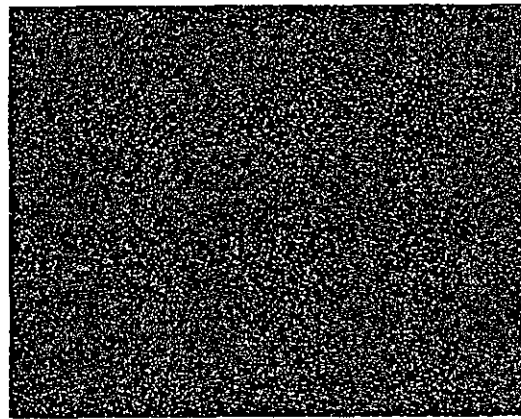
De las gráficas 4.7a y 4.7b, así como de la tabla 4.6 se puede observar que la cantidad de carbono en la superficie se elevó aproximadamente al doble para la prueba 4 y al triple para la prueba 5, respecto al material base (tabla 4.5 y gráfica 4.6).

Por lo anterior y tomando en consideración las condiciones bajo las cuales se efectuaron las pruebas de recubrimiento (tabla 4.4), se puede inferir que el aumento en la fuerza de contacto entre la fresa y el substrato, produjo resultados negativos, es decir, un decremento en la cantidad de diamante depositado.

Las micrografías 4.28a y 4.28b muestran el mapeo de elementos correspondientes a las micrografías 4.27a y 4.27b. Se observa que el carbono se encuentra uniformemente distribuido en la superficie. Por lo tanto se comprueba que es factible recubrir superficies de alta dureza (60-65 rockwell C [9]) por la técnica de triboadhesión.



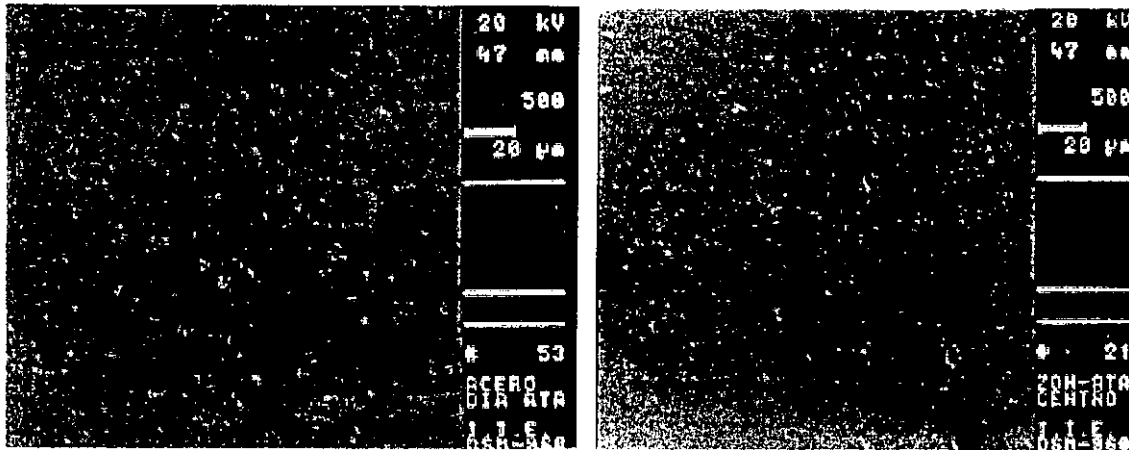
a)



b)

Micrografía 4.28. a) y b) Mapeos de carbono correspondientes a las micrografías 4.27a y 4.27b respectivamente.

Por otra parte, las probetas de acero se atacaron con ácido fluorhídrico con el fin de que el ácido reaccionara con el acero, y las partículas de diamante reasaltaran sobre la superficie [10]. Las micrografías 4.29a y 4.29b muestran las superficies atacadas de los recubrimientos 4 y 5 (tabla 4.4) a 500 aumentos. Se pueden observar pequeños bordes sobresaliendo de la superficie, los cuales pudieran corresponder a partículas de diamante embebidas en la superficie del acero.



a)

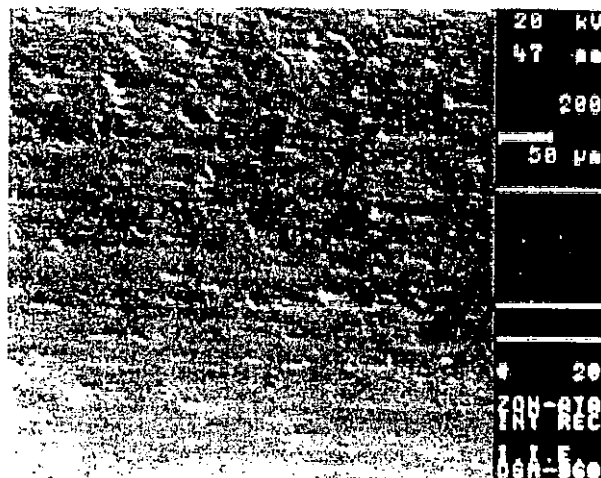
b)

Micrografía 4.29. a) y b) Superficies recubiertas atacadas con ácido fluorhídrico a 500 aumentos, correspondientes a las pruebas 4 y 5 (tabla 4.4) respectivamente.

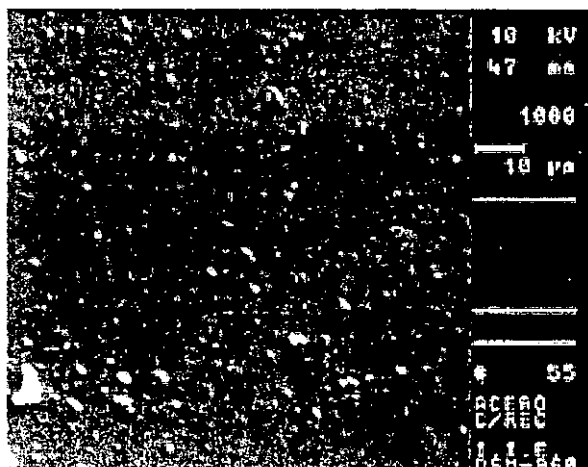
En la micrografía 4.30 se presenta el ataque de la frontera o límite del recubrimiento correspondiente a la prueba 4 (tabla 4.4). Se puede observar en la parte superior sólo impactos de partículas, en la parte inferior se aprecia una superficie lisa con pequeños bordes. La micrografía 4.31 muestra la parte inferior de la micrografía 4.30 a 1000 aumentos, en la que se observa que en efecto los bordes parecen ser partículas embebidas en la superficie del acero.

Por otro lado la micrografía 4.32 muestra la parte superior de la micrografía 4.30 a 500 aumentos, donde se observa la gran cantidad de impactos de partículas, las cuales sólo golpearon la superficie y no se lograron adherir a ésta, a causa de que la fresa de recubrimiento no tuvo contacto en esta zona por lo que no existió calentamiento friccional que favoreciera la adhesión de las partículas. Con lo anterior se demuestra que el proceso de triboadhesión se ve influenciado por un

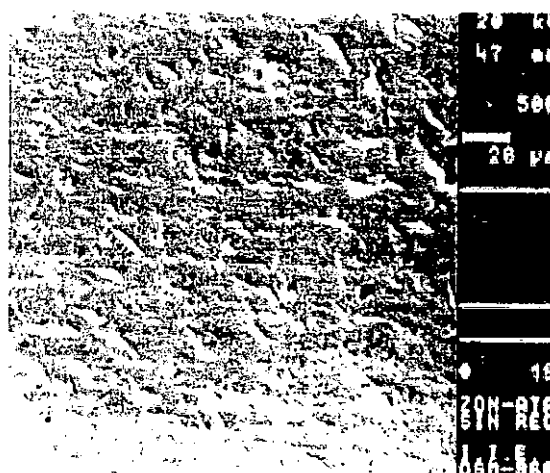
efecto mecánico (energía cinética de las partículas que impactan con la superficie del material base) y otro térmico (generación de temperatura por fricción).



Micrografía 4.30. Frontera o límite de recubrimiento correspondiente a la prueba 4 (tabla 4.4).



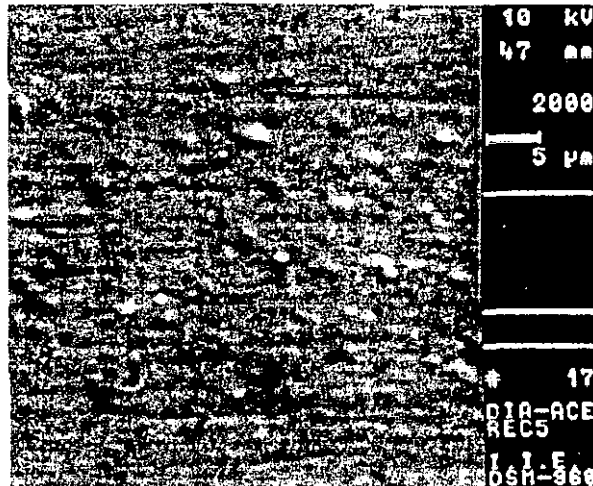
Micrografía 4.31. Ampliación a 3000 aumentos de la parte inferior de la micrografía 4.30.



Micrografía 4.32. Ampliación a 500 aumentos de la parte superior de la micrografía 4.30.

Por otra parte en la micrografía 4.31 se puede observar que los bordes o granos se encuentran en tamaños aproximados de 7 micras e inferiores. Cabe mencionar que la naturaleza del anclaje de las partículas no se alcanza a percibir, ya que pareciera que se encuentran totalmente embebidas sobre la superficie del acero y cubiertas por una capa del mismo material base. Con el fin de verificar el tipo de

anclaje se realizó una ampliación a 2000 aumentos de la micrografía 4.31, la cual se muestra en la micrografía 4.33. En ésta se comprueba que las partículas en realidad fueron irnpactadas contra una superficie tal vez fundida, lo que provocó que la partícula quedara embebida en el material base.



Micrografía 4.33. Ampliación a 2000 aumentos de la superficie recubierta en la prueba número 4 de la tabla 4.4. Se observa que las partículas se encuentran embebidas y cubiertas por una capa de acero.

4.2.3.3 Deposición con Fe-75Si sobre acero inoxidable AISI 304

En la tabla 4.7 se muestran los parámetros que se seleccionaron en las pruebas de deposición de Fe-75Si sobre acero inoxidable AISI 304. En éstas, se mantuvo una alimentación de polvo de 10.5 gr/min, una velocidad de rotación de la fresa y del substrato de 20000 y 10.5 r.p.m. respectivamente. Los parametros restantes se modificaron con el objetivo de establecer la influencia de éstos en la formación del recubrimiento.

Tabla 4.7. Condiciones de prueba de los recubrimientos de Fe-75Si sobre Acero Inoxidable AISI 304.

No	Velocidad de giro de la fresa (r.p.m.)	Velocidad de giro del sustrato (r.p.m.)	Cantidad aproximada de polvo suministrado (gr/min)	Fuerza promedio entre el sustrato y la fresa (N)	Giro del sustrato	Tiempo de prueba (seg.)	Valoración visual del recubrimiento después de frotado en agua	Observaciones
1	22,000	10.5	10.5	1.37	2	120	Nulo	Sin recubrimiento
2	22,000	10.5	10.5	2	1	120	Bueno	Demasiada fuerza, superficie quemada
3	22,000	10.5	10.5	1.37	1	60	Zonas más densas que otras	No se tuvo alimentación de polvo constante
4	22,000	10.5	10.5	1.37	1	120	Bueno	
5	22,000	10.5	10.5	0.0	1	60	Pobre	Sólo se marco una franja delgada que corresponde al espesor de la boquilla
6	22,000	10.5	10.5	1.37	1	60	Regular	
7	22,000	10.5	Sin polvo	1.37	1	120	Nulo	La superficie se volvió brillante

1. *contraria al giro de la fresa*
 2. *mismo sentido que la fresa*

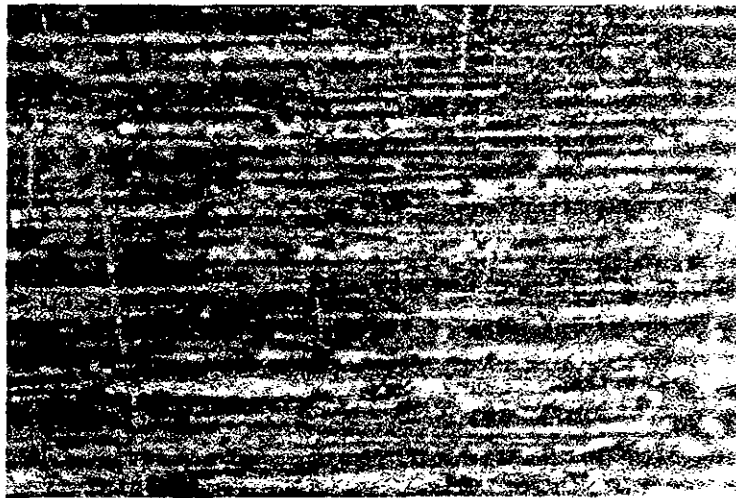
En la tabla 4.7 se puede observar que sólo las pruebas 2 y 4 presentaron un recubrimiento perceptible a simple vista. La fuerza entre la fresa y el sustrato que se empleó para estas pruebas en particular fue de 2 y 1.37 N respectivamente, presentando mejores características el recubrimiento de la prueba 4.

De una comparación visual entre los recubrimientos 1 y 2 se puede establecer que el recubrimiento se favorece cuando el sentido de giro del sustrato es contrario al de la fresa. Por otra parte de las pruebas 4 y 6 se puede observar que el recubrimiento presenta mejores características cuando se incrementó el tiempo de prueba.

4.2.3.3.1 Análisis por Microscopía Óptica

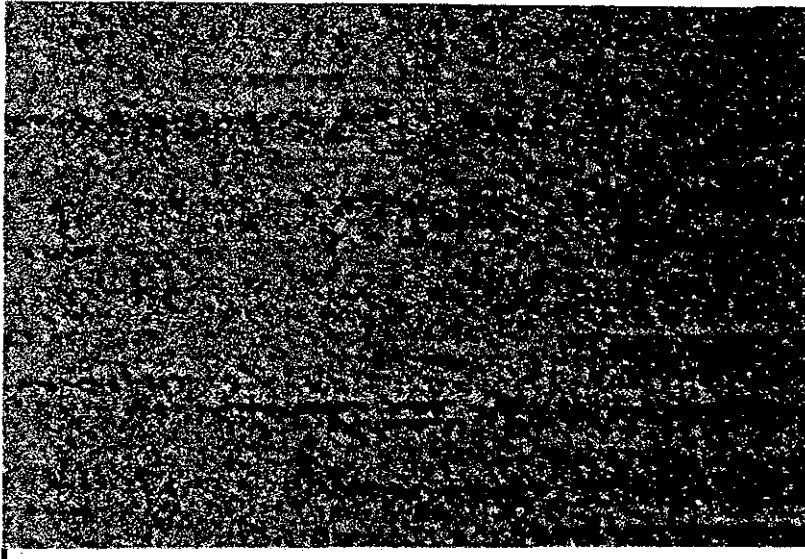
El análisis por microscopía Óptica sólo se efectuó al recubrimiento número 4 de la tabla 4.7 ya que presentó mejores características.

En la micrografía **4.34** se muestra el sustrato sin recubrimiento. Se observa la morfología del material, el cual presenta una superficie extremadamente rugosa con apariencia en forma de escamas alineadas en una dirección preferencial.



Micrografía 4.34. Sustrato de acero inoxidable AISI 304 sin recubrimiento.

Por otra parte, en la micrografía 4.35 se muestra el recubrimiento número 4 de la tabla 4.7 a 800 aumentos, en contraste con la micrografía 4.34, se pueden observar cambios en morfología y apariencia ya que el nivel de rugosidad disminuyó de manera considerable y la superficie se presenta cubierta con una especie de arena.



Micrografía 4.35. Superficie de la prueba número 4 correspondiente a la tabla 4.7.

Aunque en estas pruebas no se realizó el análisis por microscopía electrónica de barrido, se asume que la apariencia en forma de arena es a causa de la existencia de recubrimiento, ya que la superficie presenta características similares a las que se encontraron en las pruebas de cobre y acero (sección 4.2.3.1 y 4.2.3.2) que se analizaron por microscopía óptica, en las que se comprobó posteriormente la presencia de recubrimiento mediante el análisis en el microscopio de barrido electrónico.

REFERENCIAS.

- [1] Rodríguez L. J.M., Procedimiento de Deposición de Placas de Aluminio con Polvo de Acero al Alto Vacío por Electrodeposición, tesis de grado, Universidad de Cienfuegos, 1999.
- [2] Smith W. F., Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería en Materiales, segunda edición Edit. McGraw Hill, 1993, pp 141-172
- [3] Sulzer Metco, Catálogo para selección de polvos de recubrimiento. Mexico, 1997
- [4] Fan H. Q., Pereira .E., "Diamond Deposition on Copper: studies on nucleation, growth, and adhesion behaviors", 21 August 1998
- [5] Rabinowicz E. "Theoretical Criteria for the Effectiveness of a Lubricant Film", (en: American Society of Lubrication Engineers (ASLE), 1, 1958) p 96
- [6] Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. 1998. American Society for Testing and Materials, Race St. Philadelphia (E407-93) .
- [7] Metals Handbook Atlas of microstructures of industrial alloys. 8th edition, by the American society for metals, Vol. 7, 1972 p 273
- [8] Groover. M. O. Fundamentos de Manufactura Moderna, 1^a edición en español, Pentice-Hall, 1997
- [9] SKF, Reporte de Ingeniería SKF "NoWear", 1999
- [10] Dingley D J, The Naav Coating Proces, H H Wills Physics Laboratory, University of Bristol, United Kingdom, 1993 (Bristol BS8 1 TL)

CAPÍTULO V

5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se diseñó y construyó un dispositivo para realizar recubrimientos por medio de fricción seca sobre superficies curvas. Se logró depositar diamante en cobre, diamante en acero para rodamientos y Fe-75Si en acero inoxidable AISI 304. Además, mediante los análisis realizados se pudo profundizar en la naturaleza del proceso de triboadhesión. De las principales conclusiones a las que se llegó se pueden extraer las siguientes:

- Se comprobó que el proceso de deposición del material de aporte sobre el material base se ve influenciado por dos tipos de procesos, uno térmico y otro mecánico. El primero es a causa de las altas temperaturas instantáneas, generadas en la interfase entre la fresa y el material base, lo que permite que las partículas del material de aporte penetren en el interior del material base. El segundo consiste en la generación de cavidades a causa de la energía cinética que poseen las partículas del material de aporte al colisionar sobre la superficie del material base.
- Se observó que la profundidad de penetración de las partículas del material de aporte sobre el material base, depende del espesor afectado por el calor que se genera por el fenómeno de fricción entre la fresa y el material base.
- Se observó que entre más pequeño sea el tamaño de partícula del material de aporte, éste favorece al proceso de deposición.
- Del análisis realizado a los recubrimientos, se detectó en forma general, partículas de tamaño menor al tamaño original del material de aporte. Sin

embargo, también es posible que partículas del tamaño original del material de aporte queden totalmente embebidas en el material base.

- Del microanálisis que se realizó al substrato de cobre, se encontró una distribución uniforme de diamante sobre la superficie. Así mismo, del análisis transversal se detectó diamante hasta una profundidad aproximada de 30 μm con una concentración de 44.59 % en peso.
- Del microanálisis realizado a los substratos de acero para rodamiento se encontró diamante distribuido en forma uniforme en la superficie del material base con una concentración aproximada de **16%** en peso, respecto al material base.
- De las pruebas de deposición realizadas en acero para rodamientos, se observó que el aumento en la fuerza de contacto entre la fresa y el substrato ocasionó un decremento en la cantidad de diamante depositado.
- Finalmente, del trabajo realizado, se concluyó que con la técnica de deposición por triboadhesión es posible depositar una gran variedad de materiales de aporte sobre diversos materiales base, sin el empleo de capas de anclaje.

5.2 TRABAJOS FUTUROS

- Se propone como trabajos futuros experimentar aún más con los materiales de aporte y base que se utilizaron en la presente investigación y de esta manera, establecer los espesores máximos de recubrimiento que se puede lograr mediante esta técnica de deposición.
- Realizar un análisis microestructural en la zona del recubrimiento, con el objetivo de evaluar la microestructura y de esta manera conocer más sobre la naturaleza del proceso.
- Realizar el análisis por microscopía de barrido electrónico a las probetas recubiertas con hierro-silicio, y de esta manera determinar y caracterizar el recubrimiento.
- Realizar una evaluación teórica y experimental de las temperaturas que se generan durante el proceso de recubrimiento.
- Realizar pruebas de desgaste y de adhesión a los recubrimientos, con el objetivo de valorar la calidad del mismo.
- **Optimar** el dispositivo de recubrimiento en superficies curvas ya que se tuvieron los siguientes problemas:
 - El dosificador de polvos presenta problemas cuando se utilizan partículas de tamaño inferior a 10 micras, por lo que se sugiere montar un motor vibrador de mayor capacidad, el cual mantenga en continuo movimiento los polvos en el interior del contenedor y con esto evitar la aglomeración de los mismos.
 - A causa de las vibraciones propias del sistema de recubrimiento, no se pudo tener un control 100 % confiable de la fuerza, por lo que se sugiere determinar las fuentes de vibración y reducirlas a su mínimo valor.

- Disminuir la excentricidad del mandril de sujeción del sustrato, ya que por tal problema la fuerza de contacto entre la fresa y el sustrato varía durante la prueba.
- implementar un sistema recolector de polvo no depositado, ya que existe una pérdida considerable de polvo.

7

APÉNDICE A

TRANSDUCTORES DE FUERZA

A.1 Diseño del transductor de fuerza.

Dentro de las variables del proceso de recubrimientos por triboadhesión se encuentra la fuerza que la fresa ejerce sobre el sustrato. Para lograr tener un buen control de dicha fuerza se diseñó un sensor de fuerza tipo viga, ya que éste presenta sensibilidad a cargas de flexión, poseen una sección simétrica y hay siempre dos superficies sujetas a deformaciones de valor numérico igual pero de signo contrario [1].

La principal razón por la que este tipo de sensor ofrece mayor sensibilidad es a causa de su geometría, ya que los extensómetros se encuentran localizados en las partes de mayor esfuerzo de flexión. Además se instaló un arreglo de puente de wheatstone completo con parejas de extensómetros sujetos al mismo tipo de deformación, agregando con esto sensibilidad y compensación de esfuerzos térmicos.

La selección del material que se emplea para la construcción de los sensores es muy importante, ya que éste repercute directamente en el costo y funcionamiento del sensor. Con el objeto de realizar una buena selección del material, se tomaron principalmente tres consideraciones: propiedades mecánicas, propiedades térmicas y consideraciones de manufactura. El material seleccionado fue Aluminio 6061-T6 el cual tiene un comportamiento excelente cuando se emplea en sensores de baja capacidad de carga [2].

El dimensionamiento del transductor se realizó tomando en consideración la sensibilidad requerida, ya que para que un sensor sea considerado como aceptable, su sensibilidad no tiene que ser menor a 2 mV/V , ya que ésta influye directamente en su exactitud y precisión. Dadas las condiciones de diseño se utilizará una geometría tipo

tubo. Las dimensiones principales para este tipo de transductor son: longitud "L", diámetro externo " D y diámetro interno "d", ver figura A.1.

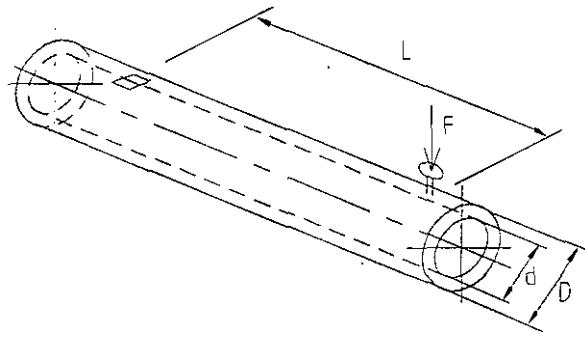


Figura A.1 Dimensiones principales del transductor tipo viga.

Puesto que la capacidad de carga del transductor será baja, Measurement Group [3] recomienda que los elementos tienen que diseñarse para resistir un mínimo de sobrecarga del 50%, y si el transductor es de baja capacidad, debajo de 1,000 N, se puede diseñar para mayor seguridad en un intervalo de 100 a 200% de sobrecarga sin que sufra daño alguno.

Tomando como antecedente el trabajo realizado por O. Aguilar [4], el rango de carga de trabajo en el proceso de tribohadesión oscila entre 0-10N, pero el arreglo del sensor de fuerza posee un disco el cual tiene una excentricidad indeterminada; el transductor se diseña para una sobrecarga o fuerza de diseño de 750N.

A.1.1 Cálculo del transductor de fuerza

Según Shigley [5], las consideraciones de diseño para un elemento sometido a flexión son:

$$0.60 \sigma_{fu} \leq \sigma_{trab} \leq 0.75 \sigma_{fu} \quad (A1-1)$$

Para el dimensionamiento se tiene que suponer al menos una dimensión, en este caso para el diámetro interno "d", se supuso un valor de **23 mm**

Una vez que se eligió el diámetro interno, se suponen diferentes diámetros externos y esfuerzos de trabajo para obtener la longitud "L" mediante la ecuación **(A1-5)**. Los esfuerzos tienen que estar dentro o lo más cercano posible al intervalo que se señala en la ecuación **(A1-1)** y proporcionar con esto una sensibilidad conveniente.

Los esfuerzos en la viga sometida a flexión pueden calcularse de:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{M}{S} \quad (\text{A1-2})$$

donde

$$M = \text{momento flector ; } M = FL \quad (\text{A1-3})$$

$$S = \text{módulo de sección, para un tubo: } S = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D} \quad (\text{A1-4})$$

Por lo tanto

$$L = \frac{\sigma \pi(D^4 - d^4)}{32FD} \quad (\text{A1-5})$$

L = Longitud para el transductor desde el punto de aplicación de la fuerza al centro del extensómetro.

La conexión entre los extensómetros es en forma de puente de wheatstone completo. La relación entre la deformación y sensibilidad se da por la ecuación **(A1-6)** en la que los subíndices **1,2,3 y 4** indican el número de extensómetro [6].

De la teoría del puente de wheatstone se tiene:

$$\frac{\Delta E}{V} = \frac{1}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right] \quad (\text{A1-6})$$

$$\text{si } \frac{\Delta R}{R_1} = Sg \varepsilon - \frac{\Delta R_3}{R_3}$$

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = Sg \varepsilon_2 = \frac{\Delta R_4}{R_4}$$

Sustituyendo

$$\frac{\Delta E}{V} = \frac{1}{4} [Sg \varepsilon_1 - Sg \varepsilon_2 + Sg \varepsilon_1 - Sg \varepsilon_4]$$

$$\frac{\Delta E}{V} = \frac{1}{4} [2Sg \varepsilon_1 - 2Sg \varepsilon_2]$$

$$\frac{\Delta E}{V} = \frac{1}{2} [Sg \varepsilon_1 - Sg \varepsilon_2]$$

como ε_1 es igual en magnitud a ε_2 pero de signo contrario

$$\frac{\Delta E}{V} = S_g \varepsilon \times 10^{-3} \quad (\text{AI-7})$$

donde ε está dada en microdeformaciones.

Los datos del material aluminio 6061-T6 son:

$$E = 70 \text{ Gpa}$$

$$\nu = 0.33$$

$$\sigma_{flu} = 248 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ult} = 279 \text{ Mpa}$$

Para un elemento sometido a flexión de la ecuación (AI-1)

$$148.8 \leq \sigma_{trab} \leq 186$$

Datos

$$D = 0.025 \text{ m}$$

$$d = 0.023 \text{ m}$$

$$F = 750 \text{ N}$$

Suponiendo sensibilidad de 4.5

$$\frac{\Delta E}{V} = 4.3 \frac{mV}{V}$$

De la ecuación (A1-7) para la sensibilidad, donde (s_g) se considera para diseños teóricos, 2

$$\varepsilon = 2150 \mu\text{m} / \text{m}$$

$$\sigma = E\varepsilon = 150.5 \text{ MPa}$$

de la ecuación (A1-5)

$$L = \frac{\sigma \pi (D^4 - d^4)}{32 F D} = 87.29 \approx 87 \text{ mm}$$

recalculando el valor de sensibilidad para $L=87$

$$\sigma = 149.98 \text{ MPa} \quad \text{y} \quad \varepsilon = 2142.62 \mu\text{m} / \text{m}$$

$$\text{donde } \frac{\Delta E}{V} = 4.29 \text{ mV/V}$$

Donde 4.29) 2.0 por lo tanto el valor de la sensibilidad se encuentra dentro del rango aceptable.

La tabla A1-1 presenta los resultados que se obtuvieron

Fuerza de diseño	L mm	D mm	d mm	σ MPa	ε $\mu\text{m}/\text{m}$	$\frac{\Delta E}{V}$ mV/V
750 N	87	25	23	149.98	2142.62	4.29

Los planos técnicos de transductores se muestran en el dibujo A1-1

Los extensómetros utilizados para el diseño del sensor de fuerza son del tipo **N2A13T004R350** los cuales son recomendados por Mensurament Group [7] para sensores de fuerza fabricados en aluminio.

A.1.2 Calibración del Transductor de Fuerza.

La calibración de los transductores se realizó mediante el método de calibración estático, el cual consiste en aplicar una fuerza conocida y ajustar la ganancia en el amplificador de señales hasta obtener la relación **N/mV** de salida que se desea.

Para registrar la salida de los transductores se utilizó un amplificador de señales de Measurements Group modelo 2210, un multímetro digital Hewlett Packard 34401A, un programa de interfase (ver apéndice b) y una computadora personal para procesamiento de datos. La fuerza se aplicó mediante patrones de pesos conocidos que de acuerdo a la norma ISA-S37.8 [8], el estándar de calibración tiene que poseer una exactitud de al menos 0.1% de la escala total. Se realizaron 5 ciclos aplicando masas desde 1 hasta 500 gr. en forma ascendente y descendente. El análisis de la calibración se muestra en la tabla AI-2

Tabla AI-2 Lecturas obtenidas en al calibración del transductor.

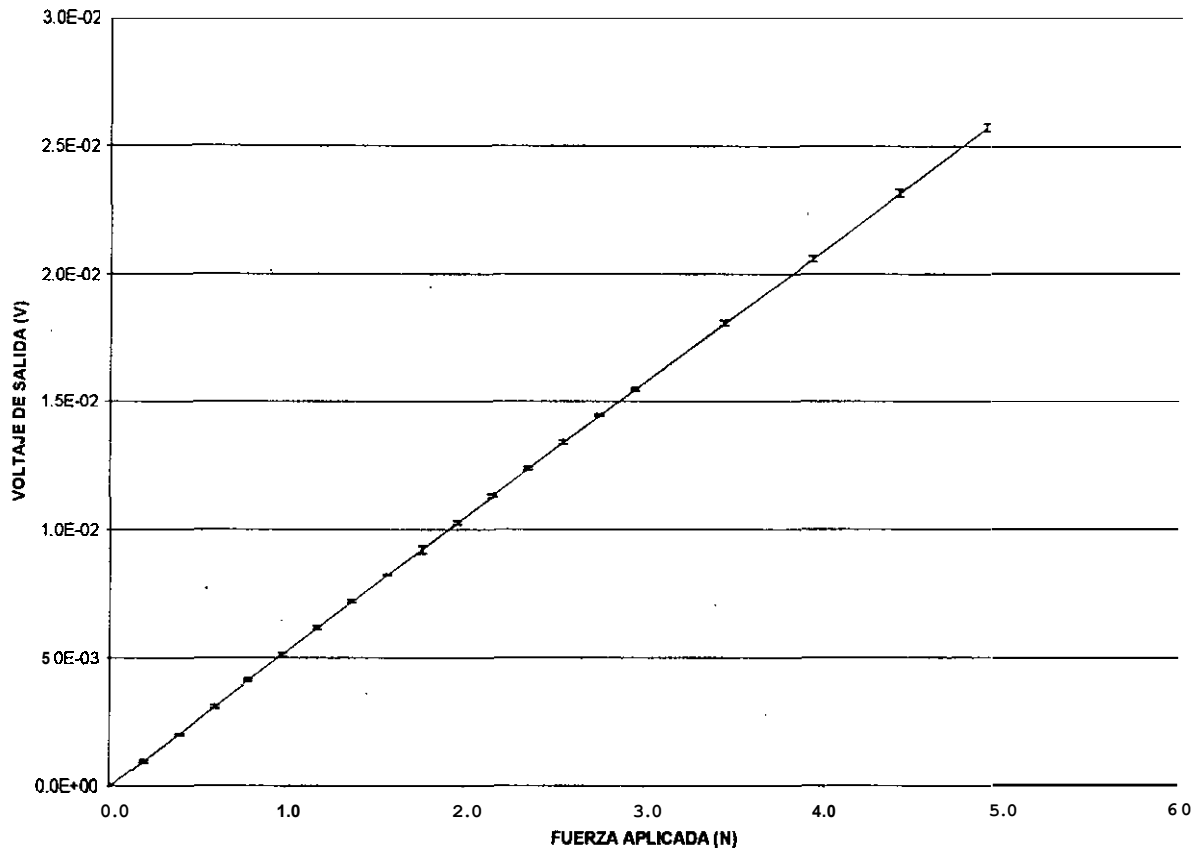
Peso (gr)	Ciclo 1 (mV)		Ciclo 2 (mV)		Ciclo 3 (mV)		Ciclo 4 (mV)		Ciclo 5 (mV)		Promedio (mV)	Desviación (mV)
	Inc.	Dec.	Inc.	Dec.	Inc.	Dec.	Inc.	Dec.	Inc.	Dec.		
0	-0.09	-0.08	-0.11	0.07	0.04	-0.02	-0.05	0.02	-0.02	-0.06	-0.03	0.06
20	0.96	0.95	0.97	1.12	0.95	0.99	0.98	1.00	1.03	1.01	1.00	0.05
40	1.96	1.96	1.97	2.08	2.03	1.99	2.01	1.99	2.01	2.07	2.01	0.04
60	2.98	3.04	3.04	3.21	3.08	3.02	3.06	3.02	3.01	3.12	3.06	0.07
80	4.05	4.16	4.10	4.25	4.10	4.08	4.09	4.11	4.11	4.14	4.12	0.05
100	5.06	5.12	5.09	5.25	5.07	5.09	5.03	5.10	5.08	5.20	5.11	0.07
120	6.10	6.11	6.08	6.28	6.14	6.14	6.11	6.15	6.18	6.24	6.15	0.06
140	7.15	7.13	7.11	7.34	7.17	7.21	7.16	7.20	7.21	7.29	7.20	0.07
160	8.23	8.16	8.20	8.20	8.22	8.23	8.19	8.27	8.26	8.26	8.22	0.03
180	9.22	9.24	9.21	8.78	9.20	9.30	9.22	9.27	9.27	9.30	9.20	0.15
200	10.22	10.21	10.18	10.46	10.24	10.28	10.26	10.30	10.19	10.31	10.27	0.08
220	11.24	11.24	11.20	11.42	11.30	11.30	11.32	11.33	11.34	11.35	11.30	0.06
240	12.31	12.33	12.28	12.46	12.28	12.37	12.36	12.45	12.33	12.44	12.36	0.07
260	13.32	13.30	13.30	13.48	13.32	13.39	13.42	13.45	13.41	13.45	13.38	0.07
280	14.45	14.39	14.35	14.46	14.38	14.47	14.46	14.50	14.44	14.52	14.44	0.05
300	15.47	15.36	15.42	15.50	15.41	15.49	15.50	15.46	15.55	15.54	15.47	0.06
350	18.04	17.92	17.87	18.05	18.06	18.10	18.07	18.05	18.21	18.15	18.05	0.10
400	20.53	20.34	20.47	20.56	20.55	20.57	20.67	20.72	20.65	20.71	20.58	0.12
450	22.99	23.07	22.94	23.24	23.13	23.27	23.24	23.32	23.30	23.32	23.18	0.14
500	25.63	25.65	25.50	25.52	25.72	25.76	25.83	25.85	25.92	25.94	25.73	0.15

Inc. Indica que la lectura se tomó incrementando la carga
Dec. Indica que la lectura se tomó disminuyendo la carga

En la figura 4.1 se presenta la curva de calibración, en donde se muestra que los datos registrados varían en forma lineal uno con respecto al otro. La incertidumbre de los

sensores se obtiene de los datos, la cual es de ± 3 gr, La equivalencia de la fuerza al voltaje de salida es:

$$20\text{gr} = 1.962\text{ N} = 1 \pm 0.15\text{mV}$$



Gráfica A.I. Curva de calibración del sensor de fuerza

REFERENCIAS.

- [1] Measurement Group, "Strain Gage Based Transducers their Design and Construction", Raleigh, North Carolina, U.S.A. 1988, pp. 8-15
- [2] Sanchez S J, "Aplicación de la extensometría eléctrica en el diseño de dispositivos para la medición de fuerza y presión", (Tesis de maestría; Mexico: Cenidet, febrero de 1998).
- [3] Measurement Group: op u t
- [4] Aguilar A. J. "Diseño y Construcción de un Dispositivo Utilizado para Recubrir Superficies Metálicas con óxidos Metálicos por medio de Fricción Seca", (Tesis de Maestría, México: Cenidet, Agosto de 1999)
- [5] Shigley J. E., Diseño Mecánico. Mc. Graw Hill, Mexico D.F., 1993
- [6] Sanchez S J: op cit
- [7] "Technical Notes", En: manual de Measurement Group Vishay, Strain Gage Technology, Measurement Group, Inc. U.S.A., 1992.
- [8] Norma ISA-S37.8, "Specifications and Test **for** Strain Gage Force Transducer", 1982, pp. 5-13

APÉNDICE B

PROGRAMA DE INTERFASE ENTRE EL MULTÍMETRO HP 34401A Y LA COMPUTADORA PERSONAL

El programa se realizó en lenguaje Basic y lenguaje SCPI, obteniéndose un programa con el que se pueden realizar un indefinido número de lecturas, manipulando tanto el tiempo y la precisión de cada una. El programa se utilizó para realizar la calibración y verificación de la deriva del sensor de fuerza. El programa se muestra a continuación:

```
CLS
LOCATE 1, 1
DIM cmd$(100), RESP$(1000)
  INPUT "Escriba el nombre del archivo: "; N$
  OPEN N$ FOR OUTPUT AS #2
  OPEN "COM2:1200,E,7,2,RS,CD0,LF,OP0" FOR RANDOM AS #1 LEN = 1000

'PONER EL MULTIMETRO EN LA FASE REMOTA
PRINT #1, ":SYST:REM"
PRINT #1, "**IDN?"
LINE INPUT #1, RESP$
PRINT "**IDN? RETURNED:", RESP$
PRINT
PRINT
PRINT
N = 0

WHILE N < 720
  N = N + 1
  LOCATE 3, 15: PRINT N
  PRINT #1, ":CONF:VOLT:DC 0.1,1E-6"
  PRINT #1, ":VOLT:DC:NPLC 100"
  TIMER ON
  Hora Inicio = TIMER
  PRINT #1, ":READ?"
  LINE INPUT #1, RESP$
```

```
'LOCATE N + 4, 16:
PRINT, RESP$
'LOCATE N + 4, 16:
PRINT#2, RESP$
  WHILE Tiempo Transcumdo < 5
    Tiempo Transcurrido =TIMER - Hora Inicio
    LOCATE3, 1: PRINTFIX(Tiempo Transcumdo)
  WEND
Tiempo Transcumdo = 0
WEND
CLOSE
END.
```

APÉNDICE C

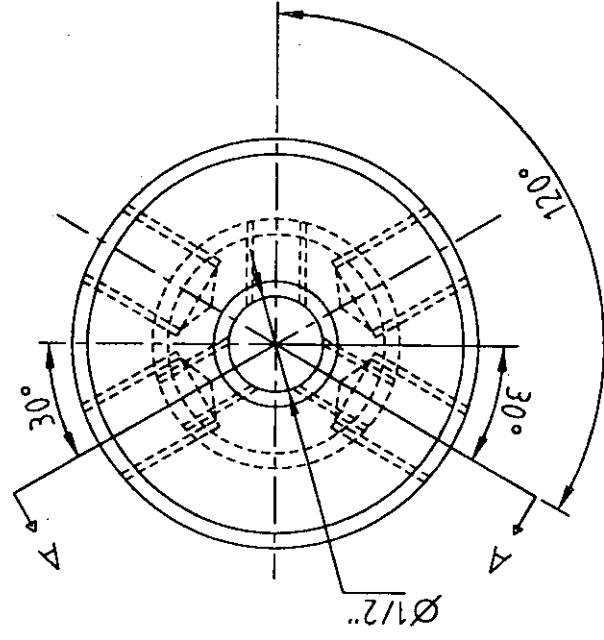
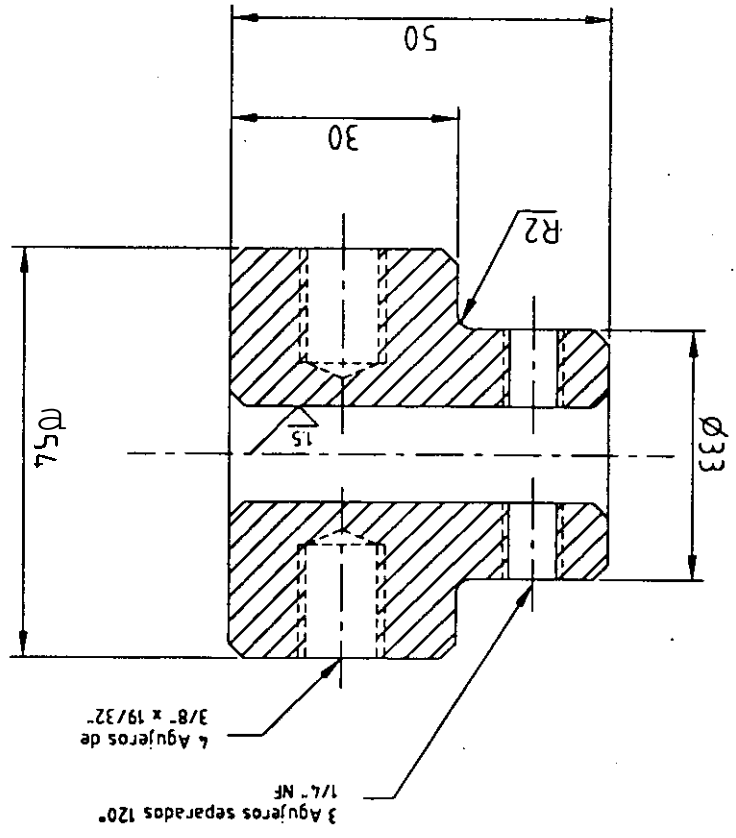
***PLANOS TÉCNICOS DEL DISPOSITIVO
PARA EL RECUBRIMIENTO DE SUPERFICIES
CURVAS POR TRIBOADHESIÓN***

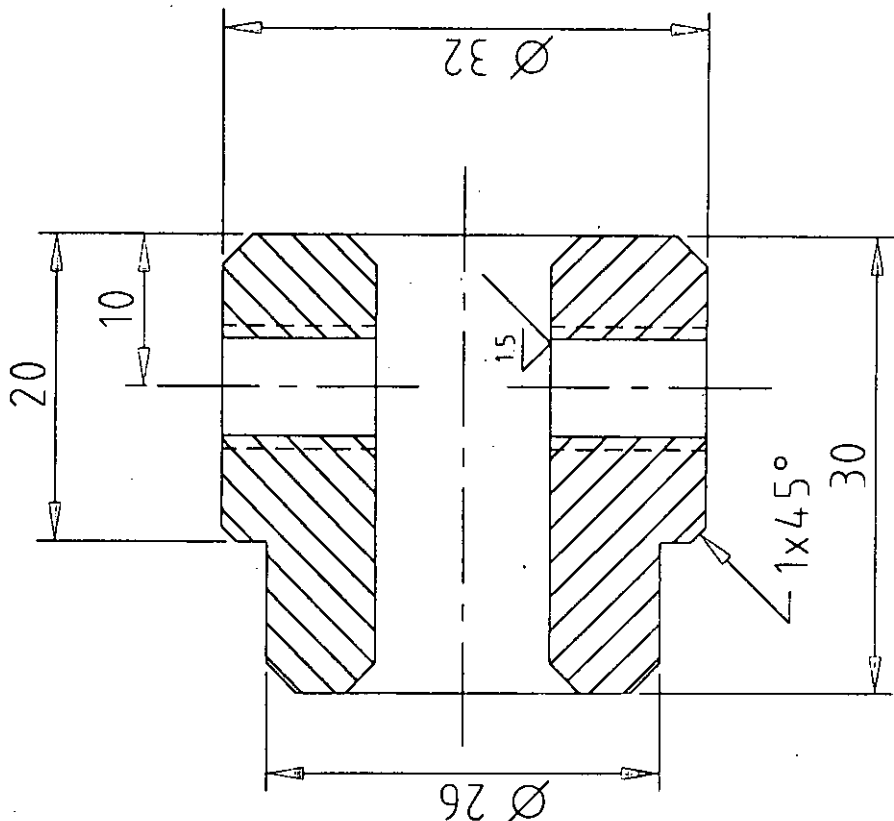
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Cenidet)	
Aro sujetador de Anillos	
Dib. Ing. José Manuel Robles Solís	Acot. mm
Fecha 24-03-99	escala 1:1
No 2	

todos los chafanes son de 2x45°

MATERIAL ALUMINIO 6061-16

SECCIÓN A-A



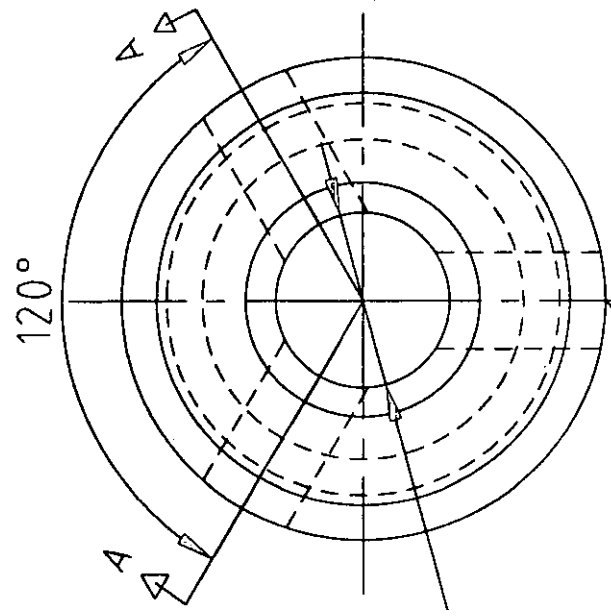


SECCIÓN A-A

Todos los chaflanes son de $2 \times 45^\circ$

Material Aluminio 6061-T6

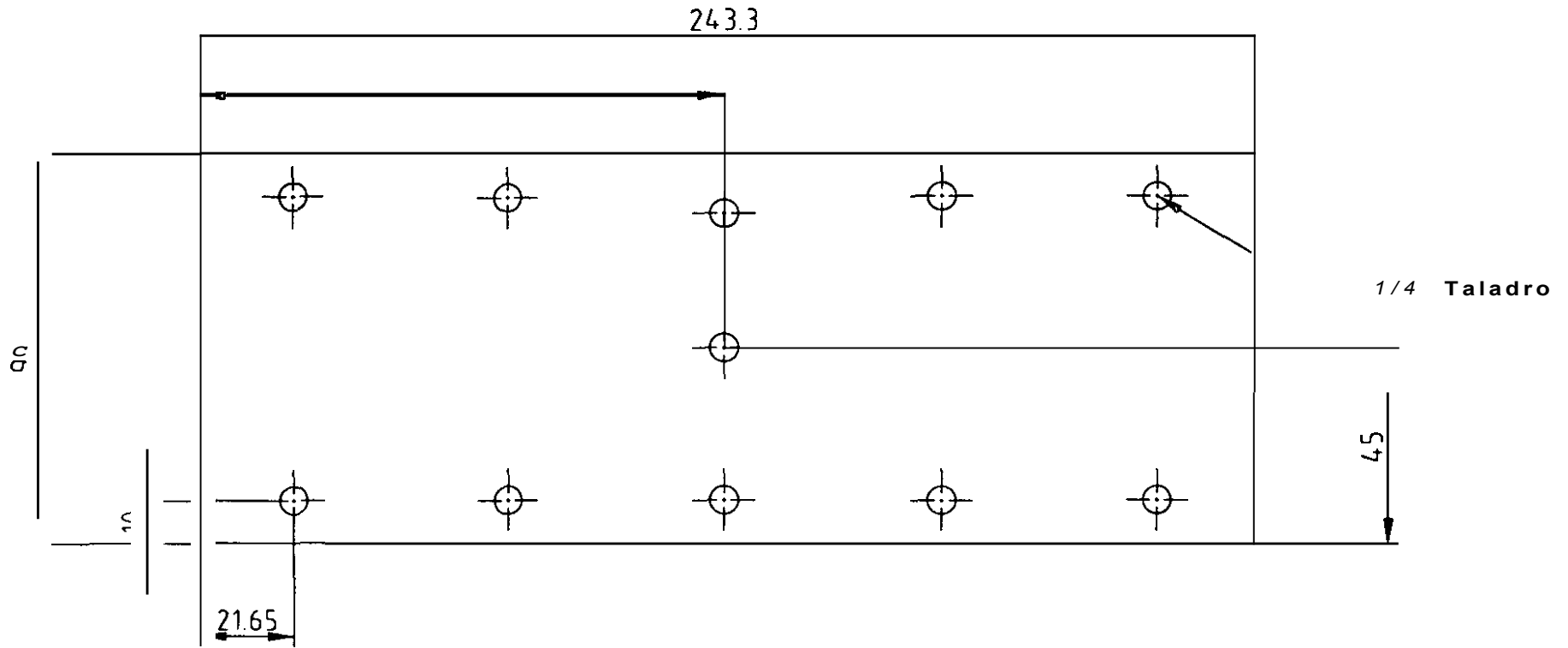
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Cenidet)	
ANILLO SUJETADOR TRASERO	
Dib. Ing. José Manuel Robles Solís	Acot. mm
Escala: 1:1	Núm. 3



3 Agujeros
de $1/4''$ NF

$\varnothing 19/64$

chaflados 120°



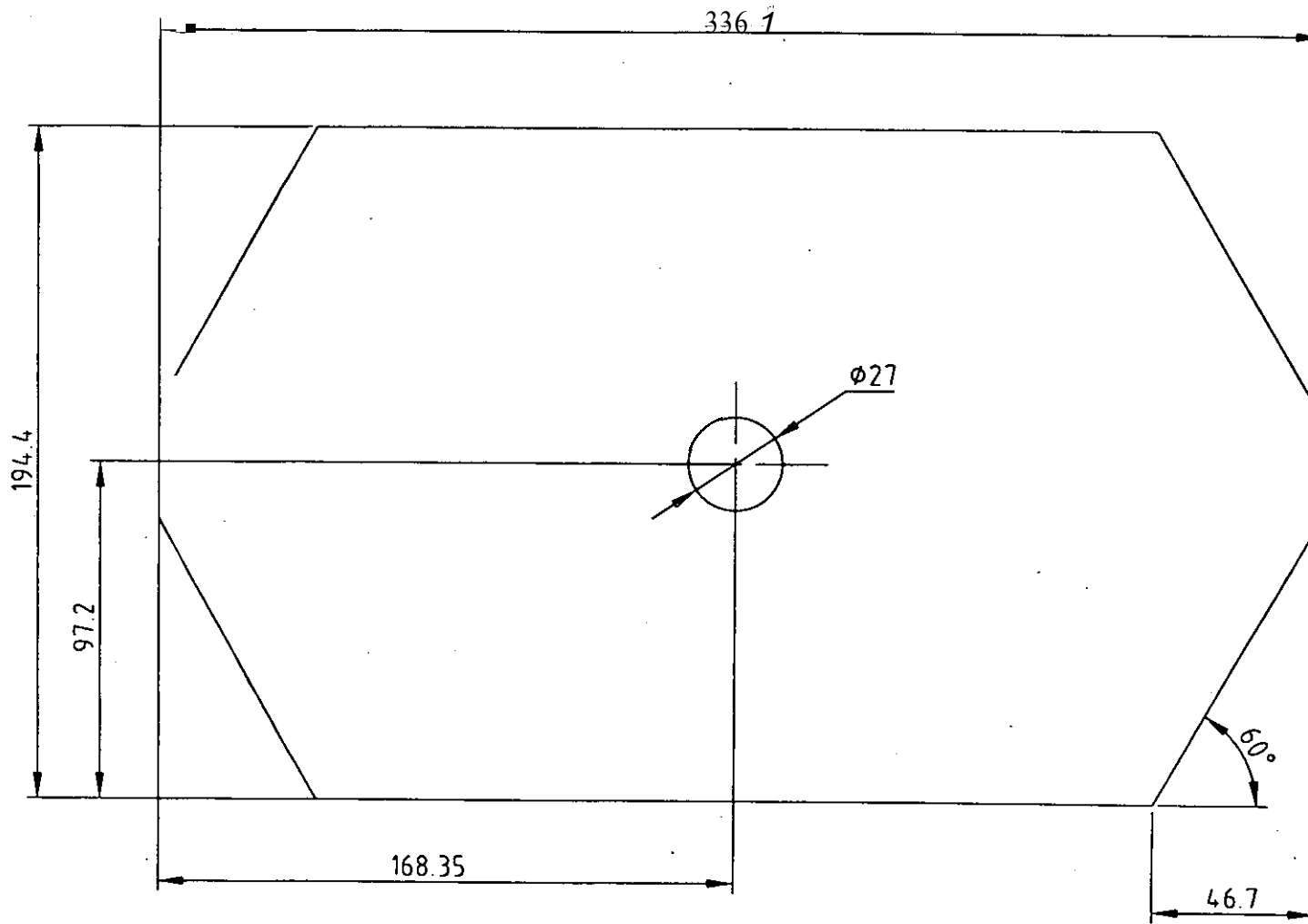
Redondear los fillos
 11 agujeros pasados
 Los agujeros estan
 espaciados 50 mm

Placa de acero AISI 1018 de 3/16"

Centro Nacional de Investigación y
 Desarrollo Tecnológico (Cenidet)

PLACA SOPORTE

ib Ing José Manuel Robles Solís	Acot mm
Fecha 24-03-99	escala 1 : 1 No 4



los 4 cortes iguales

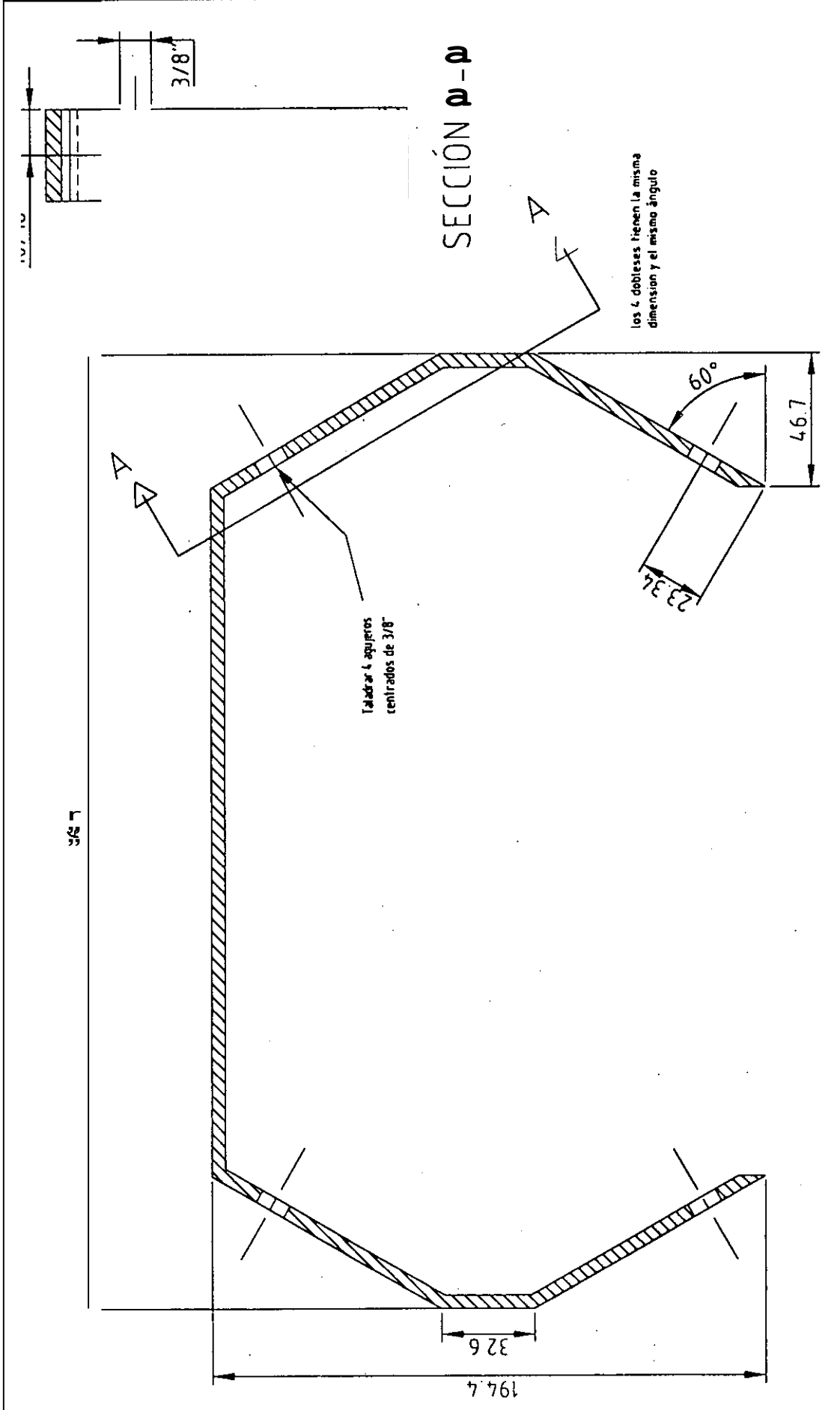
Placa de acero AISI 1018 de 3/16"

Centro Nacional de Investigación y
Desarrollo Tecnológico (Cenidet)

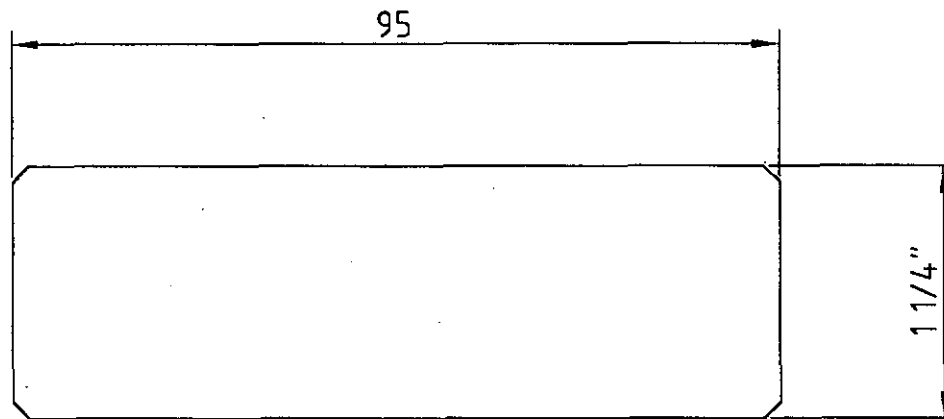
SOPORTE DE SOLERA

Dib. Ing. José Manuel Robles Solís Acat: mm

Fecha 24-03-99 escala 1:2 No 5



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Cenidet)	
MARCO DE SOLERA DOBLADA	
Dib. Ing. José Manuel Robles Solís	Acot. mm
Fecha 24-03-99	Escala 1:1
Nº 6	



todos los chaflanes son de $2 \times 45^\circ$

Preparar 6 piezas en solera de acero AISI 1018 de $3/16"$ x $1 1/4"$

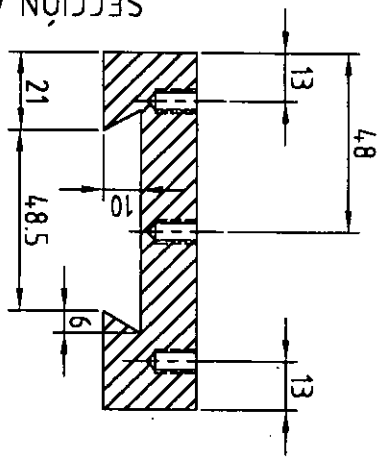
Centro Nacional de Investigación y
Desarrollo Tecnológico (Cenidet)

SOLERA PARA ENSAMBLE

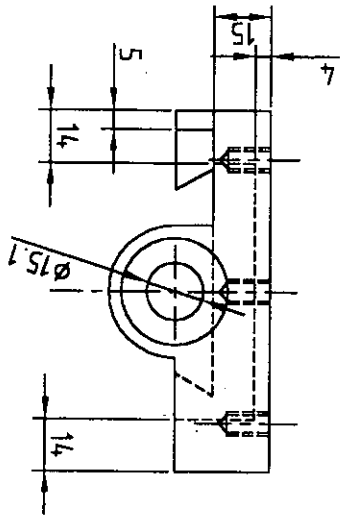
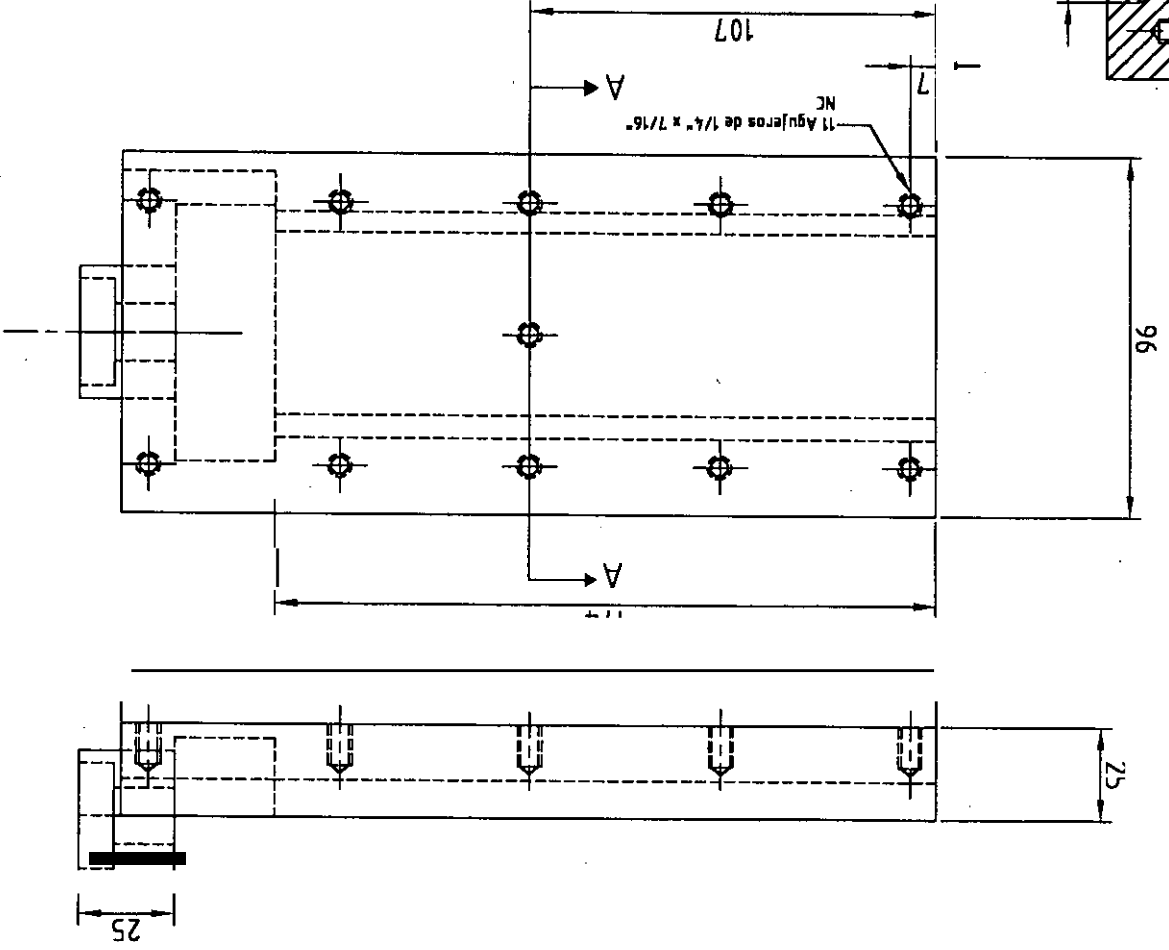
Dib. Ing. José Manuel Robles Solís | Acot: mm

Fecha 24-03-99 | escala 1:1 | No 7

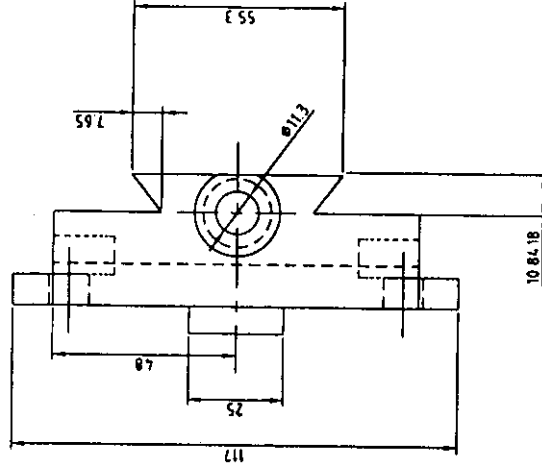
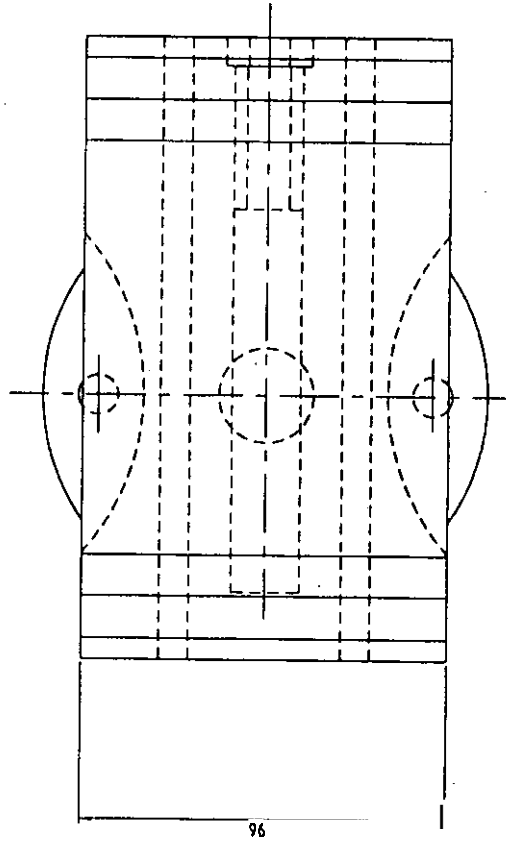
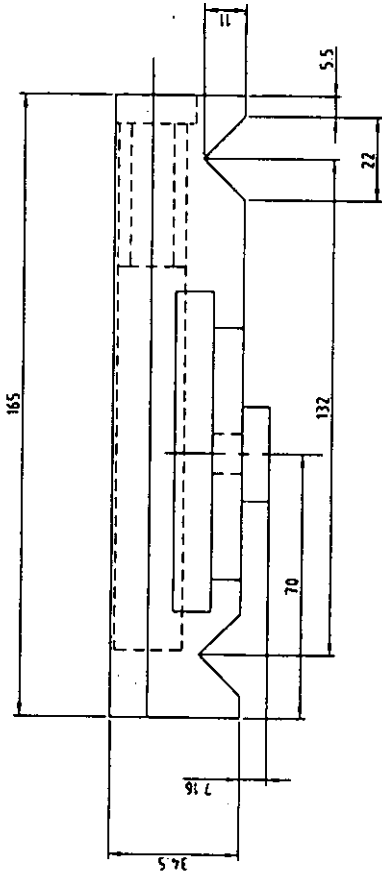
SECCIÓN A-A



Los agujeros están espaciados 50 mm
 Apartir de la pieza superior del carro auxiliar de torno presentada, maquinar la parte superior hasta obtener una superficie plana con las dimensiones especificadas, así como también realizar la manufactura de los agujeros roscados.



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Cenidet)	PARTE SUPERIOR DEL CARRO AUXILIAR DE TORNO	
Dib. Ing. José Manuel Robles Solís	Aco: mm	No 8
Fecha 24-03-99	escala 1:2	

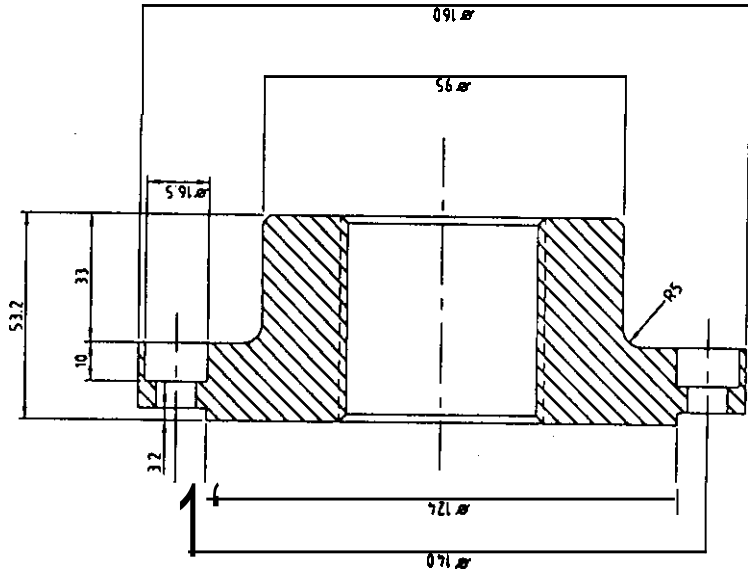
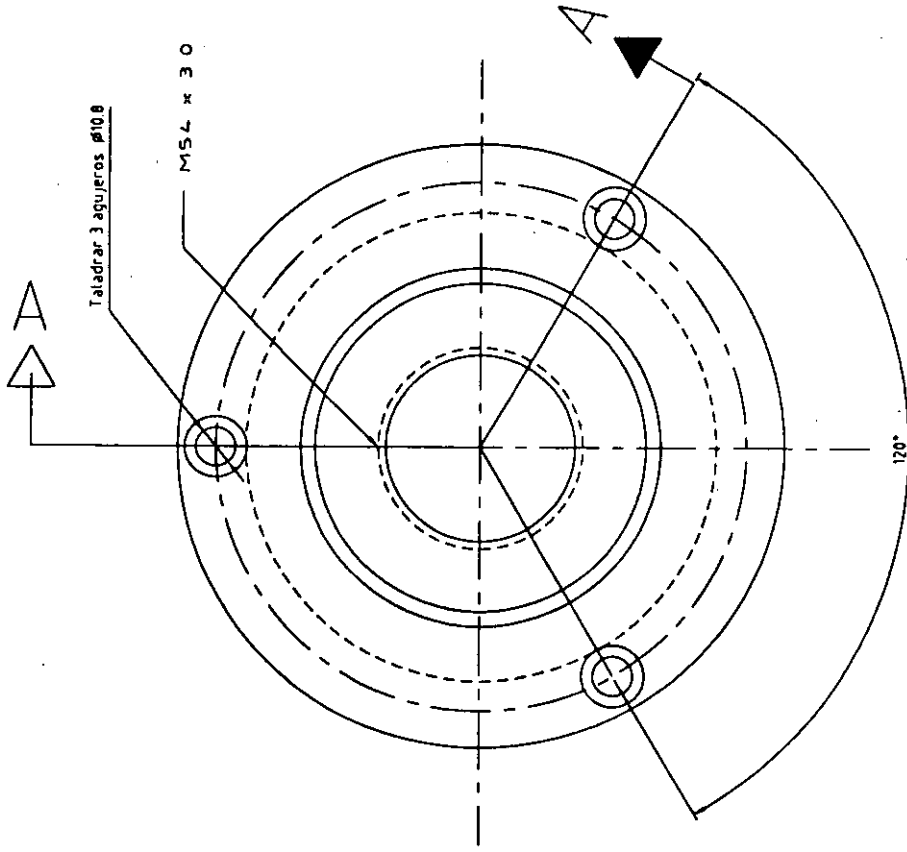


A partir de la parte inferior del carro auxiliar de torno presentada, maquinar los carriles triangulares de acuerdo a las dimensiones especificadas

Centro Nacional de Investigación y
Desarrollo Tecnológico (Cenidet)

PARTE INFERIOR DEL CARRO AUXILIAR DE TORNO

Dib. Ing. José Manuel Robles Solís Acat: mm

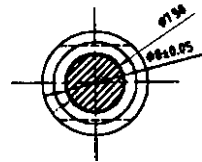


SECCIÓN A-A

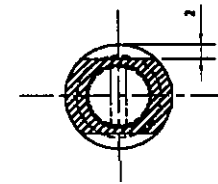
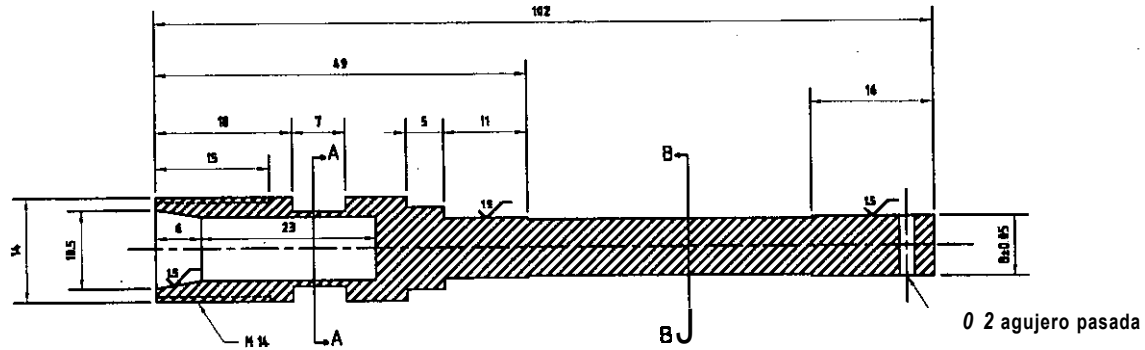
Todos los chafanes especificados son de 2 x 45°

Maquinar en acero AISI 4010

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Cenidet)	
ACOPLADOR DE CHUCK	
Dib. Ing. José Manuel Robles Solís	Acot: mm
Fecha 24-03-99	escala 1:2 No 10



SECCION B-B



SECCION A-A

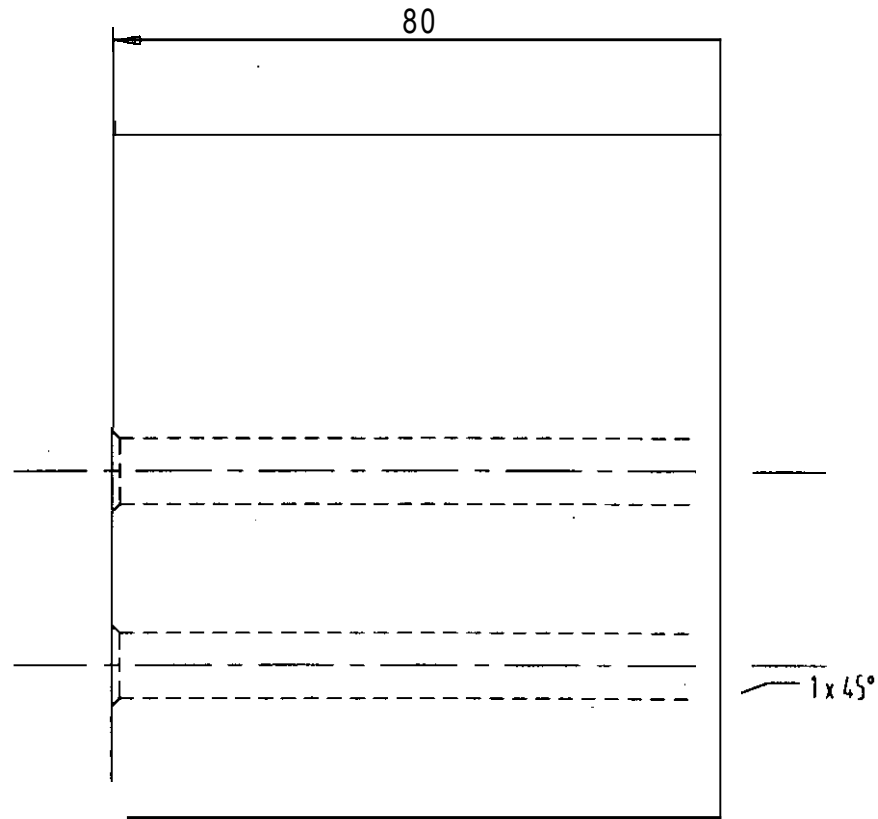
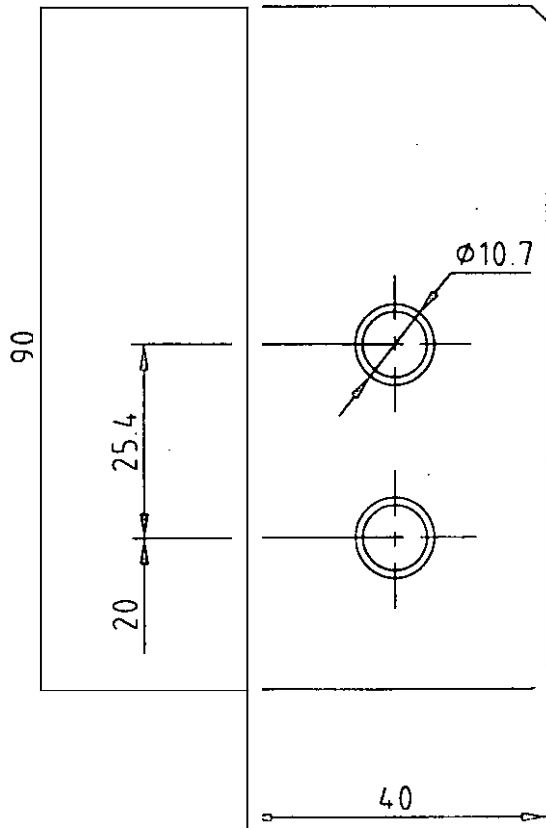
MATERIAL: ACERO AISI 4118

Centro Nacional de Investigación y
Desarrollo Tecnológico (Cenidet)

FLECHA DE TRANSMISION

Dib. Ing. José Manuel Robles Solís Acot: mm

Fecha 14-02-00 escala 1:1 No 11



maquinar 2 piezas en Material Cool-Role

Todos los chaflanes son de 2 x 45° a menos que se especifique lo contrario

Centro Nacional de Investigación y
Desarrollo Tecnológico (Cenidet)

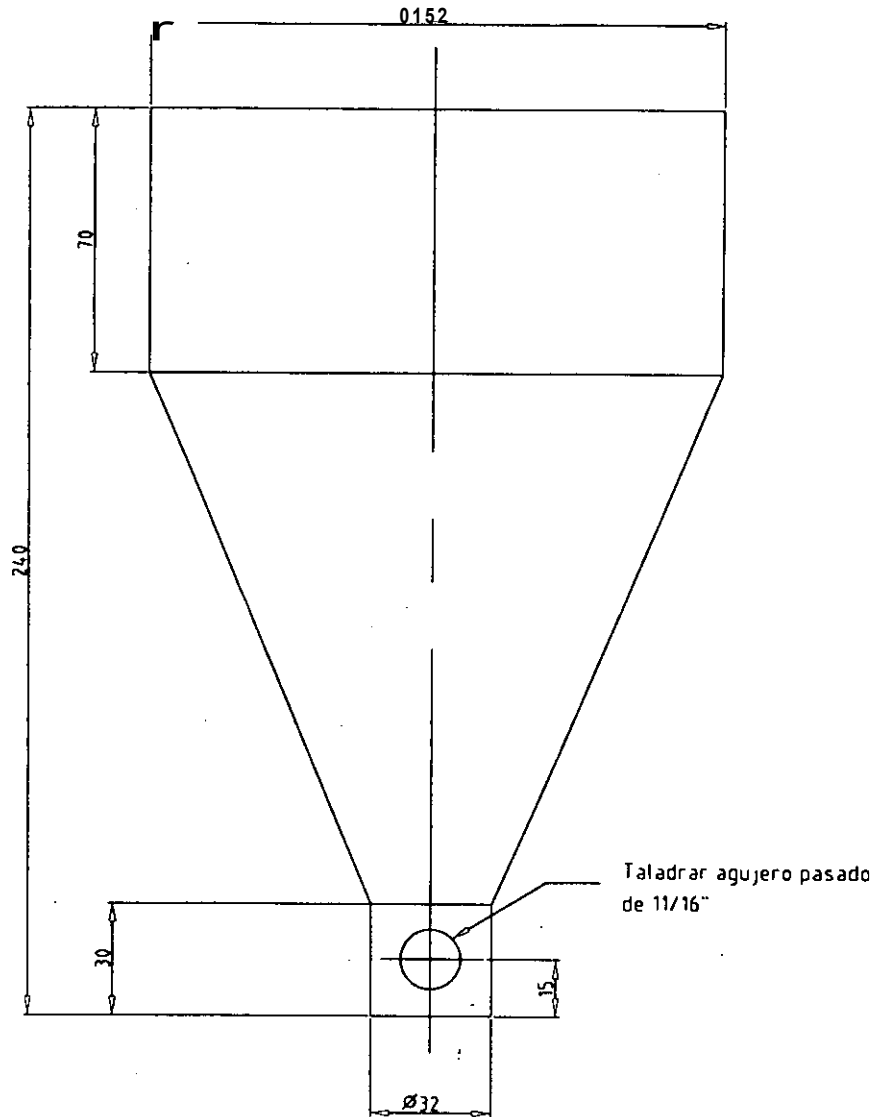
SOPORTE DE REDUCTOR

Dib Ing Jose Manuel Robles Solís

Acot mm

Fecha 24-03-99 | escala 1 1

No 12



Material Lamina de Acero Inoxidable de 1/16"

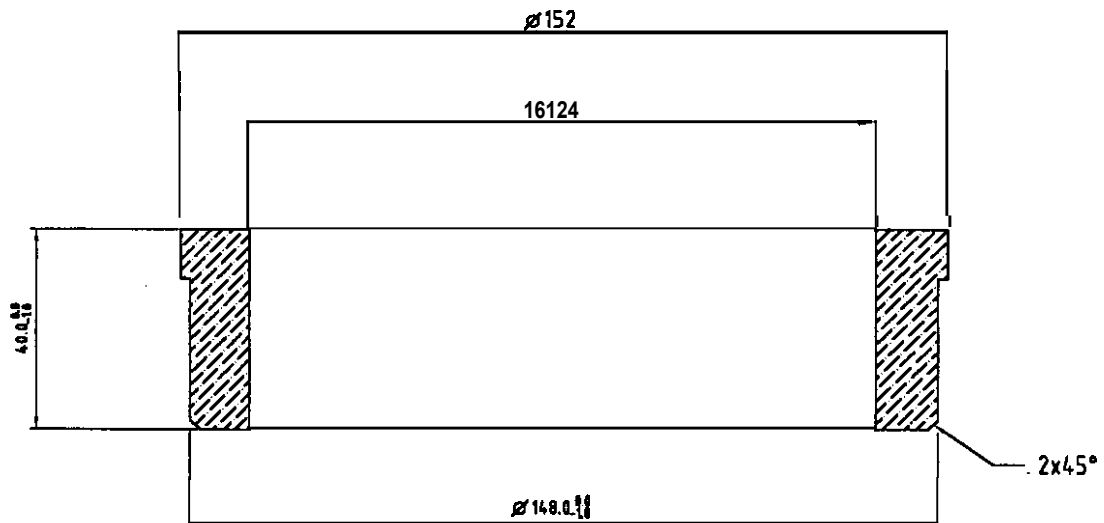
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS

Rev. Dr. Jesús Porcayo

CONTENEDOR DE POLVOS

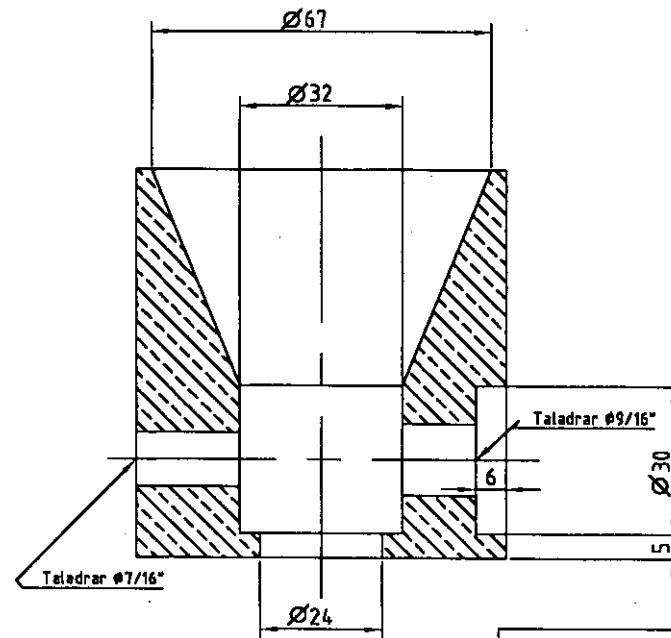
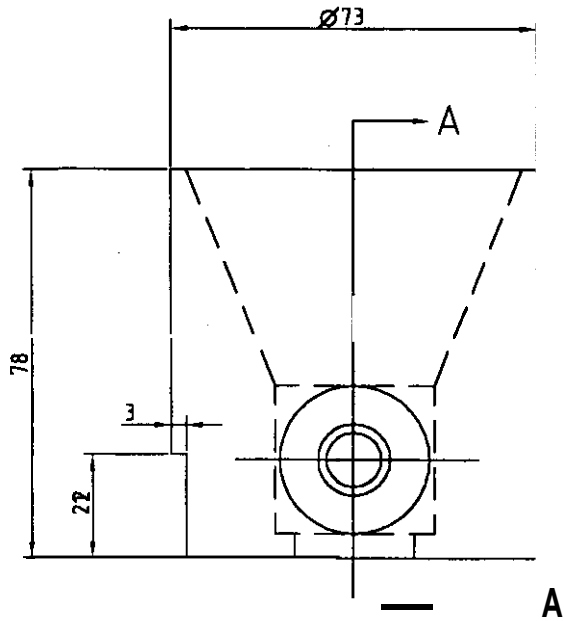
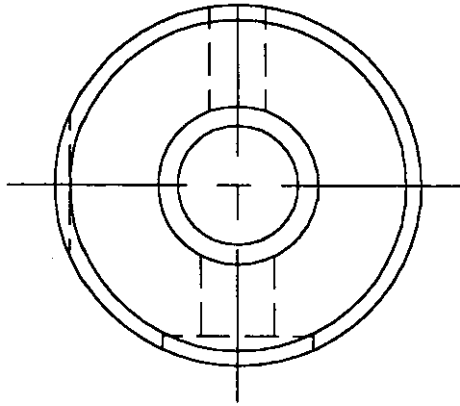
Dib. Ing. Jose Manuel Robles Solís Arnt mm

Fecha 24-03-99 escala 1:2 No 13



Material: Aluminio

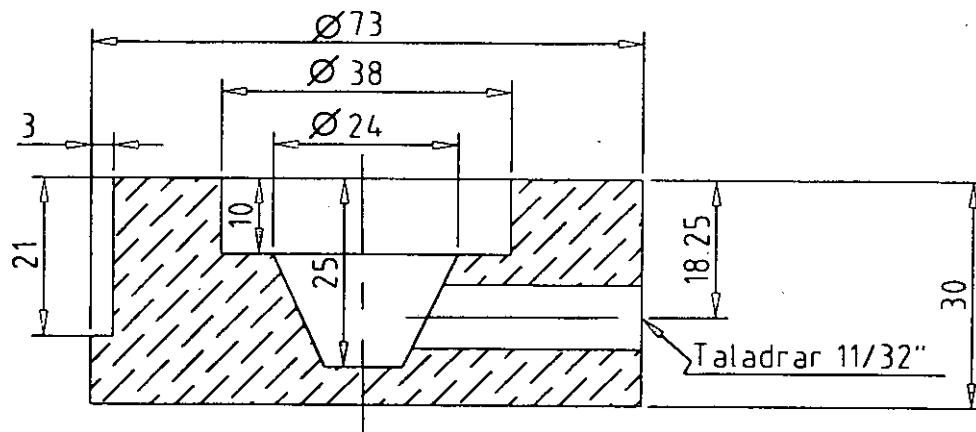
CENIDET		
Rev. Dr. Jesús Porcayo.		
PORTA TAPADERA		
ib. Ing. José Manuel Robles Solís	Acot: mm	
Fecha: 17-06-99	escala 1:2	No 14



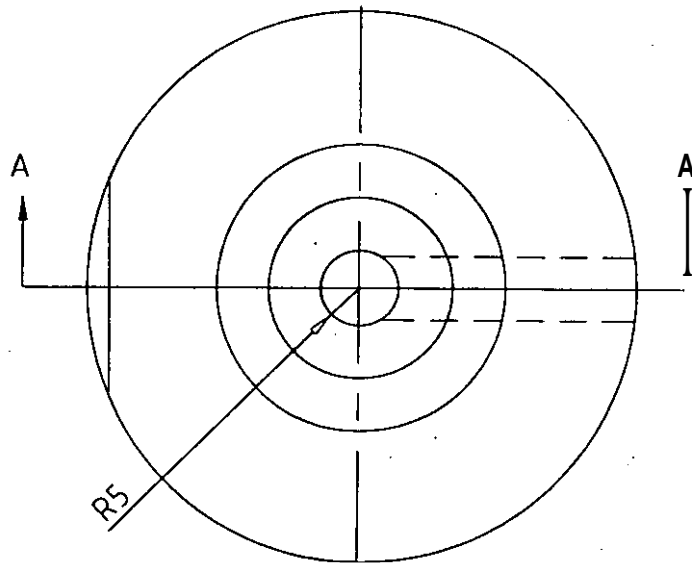
SECCIÓN A-A

Materia: Aluminio

Centro Nacional de Inv. y Desarrollo Tecnológico		
Rev. Dr. Jesús Porcayo		
BASE PORTA BOQUILLA		
Elaborado por: Ing. José Manuel Robles Solís	Acot: mm	
Fecha: 17-06-99	escala 1: 1.5	No 15



SECCIÓN A-A



Eliminar fillos

Material Aluminio

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS

Rev. Jesús porcayo

BASE PORTA FILTRO

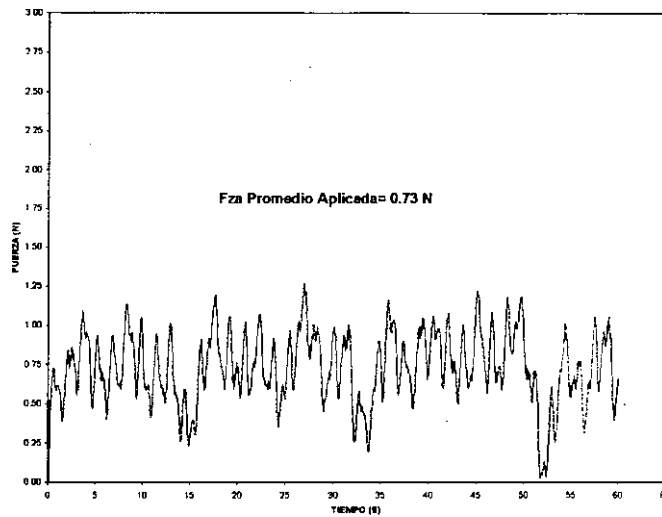
Elab Ing Jose Manuel Robles Solís, Arn mm

Fecha 18-06-99 escala 1 1 No 16

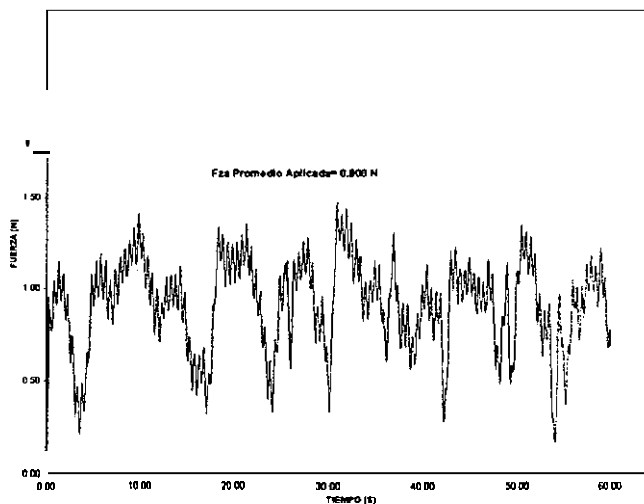
APÉNDICE D

FUERZAS REALES QUE SE APLICARON DURANTE LAS PRUEBAS DE DEPOSICIÓN POR TRIBOADHESIÓN

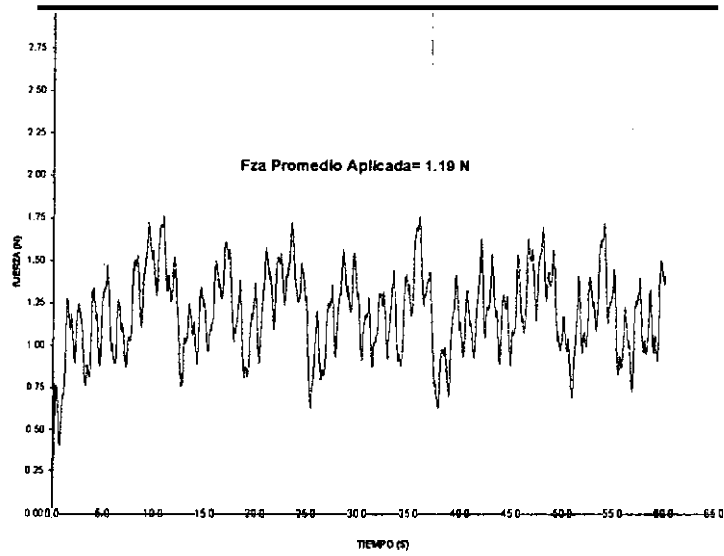
Este apéndice muestra los datos de fuerza graficados contra el tiempo de las pruebas de recubrimiento que se efectuaron sobre cobre y sobre acero para rodamientos.



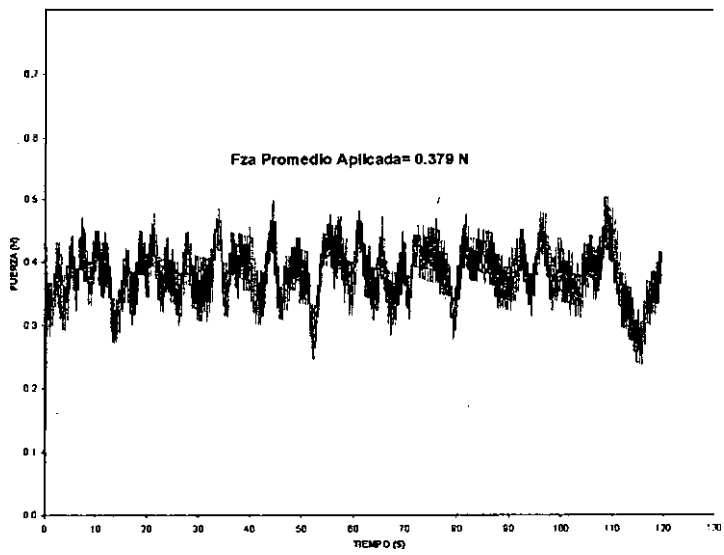
Gráfica D.1. Fuerza aplicada durante la prueba número 1 de la tabla 4.3
Deposición de diamante sobre cobre



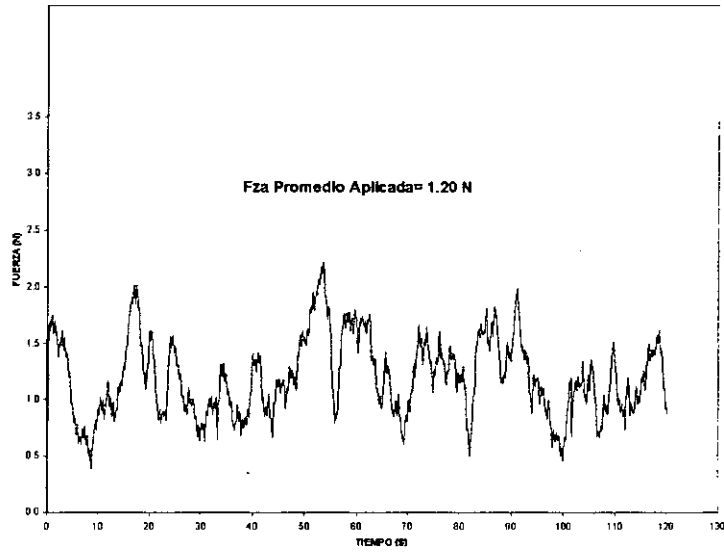
Gráfica D.2. Fuerza aplicada durante la prueba número 2 de la tabla 4.3
Deposición de diamante sobre cobre



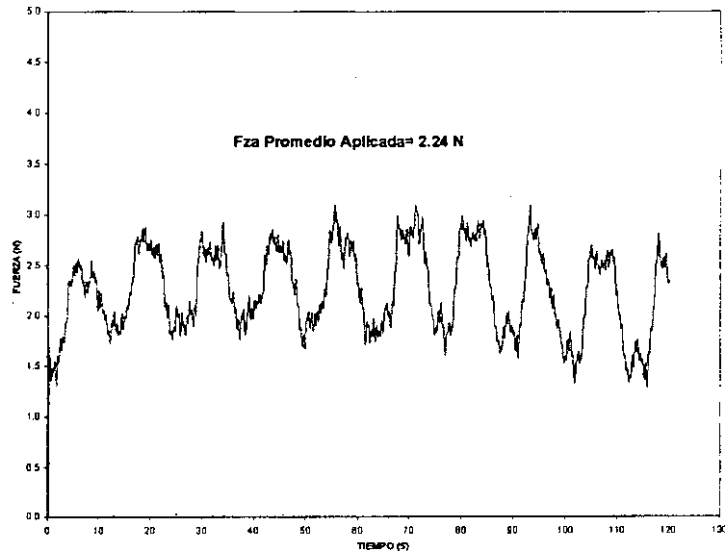
**Gráfica D.3. Fuerza aplicada durante la prueba número 3 de la tabla 4.3.
Deposición de diamante sobre cobre**



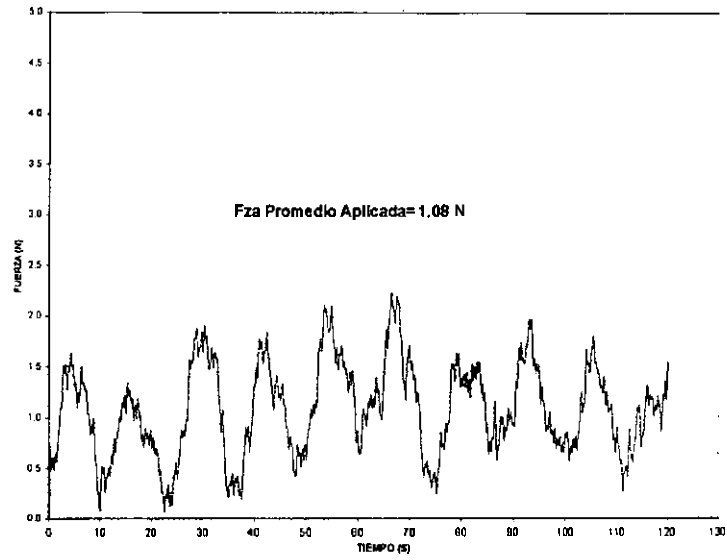
**Gráfica D.4. Fuerza aplicada durante la prueba número 2 de la tabla 4.4.
Deposición de diamante sobre pistas de rodamientos**



**Gráfica D.5. Fuerza aplicada durante la prueba número 3 de la tabla 4.4
Deposición de diamante sobre pistas de rodamientos**



**Gráfica D.6. Fuerza aplicada durante la prueba número 4 de la tabla 4.4.
Deposición de diamante sobre pistas de rodamientos**



**Gráfica D.7. Fuerza aplicada durante la prueba número 3 de la tabla 4.4
Deposición de diamante sobre pistas de rodamientos**

BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- [1] Aguilar A. J. "Diseño y Construcción de un Dispositivo Utilizado para Recubrir Superficies Metálicas con óxidos Metálicos por medio de Fricción Seca". (Tesis de Maestría, Mexico: Cenidet, Agosto de 1999)
- [2] Archard J F, "Elastic Deformation and Laws of Friction", (en: Proc. R. Soc. A 243) pp 190-205
- [3] Beilby Sir George, "Aggregation and Flow de Solids", 1st ed. London, Mamillan & Co.
- [4] Bell. T "Surface engineering: its current and future impact on tribology", (en: J. of Phys. Appl., 25 1992) pp. A297-A306
- [5] Bowden F. and Tabor D., Friction and Lubrication first published (lithography in Great Britain by Latimer Trend & Co. Ltd., Whitstable 1956)
- [6] Bowden F. and Tabor D., The Friction and Lubrication of Solids first published (lithography in Great Britain at The University Press, Oxford, part I, 1950)
- [7] Bowden F. and Tabor D., The Friction and Lubrication of Solids first published (lithography in Great Britain at The University Press, Oxford, part II, 1950)
- [8] Byeli V. A., Minevich A. A, Stepanenko V. A, Gick A. L. and Kholodiiiov V. O. "Wear resistance and structure of (Ti,Al)N coatings", (en: J. of Phys. Appl., 25 1992) p. A292
- [9] Cowan S R and Ward OW, "Surface engineering.. .an enigma of choices", (en: J. of Phys. Appl., 25 1992)(Agosto 1995).pp. A285-A291
- [10] Deutschman A, Waiter J M and Charles E W, "Fundamentos de las fallas de los baleros", (en: Diseño de maauinas Teoría y Practica, pp. 506-507, ed. CECSA, c1985 Quinta reimpresión, 1995
- [11] Dingley D J, The Naav Coating Proces, H. H. Wills Physics Laboratory, University of **Bristol**, United Kingdom, 1993 (**Bristol BS8 1 TL**)
- [12] Fan H. Q., Pereira E "Diamond Deposition on Copper: studies on nucleation, growth, and adhesion behaviors", 21 August 1998

- [13] Ferrant, J. and Buckley. D.H, "A Review of Surface Segregation, Adhesion and Friction Studies Performed on Copper-Aluminum, Copper-Tin and Iron-Aluminum Alloys", (en: ASLE Transactions, 15, 1, 1972) pp 18-24
- [14] Fuller D. D., "Theory and Practice of Lubrication for Engineers" Wiley, New York, 1956.
- [15] Gabe D.R. "Metallic Coatings for Protection", (en: Metallic and Inorganic Coatings. Department of Materials Engineering and Design, Loughborough University of Technology, England), pp 63-73
- [16] Gansheimer J. y Holinki R. "Molybdenum Disulfide In Oils and Greases Under Boundary Conditions", (en: Transactions of the ASTM, April 1973) pp 242-247
- [17] Godfrey D. and Bisson E. E., "Bonding of Molybdenum Disulfide to Various Materials to Form a Solid Lubricating Film I", Nat'l Advisory Committee for Aeronautics, 1952
- [18] Greenwood, J. A. and J. B. Williamson "Contact of Nominally Flat Surfaces" (en: Proc. R. Soc. London. A, 295, 1966) p. 300
- [19] Groover, M, Fundamentos de Manufactura Moderna, 1ª edición en español, Pentice-Hall, 1997
- [20] Johnson K. L., "Note on the Adhesion of Elastic Bodies", (en: J. Appl. Phys., 9, 1958) pp.199-200
- [21] Kraffl M. Joseph "Surface Friction in Ballistic Penetration" (en: J. Appl. Phys. 26,10, October 1955) p.1248
- [22] Martinez P Francisco, "La tribología, su importancia y desarrollo en el mundo en Cuba. Tendencias en las investigaciones y su aplicación", (en: La tribología Ciencia y técnica para el mantenimiento, ed. LIMUSA, c1997), p.10
- [23] Measurement Group, "Strain Gage Based Transducers their Design and Construction", Raleigh, North Carolina, U.S.A, 1988, pp. 8-15
- [24] Metals Handbook Atlas of microstructures of industrial alloys, 8th edition, by the American society for metals. Vol. 7, 1972, p 273
- [25] Metco Perkin Elmer Catálogo No 4MP 111, Instructions G38851 Iss,b, Printed in USA, 1990.

- [26] Morales E G E, Skrzypinski A, Rusek P, Pérez U A, Haduch Z, "Desarrollo de la Tribología en el Mundo", Reporte técnico 1997. ppl-6
- [27] Narayan J, Godbole P, Matera G and Singh R. R., (en: J. Appl. Phys. 71,1992) p.966
- [28] Norma ISA-S37.8. "Specifications and Test for Strain Gage Force Transducer", 1982. pp. 5-13
- [29] Pulker H. K. and Perry A. J., "Adhesión", (en: Surface Technology, 14, 1981) pp 25-39.
- [30] "Technical Notes", En: manual de Measurement Group Vishay, Strain Gage Technology, Measurement Group, Inc. U.S.A., 1992.
- [31] Rabinowicz E. "Teorical Criteria for the Effectiveness of a Lubricant Film", (en: American Society of Lubrication Engineers (ASLE), 1, 1958) p 96
- [32] Rodriguez L. J., Proceso para recubrir placas metálicas con óxidos metálicos por fricción seca, México: Cenidet, Proyecto CoSNET 597-P 1997
- [33] Rodriguez L. J., Recubrimiento de Placas de Aluminio con Polvo de Acero al Alto Carbón por Tnboadhesión. Reporte internó, Cenidet 1999.
- [34] Sanchez S J, "Aplicación de la extensometría eléctrica en el diseño de dispositivos para la medición de fuerza y presión". (Tesis de maestría; México: Cenidet, febrero de 1998).
- [35] Sarkar A. D., Desaaste de Metales, Edit. Noriega Limusa, (1990)
- [36] Shewmon G P and Winslow R F "Diffusion in Metals", (en: An Chemical Engineering Fundamentals Review, Vol.52, N0.4 April 1960) pp 343-346
- [37] Shigley J. E., Diseño Mecánico, Mc. Graw Hill, Mexico D.F., 1993
- [38] SKF, Catáloao General. Italia: Stamperia Artistica Nazionale, 1997. p.175
- [39] SKF; Lubricación de rodamientos. Publicación PI 400/I Sp 1985, Suecia: Palmeblads, pp 2-4
- [40] SKF. Reporte de Inaeniería SKF "NoWear", 1999
- [41] Smith W F, Fundamentos de la Ciencia e Inaeniería en Materiales. segunda edición. Edit. McGraw Hill, 1993, 927p

- [42] Staia H. y Puchi S. E. "Propiedades Tribológicas de Tin-CVD en Condiciones de deslizamiento sin lubricación", (www.coppe.ufri.br/~notimat/materia/Vol1N2/artigo8/artigo.htm) Venezuela, 18, Julio 1998
- [43] Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, 1998. American Society for Testing and Materials, Race St. Philadelphia (E407-93).
- [44] Stolarski T.A. Tribology in Machine Design, first published (New York, 1990), p.275
- [45] Stott H. F., Mitchell G. D. and Wood C. G. "The Influence of temperature on the friction and wear of thin ceramic coatings in carbon dioxide", (en: J. of Phys. Appl., 25, 1992) pp. A177-A184
- [46] Sulzer Metco. Catálogo para selección de polvos de recubrimiento, México, 1997
- [47] Yoshitsugu Kimura. "Updating the fracture theory of wear", (en: J. of Phys. Appl., 25, 1992) pp. A177-A184
- [48] You Wang, Tingquan Lei, Mufu Yan, and Caiqiao Gao "Frictional temperature field and its relationship to the transition of wear mechanisms of steel 52100". (en: J. of Phys. Appl., 25, 1992) pp. A165-A176
- [49] Zygmunt Haduch. "Significado tecnológico y económico de las investigaciones tribológicas en procesos de fricción y desgaste", (en: Gestión tecnológica, 1, Mayo 1986) pp 7-11

SEP CENIDET DGIT
CENTRO DE INFORMACION

00-0662