

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE CIENCIAS FISICO-MATEMATICAS**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**DISEÑO, CONSTRUCCION Y CALIBRACION DE UNA ESTRUCTURA  
DE SOPORTE Y ACERCAMIENTO PRIMARIO PARA UN  
MICROSCOPIO DE CAMPO CERCANO**

**T E S I S**

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL  
GRADO DE MAESTRIA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN  
METROLOGIA DE LA RADIACION**

**PRESENTA**

**LIC. FRANCISCO JAVIER TREVIÑO GLAJARDO**

**ASESORES**

**M.C. RIGOBERTO GARCIA CANTU (†)**

**DR. BERNABE LUIS RODRIGUEZ BUENROSTRO**

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. NOVIEMBRE DE 1998**

1888 DESTRUCTION OF LIBRARY ESTABLISHED BY  
SOCIETY OF AMERICAN MICROSCOPISTS  
DESTRUCTION OF LIBRARY ESTABLISHED BY  
SOCIETY OF AMERICAN MICROSCOPISTS

TM  
Z 6 6 5 1  
F C E M  
1 9 9 8  
T 7



1020124830

ENCUADERNACIONES MODERNAS AMERICANAS  
JESUS M. GARZA # 1217 OTE.  
COL. TERMINAL  
MONTERREY, N. L. MEXICO  
TEL. 374-02-59

# UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE CIENCIAS FISICO-MATEMATICAS  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



DISEÑO, CONSTRUCCION Y CALIBRACION DE UNA ESTRUCTURA  
DE SOPORTE Y ACERCAMIENTO PRIMARIO PARA UN  
MICROSCOPIO DE CAMPO CERCANO

## TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL  
GRADO DE MAESTRIA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN  
METROLOGIA DE LA RADIACION

PRESENTA

LIC. FRANCISCO JAVIER TREVIÑO GUAJARDO

ASESORES

M.C. RIGOBERTO GARCIA CANTU (+)

DR. BERNABE LUIS RODRIGUEZ BUENROSTRO

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. NOVIEMBRE DE 1998

N

01-1-121

+

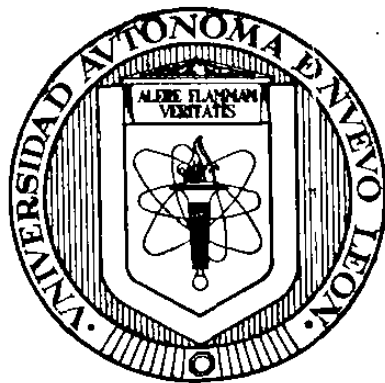


**FONDO  
TESIS**

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN  
DE UNA ESTRUCTURA DE SOPORTE Y  
ACERCAMIENTO PRIMARIO PARA UN  
MICROSCOPIO DE CAMPO CERCANO

## T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER  
EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD  
EN METROLOGÍA DE LA RADIACIÓN

P R E S E N T A

LIC. FRANCISCO JAVIER TREVIÑO GUAJARDO

ASESORES :

M.C. RIGOBERTO GARCÍA CANTÚ (f)

DR. BERNABÉ LUIS RODRÍGUEZ BUENROSTRO

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N. L.    NOVIEMBRE DE 1998

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UNA  
ESTRUCTURA DE SOPORTE Y ACERCAMIENTO PRIMARIO  
PARA UN MICROSCOPIO DE CAMPO CERCANO**

**T E S I S**

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN METROLOGÍA DE  
LA RADIACIÓN**

**P R E S E N T A**

**LIC. FRANCISCO JAVIER TREVIÑO GUAJARDO**

**A S E S O R E S :**

**M.C. RIGOBERTO GARCÍA CANTÚ (†)  
DR. BERNABÉ LUIS RODRÍGUEZ BUENROSTRO**

**SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L., NOVIEMBRE DE 1998**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UNA  
ESTRUCTURA DE SOPORTE Y ACERCAMIENTO PRIMARIO  
PARA UN MICROSCOPIO DE CAMPO CERCANO**

Tesis presentada por el Lic. Francisco Javier Treviño Guajardo como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Especialidad en Metrología de la Radiación, aprobada por el siguiente jurado:

**P R E S I D E N T E:**

---

**DR. BERNABÉ LUIS RODRÍGUEZ BUENROSTRO**

**S E C R E T A R I O:**

---

**DRA. NORA ELIZONDO VILLARREAL**

**V O C A L:**

---

**DR. RUBÉN MORONES IBARRA**



# DEDICATORIA

A mis maestros:

M.C. Rigoberto García Cantú (†)  
(Nada es en vano)  
Dr. Bernabé Luis Rodríguez Buenrostro

A mis padres:

Francisco Treviño Cortés e  
Irma Guajardo Treviño de Treviño

A mi hermana:

Lic. Rosa Elena Treviño Guajardo

## AGRADECIMIENTOS

*Me dirijo al Señor, Nuestro Dios, para darle las gracias por haberme permitido cumplir con esta meta, por dejarme conocer al Dr. Bernabé Luis Rodríguez Buenrostro a quien cuya inagradable paciencia e incansable ayuda le debo el hacer realidad el compromiso que me fijé al iniciar esta maestría. Al M.C. Rigoberto García Cantú (†), cuyos conocimientos y entendimiento, además de franca voluntad de ayuda han dejado en mí una huella imborrable. A la Dra. Nora Elizondo Villarreal quien me ha hecho pensar en el enorme potencial de cosas que podemos realizar con un poco de empuje y mucho de aliento. Al Ing. Roberto Benítez Chávez de la compañía MÉTRICA y al Ing. Alejandro Arredondo Morales de Maquinaria Industrial Monterrey, por su valioso apoyo en la terminación de este proyecto.*

*Dios mediante, doy las gracias a mis padres Sr. Francisco Treviño Cortés y Sra. Irma Guajardo Treviño de Treviño y a mi hermana Rosa Elena Treviño G. A mis abuelos y demás familiares que han sabido darme el sustento y las fuerzas cuando estas llegaron a faltarme. En especial deseo agradecerle a mi abuelo Aradio Guajardo Lozano (†) quien me dió tanta fuerza y empuje de niño y a quien perdí apenas iniciados mis estudios en esta maestría.*

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN. . . . .	1
CAPÍTULO I	
ANTECEDENTES. . . . .	2
CAPÍTULO II	
DESARROLLO DEL MICROSCOPIO DE BARRIDO TIPO TÚNEL. . . . .	8
CAPÍTULO III	
MICROSCOPIO DE CAMPO CERCANO . . . . .	11
(Evolución de la microscopía de barrido tipo túnel)	
a) Bases teóricas e hipótesis de la evanescencia de campos electromagnéticos . . . . .	13
b) Hipótesis del funcionamiento del microscopio de campo cercano . . . . .	15
CAPÍTULO IV	
METROLOGÍA REALIZADA CON LOS MICROSCOPIOS DE BARRIDO TIPO TÚNEL . . . . .	18
CAPÍTULO V	
PROPUESTA DE TESIS. . . . .	20
CAPÍTULO VI	
DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA DE ACERCAMIENTO PRIMARIO . . . . .	21
CAPÍTULO VII	
DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS PARTES DEL SISTEMA DE ACERCAMIENTO PRIMARIO Y DESCRIPCIÓN DE LA OBTENCIÓN DE LAS PUNTAS DE FIBRA ÓPTICA. . . . .	26
a) Descripción de las partes del sistema de acercamiento primario. . . . .	26

b) Imágenes tomadas del sistema de acercamiento primario. . . . .	30
c) Descripción de la generación de las puntas de fibra óptica. . . . .	31
d) Imágenes obtenidas de las puntas de fibra óptica. . . . .	32
CAPÍTULO VIII	
DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS REALIZADAS SOBRE EL SISTEMA DE ACERCAMIENTO PRIMARIO. . . . .	37
CAPÍTULO IX	
CONCLUSIONES Y COMENTARIOS. . . . .	42
REFERENCIAS. . . . .	44

# INTRODUCCIÓN

Una de las áreas de la Metrología, entendida esta como la ciencia física de las mediciones, que en la actualidad refleja un elevado campo de actividad tanto en lo referente a la investigación como al desarrollo tecnológico propio, es la de microscopía túnel (Ref. 1), como se puede observar en la cantidad de publicaciones al respecto así como en la variedad de dispositivos comerciales.

El objetivo principal de la presente tesis es el de obtener un dispositivo económico para el acercamiento primario en microscopios por evanescencia de campos electromagnéticos, lo cual se realizó a través de las siguientes etapas: diseño, construcción y prueba.

En el capítulo I se presentan los respectivos antecedentes, para continuar en los capítulos II y III con el desarrollo de los microscopios de barrido tipo túnel *haciendo énfasis en las bases teóricas que indican el funcionamiento del microscopio de campo cercano.*

En el capítulo IV se muestran algunas aplicaciones de los microscopios de barrido tipo túnel, mientras que en el V se realiza la propuesta de la presente tesis. La descripción, tanto general como detallada de cada una de las partes del sistema de acercamiento primario, así como, la obtención de puntas de fibra óptica necesarias para el microscopio de campo cercano, está contenida en los capítulos VI y VII.

Los capítulos VIII y IX describen las pruebas realizadas sobre el aparato así como las respectivas conclusiones y comentarios.

## **CAPÍTULO I ANTECEDENTES**

El sentido de la percepción visual se ha encontrado tanto en seres pluricelulares como unicelulares (recordemos que algunas especies de dinoflagelados poseen una mancha en el sentido opuesto al flagelo que se ha caracterizado por su receptividad a la luz, llamándosele mancha ocular). La visión, el oído, el tacto, el gusto y el olfato les han permitido a las especies el poder distinguir a sus presas de sus predadores y a sus congéneres de los demás seres vivientes que les rodean.

Sin embargo, los sentidos tienen limitantes, así por ejemplo, la visión o el oído permiten observar o escuchar objetos o seres hasta una cierta distancia. En el caso de la visión humana y sus instrumentos, los ojos, nos permiten un rango de acción limitado a la movilidad de los ojos en sus cuencas y en menor grado al ángulo que forman el objeto o ser que estemos observando con la pupila y el centro de la retina, ya que vemos mejor los objetos en dicha dirección y conforme los objetos se encuentran en posiciones cada vez más apartadas de esa dirección, tienden a percibirse más confusos hasta que desaparecen. El murciélago es otro caso de este tipo, en él la dirección del sonido debe de coincidir lo mejor posible con el órgano de percepción, el oído, para que sea más fácil de distinguir de otras fuentes de sonidos similares y así dirigirse o alejarse de dicha fuente.

El hombre, desde la antigüedad, ha valorado a aquellos ejemplares que han tenido mejor vista, mejor oído o mejor olfato ya que a través de ellos se facilitaba la consecución de sus presas, así como las observaciones del cielo y las meteorológicas.

Grandes astrónomos y astrólogos surgieron a través de la historia. Aristarco (320-250 a.C.), (Ref. 2 y 3), quien con sus observaciones y mediciones colocaba al Sol como centro del Universo; Tolomeo (90-168 d.C.) que rechazaba la hipótesis de Aristarco, ya que por problemas con su interpretación filosófica de la humanidad “centraba a la Tierra en el centro de las esferas del Universo”. Después vendrían Nicolás Copérnico (1473-1543 d.C.), Tycho Brahe (1546-1601 d.C.), Johannes Kepler (1571-1630 d.C.) y Galileo Galilei (1564-1642 d.C.), quienes aparte de buena visión tenían un carácter de mucha curiosidad que les hacía observar y reflexionar constantemente los cambios que ocurrían en el cielo.

Galileo y luego Huygens (1629-1695 d.C.) y Newton (1642-1727 d.C.) construirían lentes de diversos tipos para observar mejor el cielo.

Por aquellos tiempos, Leeuwenhoek (1632-1723 d.C.) se esforzaba por encontrar mejores lentes para observar el buen acabado en la tela de los talleres de hilado y costura, construía pequeños microscopios, usando un par de lentes empotradas en bases de madera que se fijaban en una varilla de metal. En cierta ocasión, se dio cuenta, al revisar pequeñas gotas de agua, de que había seres que se movían libremente.

Leeuwenhoek, junto con su contemporáneo Marcello Malpighi (1628-1694 d.C.), dieron la entrada al nuevo mundo de lo pequeño. A este último se le atribuye la invención del microscopio, pero sus principios físicos se atribuyen a Kepler y a Torricelli (1608-1647 d.C.). No hacía falta más que un par de lentes de tejedora para poder observar los objetos antes mencionados.

Posteriormente, esto abriría las posibilidades de investigación a científicos

como Louis Pasteur (1822-1895 d.C.) y también a las primeras concepciones realistas de la evolución de la vida como se veía a través del libro de Charles Darwin (1809-1882 d.C.), “El Origen de las Especies”.

Así como nuestro conocimiento de los seres vivos era muy limitado, también lo era el de otras cuestiones como: la naturaleza de la luz, estudiada por Huygens, Newton, Foucault (1819-1868 d.C.), Maxwell (1831-1879 d.C.), etc.; su velocidad medida por Römer (1644-1710 d.C.), Foucault, etc.; la estructura y constitución de los objetos, teorizada desde la antigüedad por filósofos griegos como Tales de Mileto (640-546 a.C.) y Heráclito (540-475 a.C.), luego por renacentistas como Leonardo Da Vinci (1452-1519) y científicos de la era moderna como Dalton (1766-1844), Lavoisier (1743-1794), Crookes (1832-1919), Röntgen (1845-1923), Planck (1858-1947), Einstein (1879-1955), Dirac (1887-1961), Yukawa (1907-), etc.

A mediados del siglo pasado se concluye, a través de los experimentos de Foucault, que la luz “se componía de ondas”, como antes lo supuso Huygens, en oposición a la interpretación corpuscular de Newton.

Solo 40 años después de los experimentos de Foucault, un físico, E. Abbe (1838-1916), en 1890 deduce bajo cálculos matemáticos y usando la comprobación de la naturaleza ondulatoria de la luz hecha por Foucault, que la mayor resolución posible en los instrumentos de observación ópticos (como las lentes de los microscopios o de los telescopios) no podía ser mayor a la mitad de la longitud de onda de la luz usada para observar con los mismos (Ref. 4).

Esto dio lugar a que se intentasen y lograsen producir microscopios que obtenían un mayor aumento por medio de rayos-X, electrones, iones, etc.;



siempre teniendo presente la barrera que representa el límite de difracción encontrado por Abbe y el que dichas partículas presentan menores longitudes de onda, entonces se obtendrían menores difracciones y por ende mejor resolución y un mayor aumento.

Así se crearon los microscopios de emisión de rayos-X, los microscopios de transmisión de electrones y los microscopios de barrido electrónico, los cuales permitían aumentos de centenares de veces mayores a los de los microscopios ópticos. Empresas como la Siemens & Halske, Inc.; empezaron a manufacturar estos aparatos por el año 1938 creando un desarrollo tremendo en el área profesional de la biología y la medicina. Si bien, es cierto que los aumentos eran mayores, también lo es la degradación de las muestras al hacer pasar los haces de rayos-X, de electrones o de iones a través de las mismas; esto debido al aumento de la energía irradiada en la muestra según la ecuación:  $E = hc/\lambda$ ; de la cual se deduce que a menor longitud de onda  $\lambda$ , mayor energía.

Luego aparecerían microscopios como el de barrido por transmisión electrónica y el de emisión de campo y una variedad de este último que permitió observar por vez primera la disposición de átomos individuales, denominado microscopio de emisión de campo de iones positivos, en los cuales los átomos de Helio presente se utilizaron para obtener imágenes de la punta del microscopio.

Durante 60 años se mantuvo la muralla de visión debida al límite de Abbe, sin embargo, en 1956, J. A. O'keefe (1916-), un técnico en radar, no creía en el límite de difracción enunciado por Abbe; pensaba que era posible obtener mayor resolución en un objeto; por ejemplo, si se podía producir un

orificio en un material opaco a las ondas electromagnéticas utilizadas para observar el objeto y se observaban las intensidades de las ondas electromagnéticas reflejadas en el objeto, al variar la posición del orificio con respecto al objeto, entonces se obtendría una imagen de barrido del mismo aún usando longitudes de onda grandes comparadas con el objeto a observar.

Utilizando este principio, se desarrollaron aparatos para ver las rugosidades en los materiales, aplicando voltajes de 1 a 2 volts entre la punta y la muestra examinada. Pero no fue sino al inicio de los 80's, que dos científicos, Binning y Röhrer, construyeron el primer aparato para visión a escala monoatómica (Ref. 5).

Ellos dos pudieron observar “escalones” en un monocristal de Silicio cortado en ángulo de 45° con respecto a su eje azimutal, que correspondían a átomos que habían sido arrancados de dichos “escalones”, al hacer pasar una micropunta de tungsteno sobre la superficie del material e ir recolectando las diferencias de potencial presentadas en la punta mientras se barría sobre la superficie.

Con este avance, las mejoras en este nuevo proceso se han incrementado a pasos agigantados, generando el advenimiento de la miniaturización en los componentes de las computadoras y la creación de nuevos materiales al producir nuevos modos de tratamiento.

Luego se obtuvieron logros como: el “detectar” átomos individuales a presión atmosférica, el observar la estructura del DNA, la observación de átomos en medios acuosos y en aceites, el mover átomos, etc.

La humanidad tardó millones de años en evolucionar desde organismos unicelulares simples hasta seres humanos. Se tardó miles de años en entender que la Tierra es esférica, cientos de años en poder observar los más pequeños seres vivos, décadas en crear aparatos para ver macromoléculas y en tan solo unos años después se trabajó en la construcción de pequeños aparatos a escala molecular que posiblemente se lleguen a mover algún día como esos pequeños seres vivos que tanto llamaron la atención a Leeuwenhoek.

Los microscopios de barrido tipo túnel, junto con las computadoras que los manejan, han sido la nueva pauta en la visión y creación de nuevos aparatos y materiales que son de vanguardia en varias áreas del quehacer humano. Actualmente, existen tantas aplicaciones potenciales y reales de los microscopios de efecto túnel, tanto del tipo que usan electrones, como de aquellos que usan iones o fotones para la obtención de las imágenes de las muestras estudiadas, que se han buscado nuevas formas para aumentar la velocidad de barrido de la punta exploratoria sobre la muestra ya que los nuevos requerimientos exigen mayores velocidades de rastreo sobre la muestra y mejor resolución para crear nuevos materiales o para encontrar las respuestas a los defectos en materiales. Lo mismo ocurre con las contribuciones en medicina para crear nuevas curas contra los virus y las bacterias o en biología para dar razón de nuestra existencia.

## **CAPÍTULO II DESARROLLO DEL MICROSCOPIO DE BARRIDO TIPO TÚNEL**

En 1981 se hizo un importante descubrimiento físico cuando H. Röhrer y G. Binnig lograron la construcción y el correcto funcionamiento de un aparato de efecto túnel que operaba al alto vacío, que permitió realizar observaciones de escalones monoatómicos en un corte transversal a 45° de una barra de silicio. Enseguida siguió la resolución atómica de diversos materiales, para culminar con el desarrollo teórico de esta nueva capacidad de resolución (Ref. 5).

El microscopio de efecto túnel debe su nombre a la corriente túnel generada cuando se crean las condiciones para producir una unión túnel entre una punta muy delgada y una placa metálica, al inducir un voltaje entre ambas. Se ha logrado demostrar que a temperatura ambiente existe una corriente de electrones que van y vienen de la punta a la muestra y viceversa, cuando ambas piezas se aproximan lo suficiente; pero al colocar un pequeño potencial eléctrico entre la punta y la placa se logra una corriente de electrones en un solo sentido. La corriente que se produce varía exponencialmente con la separación, similarmente a las uniones de tipo túnel en placas paralelas (Ref. 4 y 5).

Para el funcionamiento de un microscopio de tunelamiento se requiere de los siguientes implementos: una unión túnel (es decir, una punta de un material designado con gran cercanía a la placa que contiene la muestra), un circuito de control eléctrico (el cual registra la corriente túnel y mantiene una separación entre la punta y la muestra), un sistema generador de movimiento tridimensional entre la punta y la muestra de la unión túnel para poder realizar el barrido, un sistema de aislamiento de vibraciones y una estructura que soporte la punta y la

muestra de la unión túnel.

También se han construido microscopios de barrido con resoluciones similares al microscopio electrónico de efecto túnel, que no usan electrones, sino iones e inclusive fotones o la simple repulsión y atracción de los átomos; dichas partículas son detectadas a través de la punta utilizada, la cual puede ser acanalada (caso de los iones) o no, y de materiales tales como el tungsteno, el oro, el platino, el diamante, el cuarzo o el plástico de alta conductividad óptica en forma de fibra óptica (estos dos últimos materiales se usan en la detección de fotones), etc. (Ref. 5).

Muchos de los microscopios túnel operan a través de uniones túnel del tipo metal-vacío-metal trabajando a presiones de  $10^{-10}$  torr, pero también se ha podido trabajar a presiones de 1 atm y más altas utilizando medios líquidos como aceites, agua e inclusive soluciones electrolíticas (Ref. 5).

La unión túnel siempre debe de mantener una separación de entre 10 a 30Å para lograr que dicha unión se mantenga. Esta separación se obtiene partiendo de una escala macroscópica (algunos milímetros) y usando métodos de acercamiento cada vez más finos calibrando las distancias a través de un láser o midiendo la corriente túnel generada en la punta (Ref. 5).

Los métodos de aproximación en forma gruesa (en milímetros), usados para acercar las muestras a las puntas de los microscopios túnel, varían desde el uso de piezoeléctricos, resortes de constante elástica muy grande, hasta rieles de acercamiento de fuerza de fricción estática y cinética, etc.

Los métodos de aproximación fina (en Angstroms) actuales, de la punta de observación a la muestra, son por medio de piezoeléctricos. Estos son materiales que tienen la propiedad de elongarse o contraerse con el paso de una corriente a través de su estructura. Aunque ahora existen también ensayos por medio de ondas sonoras y mediante pequeños magnetos que hacen oscilar una superficie circular en la que está encajada la punta del microscopio.

Con esta perspectiva se puede afirmar que se han obtenido un sin número de aparatos para la observación y manipulación a escala molecular y monoatómica, incrementándose luego las capacidades de uso en muchas ramas

### **CAPÍTULO III**

## **MICROSCOPIO DE CAMPO CERCANO**

### **Evolución de la microscopía de barrido tipo túnel**

El desarrollo de la microscopía cuenta actualmente con las siguientes variantes:

- Microscopio electrónico de barrido tipo túnel
- Microscopio de campo cercano
- Microscopio de perfiles térmicos
- Microscopio de fuerza atómica
- Microscopio de corriente de iones

Cada una de estas variantes tiene características propias que las diferencian, como: el uso de electrones, de iones o de fotones o de la repulsión y atracción de átomos; también el uso de diferentes tipos de punta, ya que los microscopios túnel de tipo electrónico y los de tipo electrónico usados en electroquímica utilizan puntas de tipo metálicas (por lo general de tungsteno), recubiertas en el caso de los usados para electroquímica con una capa de resina o cera a prueba de corrosiones para evitar daño a las puntas, dejando solo el extremo último libre; pero en los del tipo de campo cercano se usan materiales como el cuarzo y el plástico de gran capacidad óptica; mientras que en el de perfiles térmicos se usa una especie de unión tipo termopar que termina en una punta muy fina hecha de dos materiales conductores aislados uno del otro. Para los del tipo de fuerza atómica se usan puntas muy estables como las logradas al filamento el diamante. En otros casos se utilizan micropipetas que vacían una solución electrolítica sobre la superficie de estudio mediante un electrodo en el interior de la micropipeta y que pasan rasantes a la superficie la cual está a un potencial diferente, debido al otro electrodo, midiéndose el cambio en el flujo de iones ya que la cercanía con la muestra impide que la solución salga cuando esta es tocada con la punta de la micropipeta (Ref. 5).

Los microscopios del tipo electrónico han sido los más ampliamente utilizados desde la década pasada, en la actualidad hay un sin número de compañías que trabajan en la creación de microscopios de este tipo con capacidades híbridas, añadiendo poder de resolución en varios ambientes, generando imágenes con acercamientos extremos de las muestras. De ellos existe una amplia literatura (Ref. 10, 11, 12 y 13).

Los microscopios electrónicos usados en solución electrolítica o de corriente de iones, por lo general llegan a modificar el material de estudio debido a que, dependiendo de la cantidad de iones presentes y de la afinidad de los mismos con las moléculas del material de la muestra en estudio, producen reacciones físicas y/o químicas, por lo que son más utilizados en experimentos que tienen que ver con las reacciones químicas de los compuestos.

Un poco más recientes han sido los estudios con microscopios túnel de campo cercano o también llamados de evanescencia de fotones. Estos tienen la cualidad de que se les puede cambiar fácilmente las fuentes de luz para obtener mediciones de mayor resolución. Esta es una ventaja que se puede tomar muy en cuenta para elegir este tipo de microscopios ya que se da oportunidad a investigar la espectroscopía de la muestra, entre otras cualidades, ya que también se pueden apreciar las microfuerzas de tensión del material por medio de luz polarizada, etc. Siendo además, los aparatos para cuyo funcionamiento se requirió del uso de un nuevo principio, es decir, el principio de O'keffe, en el que la resolución máxima no es alcanzada por la longitud de onda de la luz usada en el experimento, si no por el tamaño del orificio a través del cual se mide (Ref. 6).

La importancia de la presente investigación radica en el alcance a que ha



llegado la microscopía túnel para la observación a escala atómica y molecular y especialmente la del tipo de campos electromagnéticos evanescentes o campo cercano.

#### **a) Bases teóricas e hipótesis de la evanescencia de campos electromagnéticos**

El microscopio de campo cercano utiliza la idea de John A. O'keffe, en el sentido de que, como él pensó, es posible obtener mayores resoluciones que la mitad de la longitud de onda de la luz usada en la observación de los objetos, como había predicho matemáticamente E. Abbe a finales del siglo pasado; ya que a través de puntas muy finas, fabricadas con materiales de alta capacidad óptica, es posible tomar la información de un lugar muy pequeño de la muestra e ir trazándola, formando punto a punto la superficie que se desea revisar (Ref. 5).

En la formulación de la teoría de los microscopios que permiten resoluciones a nivel monoatómico, se aplican varias ecuaciones de óptica y mecánica cuántica para determinar si la superficie podría ser trazada a dicho nivel.

Se presentan primero las fórmulas necesarias y la teoría de los microscopios electrónicos y después la formulación de los microscopios de campo cercano y la semejanza en el funcionamiento con respecto a los del tipo electrónico.

Las observaciones indican que la corriente túnel en la punta de un microscopio de efecto túnel varía según (Ref. 5):

$$I = GVe^{-As\varphi^2} \quad (1)$$

donde  $\varphi$  es la función de trabajo entre punta y muestra,  $V$  es la diferencia de potencial aplicada,  $G$  es un factor que depende de la geometría del sistema y tiene unidades de conductividad ( $\Omega^{-1}$ ),  $A$  es una constante que depende del sistema de unidades donde:

$$A = \frac{4\pi}{h} (2m)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

donde  $s$  es la distancia de separación entre la punta y la muestra expresada en Angstroms y  $\varphi$  el campo eléctrico en eV,

$$A = 1.025(eV)^{\frac{1}{2}} (\text{\AA}^{-1}) \quad (3)$$

Como puede observarse en la ecuación de corriente túnel (1), las variaciones en la función de trabajo promedio pueden producir variaciones en la corriente túnel induciendo topografía aparente de la superficie al realizar un barrido; es decir, es sensible a la composición química, por lo que también es posible realizar observaciones espectroscópicas de la muestra. Los microscopios electrónicos de efecto túnel en solución electrolítica utilizan una función de corriente parecida a la anterior (Ref. 15).

Con estas bases sobre el microscopio túnel de barrido, se trata a continuación el caso del microscopio de campo cercano.

## b) Hipótesis del funcionamiento del microscopio de campo cercano.

La mecánica cuántica indica que el tunelamiento de electrones puede ser descrito de la misma forma que la reflexión total interna frustrada de fotones, ya que al calcular la transmisión de electrones a través de la barrera de potencial, los resultados son formalmente idénticos a los de la transmisión de fotones a través de una barrera que presenta un cambio en el índice de refracción (Ref. 6).

Ahora, cuando un haz de luz dentro de un medio con índice de refracción  $n$  encuentra los límites de un plano más allá del cual se encuentra el aire, el haz será parcialmente reflejado y parcialmente refractado. Si  $\theta$  es el ángulo que el haz realiza con respecto al límite normal dentro del medio, al incrementar  $\theta$  obtenemos más luz reflejada. Más allá de  $\theta = \theta_c$ , donde

$$\text{sen } \theta_c = \frac{1}{n} \quad (4)$$

la luz es reflejada internamente de manera total.

Nota:  $\theta_c$  es el ángulo en el cuál la luz queda en el plano límite, o ángulo crítico.

El índice  $n$  puede ser tomado como  $\lambda_0/\lambda$ , donde  $\lambda_0$  es la longitud de onda de la luz en el aire y  $\lambda$  lo es en el medio. Se dice que la luz ha sufrido “reflexión total interna frustrada” cuando al estar el haz de luz en ángulo crítico, en un medio cualquiera, se le añade un segundo medio en la parte donde se realiza la reflexión del haz de luz, siendo el segundo medio de alrededor de una longitud de onda de grueso. Se notará que el haz de luz entra en el segundo medio con

una dirección paralela a aquella del rayo en el primer medio. Lo mismo le puede pasar a los electrones si utilizamos la longitud de onda de los mismos para representar su transmisión a través de la barrera de potencial que le impone el material en el que se encuentra.

**Nota:** La transmisión de electrones es matemáticamente idéntica a la de fotones polarizados perpendicularmente al plano de incidencia (es decir, k-polarizados) (Ref. 6).

Los microscopios de efecto túnel de campo cercano, aquellos que utilizan fotones para observar las superficies de muestra usan un principio cuántico ya demostrado, en el cual la relación de fotones que pueden cruzar una barrera de potencial en una reflexión interna total frustrada es similar a la que se produce por el tunelamiento de los electrones en la muestra. Para un microscopio de campo cercano el coeficiente de transmisión de fotones está dado por (Ref. 6):

$$T = \frac{1 - \cos \alpha}{\cosh 2b - \cos \alpha} \quad (5)$$

donde  $\cos(\alpha/2)$  es una función del índice de refracción de la luz en el medio y del ángulo de incidencia  $[n^2 \cos(2\theta+1)]/(n^2-1)$  y  $b$  proviene de la ecuación:

$$b = \frac{2\pi h k}{\lambda} \quad (6)$$

donde  $h$  es el grosor de la barrera y

$$k = \left( n^2 \sin^2 \theta - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

es un número real para  $\theta \geq \theta_c$ , los ángulos de incidencia y crítico respectivamente. Para  $h \geq 2\pi/\lambda$  el coseno hiperbólico es aproximadamente  $e^{2b}/2$ . El régimen de trabajo para un microscopio túnel de fotones está dado por la siguiente ecuación:

$$T \approx \frac{8k^2 n^2 \cos^2 \theta}{(n^2 - 1)^2} e^{-2b} \quad (8)$$

Así se muestra como es que debido a la dependencia exponencial de la corriente en la unión túnel, y a la misma dependencia exponencial en la transmisión de fotones, que se puede obtener una resolución tan grande.

## **CAPÍTULO IV METROLOGÍA REALIZADA CON LOS MICROSCOPIOS DE BARRIDO TIPO TÚNEL**

Hasta nuestros días, el sentido dado a la metrología, por medio de los microscopios de efecto túnel, varía ampliamente, pero está más encaminada a la observación de medicamentos, de moléculas complicadas como el DNA y el RNA, a la revisión de la calidad en las estadísticas de rugosidad de muestras, en el crecimiento de películas y de cristales, en la forma en que actúan los aceleradores de reacciones químicas, etc. (Ref. 5 y 8).

Un nuevo progreso se ha dado en la generación de películas de materiales y en el crecimiento de cristales, ya que a través de una revisión paso a paso del movimiento de los átomos en las superficies de los cristales a una temperatura dada, han proporcionado ideas de cambios en los procesos de cristalización hasta hoy usados (Ref. 1).

Por ejemplo, se han encontrado fallas en los circuitos semiconductores de las computadoras, que una vez resueltos con el uso de un sistema adecuado de cristalización permitirán producir nuevos transistores cada vez más y más pequeños (Ref. 1).

Por medio de otros microscopios túnel de barrido se han encontrado esfuerzos en materiales debidos a la disposición de los átomos en las muestras que producirían fracturas en condiciones específicas y por consiguiente daño a los aparatos que utilicen materiales con este tipo de defectos (Ref. 6).

Uno de los avances más prometedores con el advenimiento de los

circuitos de alta capacidad de respuesta es el de la captación en tiempo real de las muestras estudiadas, que significaría el poder calibrar más rápidamente instrumentos que generan superficies de tipos de rugosidad predefinida o también el poder rectificar los aparatos que crean los catalizadores para las reacciones químicas más complicadas (Ref. 1).

Entre las múltiples actividades que se pueden realizar con los microscopios de barrido de campo cercano está la espectroscopia fluorescente, que permite en este caso diferenciar los distintos compuestos que intervienen en la composición de la superficie del material (Ref. 6).

## **CAPÍTULO V PROPUESTA DE TESIS**

En la gran mayoría (quizás en la totalidad) de los microscopios de tipo túnel comerciales, el elevado costo de los mismos es debido principalmente a los sistemas de soporte utilizados, ya que son antivibratorios y además al sistema de acercamiento a la muestra.

En la presente tesis nuestra propuesta es la de diseñar y construir una estructura de soporte y acercamiento para la parte electrónica del microscopio túnel con al menos las mismas características operativas que las existentes, pero con un costo muy inferior.

A manera de ilustración, los sistemas antivibratorios o antioscillatorios actuales están hechos de forma que figuran jaulas suspendidas con cuerdas de nylon en edificios donde el movimiento del suelo se intenta evitar alejando todo el sistema de lugares transitados, o forman parte de un conjunto de una mesa de aire que tiene un sistema regulado de expulsión del mismo y de una plataforma de acero, además, de un sistema para evitar descargas estáticas por la fricción del aire con la plataforma de acero, en otros se buscan pesadas cargas para mantener pequeños los movimientos oscilatorios (Ref. 5).

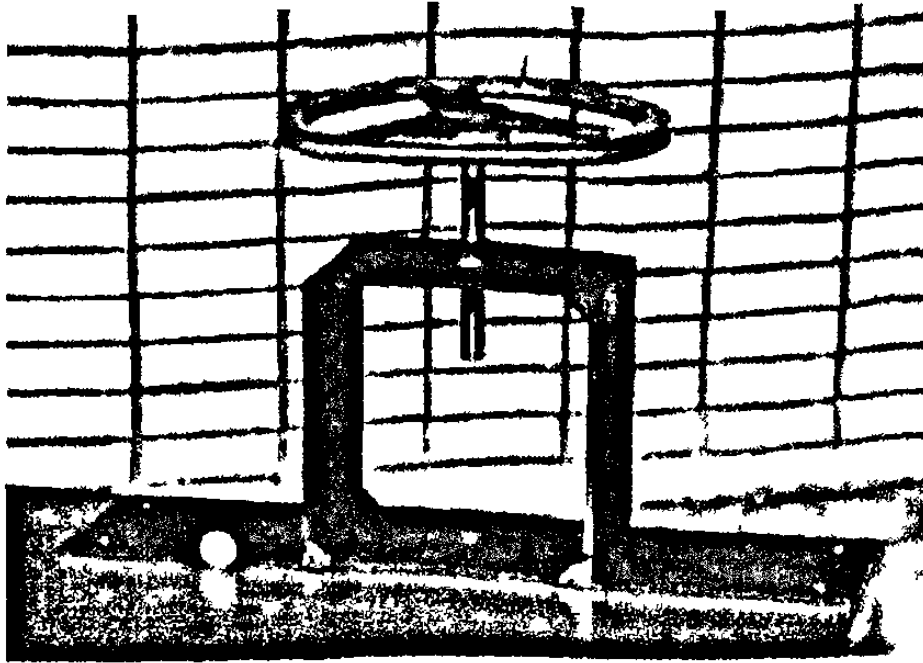


## **CAPÍTULO VI DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA DE ACERCAMIENTO PRIMARIO**

En este capítulo se presenta el diseño y construcción de la estructura de acercamiento primario, observándose los siguientes puntos:

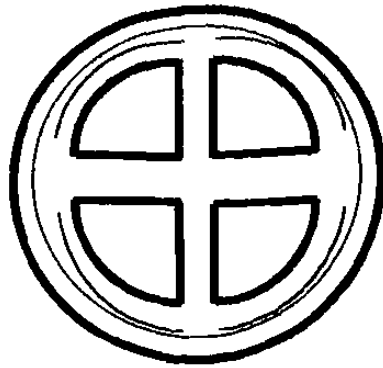
- 1° La estructura que sostendrá los sistemas de acercamiento grueso y fino.
- 2° La estructura o aparato que se usará para amortiguar las vibraciones.
- 3° El porque del uso de la estructura de forma circular para utilizarla como sistema de acercamiento grueso.
- 4° El material usado para el microscopio.
- 5° La rentabilidad de la tecnología usada para construir el microscopio.

Como primer punto se indica que la estructura se compone de cuatro placas, de acero Cold-Rolled, con refuerzos en las esquinas de las uniones, para evitar posibles rupturas de las soldaduras bajo esfuerzos grandes. Las placas son soleras de 15.7cm de ancho x 6.35mm de grueso, donde 3 de las placas son de 21.15cm de largo y la última es de 57.7cm para servir como base. Los refuerzos son prismas rectangulares de 1.27cm de lado y 15.7cm de largo. Fueron soldadas a mano y se les practicaron 2 orificios de 2.54cm de grosor a 2 de las placas, de manera que por ahí pudiera pasar el tornillo de la prensa que se construyó, soldándose además dos tuercas al aparato (Imagen 1).



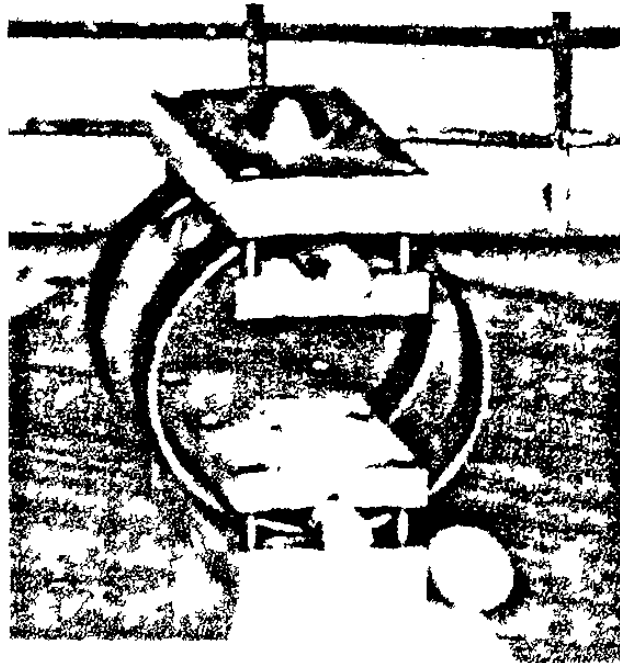
**Imagen 1**

Como segundo punto se tiene el toro de hule que posee conductos en forma de cruz en la parte interna (Fig. 1). Esta estructura sirve para permitir que las vibraciones se amortigüen y anulen entre sí ya que se dispersan en el aire contenido en el hule y además, por su forma propia, se genera una interferencia destructiva, al pasar las vibraciones por los ductos de la cruz. Después se le colocará encima, una placa de melanina para que forme una base plana.



**Figura 1**

El tercer punto se refiere a la estructura de forma circular, en este caso dos anillos de acero sin costura que servirá como sistema de acercamiento primario, junto con una prensa interconstruida en la carcaza que oprimirá el anillo para producir el acercamiento grueso. Las dimensiones de esta sección son: 10.9cm de diámetro externo y de 2.5mm de grosor de los anillos, y el grosor de las placas es de 1.25cm y 1.85cm más el grosor de la hemisfera que es de 1.27cm (Imagen 2).

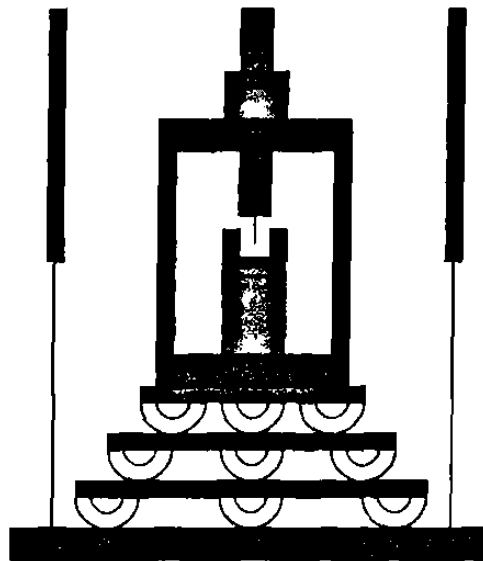


**Imagen 2**

Como penúltimo punto, se considera que el material del microscopio no debe alterarse bajo la influencia de los campos electromagnéticos aplicados para mover los sistemas de acercamiento fino del microscopio. Si llegaran a interferir, entonces las mediciones variarían constantemente en una misma prueba.

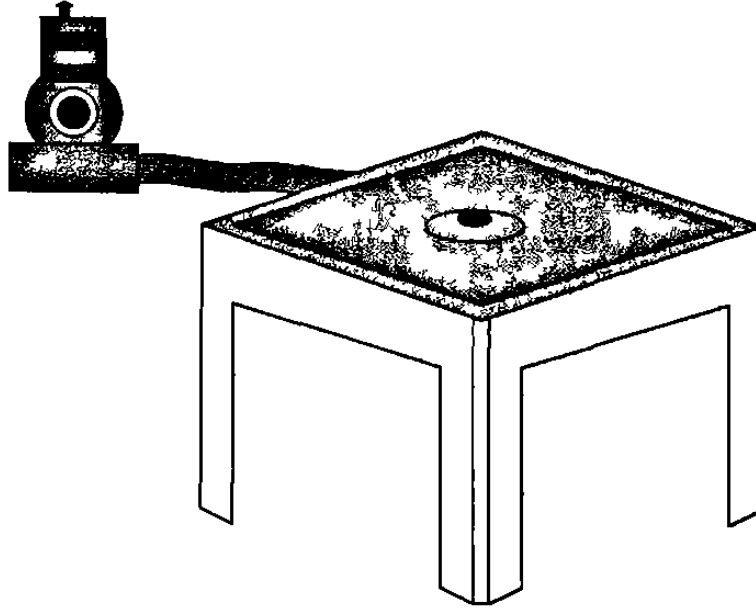
Por último, se muestra en este capítulo, el sistema de acercamiento primario basado en otras tecnologías del sistema de soporte para microscopios de barrido tipo túnel:

En la figura 2 se muestra un sistema de soporte constituido por una serie de placas de acero con arcos de un material plástico y este sostenido por dos bandas elásticas del techo.



**Figura 2**

En la figura 3 se observa el uso de una plancha de acero sostenida por un colchón de aire generado por un compresor.



**Figura 3**

En la figura 4 se observa un sistema de acercamiento sostenido por campos magnéticos.



**Figura 4**

## **CAPÍTULO VII**

### **DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS PARTES DEL SISTEMA DE ACERCAMIENTO PRIMARIO Y DESCRIPCIÓN DE LA OBTENCIÓN DE LAS PUNTAS DE FIBRA ÓPTICA**

En los siguientes 4 incisos se detallan las diferentes acciones y partes que intervinieron en la construcción del sistema de acercamiento primario y también en el desarrollo de una técnica que permita obtener puntas de fibra óptica requeridas para el funcionamiento del mismo.

#### **a) Descripción de las partes del sistema de acercamiento primario**

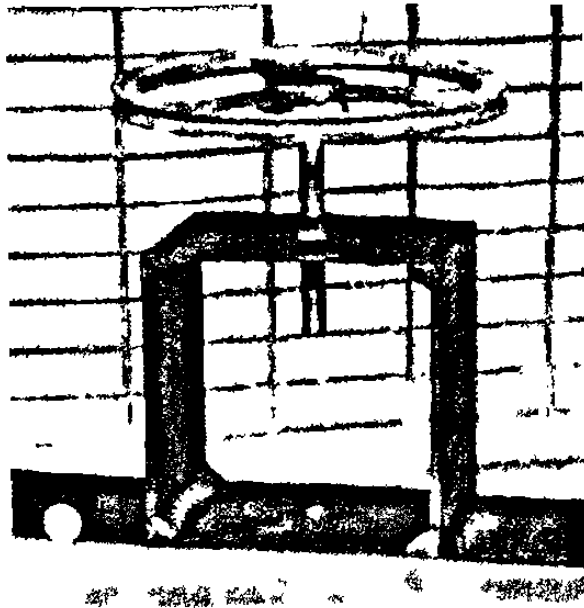
Se presentan en la parte inferior de la estructura: una plataforma hecha de acero Cold-Rolled 1018 con forma de solera de 57.7cm de largo por 15.7cm de ancho y 6.35mm de grosor que posee 5 orificios 4 de los cuales se encuentran en las esquinas del rectángulo formado, para poder empotrar el aparato en una base de mayor tamaño, el último se encuentra en el centro del aparato y tiene un diámetro de 2.54cm, de manera que un pequeño tubo se puede introducir en la parte inferior hasta que ajusta en la base, este pequeño tubo servirá para introducir cableado necesario y para mantener centrado el sistema de acercamiento grueso del aparato ya que se puede introducir hasta la placa de aluminio inferior que también posee un orificio en el centro de 2.54cm.

A continuación se presenta la base del microscopio en un acercamiento que se tomó de la armazón del aparato (Imagen 3). Sus dimensiones se indicaron en el párrafo anterior y cada uno de los orificios en las esquinas tienen 1.27cm de diámetro, mientras que el orificio del centro tiene 2.54cm de diámetro.



**Imagen 3**

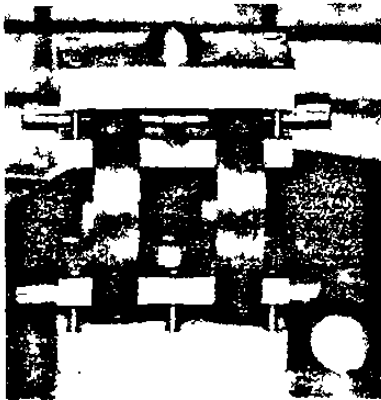
Se observa en la imagen 4 que en la parte media del aparato se localizan las 3 soleras de acero Cold-Rolled 1018 de 15.7cm de ancho por 21.15cm de largo y 6.35mm de grosor que sirven de soporte a la prensa que se instaló para hacer presión sobre el microscopio. Las soleras fueron unidas por medio de soldadura de arco y tiene refuerzos de acero Cold-Rolled 1018 en forma de escuadras en las esquinas.



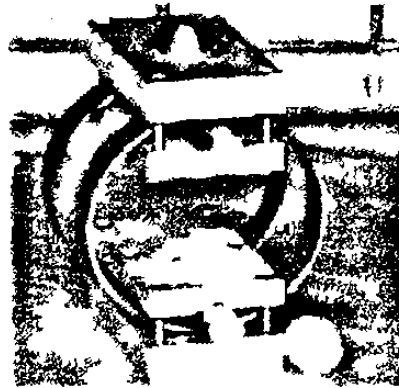
**Imagen 4**

En relación a las placas de aluminio que sirven para sostener los aros del sistema de acercamiento primario, sus dimensiones son: 10cm de largo, por 6cm

de ancho y 1.85cm, mientras que las dimensiones de las placas delgadas son de: 10 cm de largo, por 6cm de ancho y 1.25cm de grosor. Como se aprecia en las imágenes 5 y 6, las placas de la parte inferior del ensamble poseen un orificio circular de 2.54cm de diámetro que permitirá introducir el cableado necesario para el manejo de las muestras. Mientras que también se observan las horadaciones hechas a las placas delgadas para que el perno se pueda ajustar correctamente. La profundidad de dichas horadaciones es de 4.8mm, véase la placa delgada de la parte inferior en la imagen 6, son 2 planos a 45° hacia adentro de la superficie, de manera que el perno tiene 3 líneas de contacto.

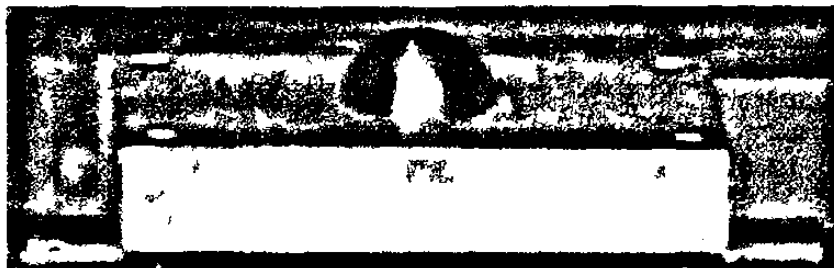


**Imagen 5**



**Imagen 6**

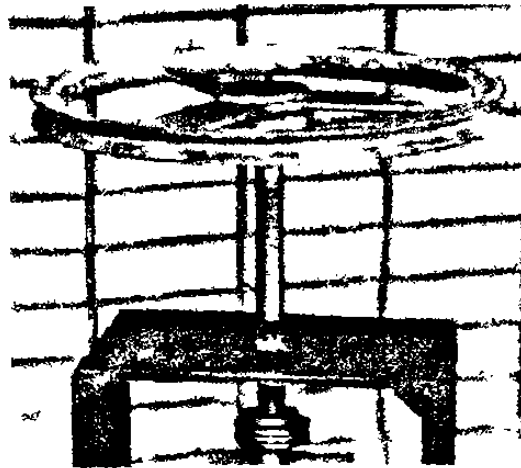
En la imagen 7 se presenta un acercamiento de la semiesfera, sus dimensiones son de 2.54cm de diámetro y sobresale 1.27cm de la superficie de la placa gruesa de la parte superior del empalme.



**Imagen 7**

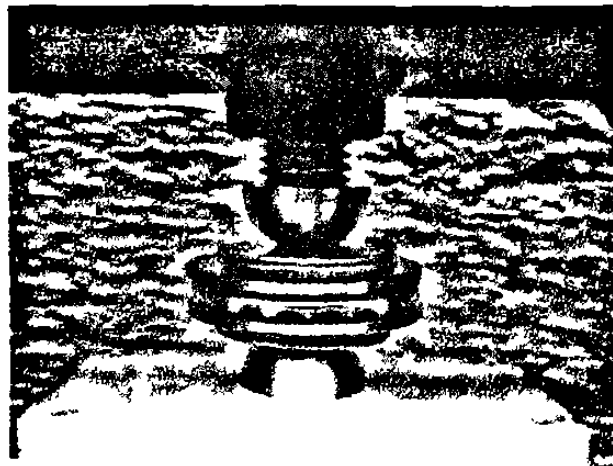


Un acercamiento más, correspondiente a la prensa que se construyó para hacer presión en el sistema de acercamiento primario se incluye en la imagen 8. Las dimensiones son: 27.8cm de diámetro del volante, 19.2cm de largo del tornillo por 1.9cm de diámetro.



**Imagen 8**

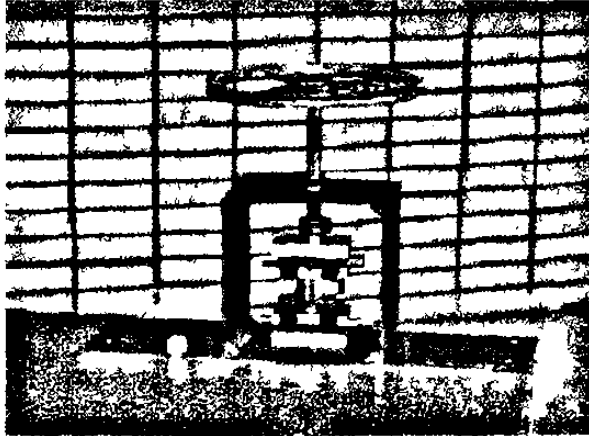
Se observa a continuación en la imagen 9, una semiesfera igual a la que está en el sistema de acercamiento primario, superpuesta a un rodamiento axial que permite generar la presión suficiente para deformar al sistema de acercamiento primario. El rodamiento mide 3.5cm de diámetro externo y 1.6cm de radio interno.



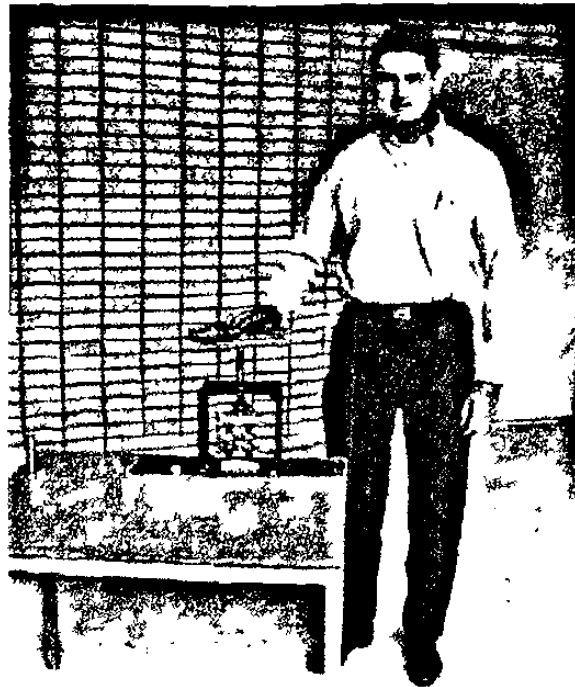
**Imagen 9**

**b) Imágenes tomadas del sistema de acercamiento primario**

Las siguientes imágenes del sistema de acercamiento primario permiten apreciar su tamaño natural.



**Imagen 10**



**Imagen 11**

### **c) Descripción de la generación de las puntas de fibra óptica**

Para obtener las puntas de fibra óptica, se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos: la utilización de abrasivos físicos, como el papel lija número 60 (de grano muy fino) y el uso de abrasivos químicos como el ácido fluorhídrico.

Se procedió de la siguiente manera con el abrasivo físico: se tomó un filamento de fibra óptica entre los dedos y luego se raspó con la lija de la parte media hacia afuera, de manera que se eliminó el recubrimiento plástico que tiene, hasta la punta, a manera de sacarle filo.

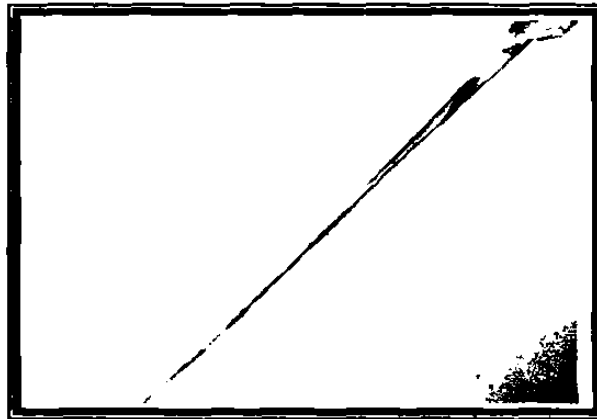
Los problemas que surgieron con este procedimiento fueron: primero que la punta es muy difícil de manipular al momento de sacarle filo ya que el solo hecho de quitarle el plástico que la recubre es una tarea ardua, luego hay que hacer un raspado simétrico de la punta lo cual también es bastante laborioso. Además la punta se volvió muy frágil, por lo que al hacer la posterior abrasión química, varias de las puntas que se logró terminar se fracturaron desde la base de raspado.

Después se procedió a usar únicamente la abrasión química y se encontró que la punta se perfilaba mucho mejor. Observándose que era más difícil arrancar la envoltura de plástico a la fibra óptica sin hacerle daño, quedando la punta envuelta en el recubrimiento de la fibra óptica, asemejando una especie de rizo plástico, el cual al ser arrancado con cuidado permitió obtener la punta de fibra óptica tal y como se muestra en las imágenes siguientes.

#### **d) Imágenes obtenidas de las puntas de fibra óptica**

A continuación se presentan imágenes de la punta que fue lijada y tratada químicamente.

Las imágenes 12 y 13 corresponden a la única punta que se logró fotografiar aplicando el método de lijado y tratamiento químico, fue tomada desde la región donde se empezó a lijar, como se aprecia en la imagen. La magnificación es de 30X.



**Imagen 12**

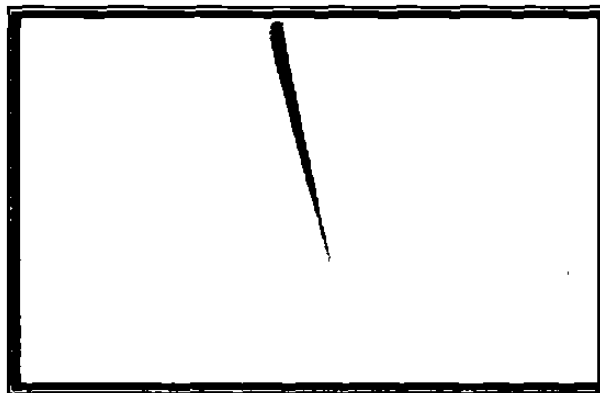
En la imagen 13 se aprecia como el pequeño bulto que se observa al final de la punta es una imperfección generada por este método, además se observa que las paredes están muy desgastadas y no en una forma simétrica. La imagen corresponde a una ampliación de 1000 aumentos del original. La punta mide  $4\mu\text{m}$  de ancho, el tiempo de exposición a la abrasión química fue de 45min a una temperatura de 20 grados.



**Imagen 13**

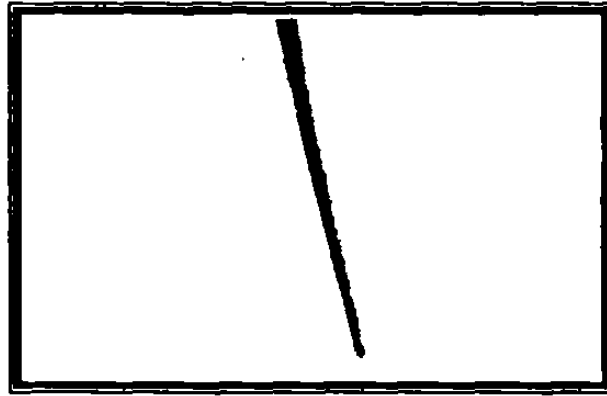
Las siguientes son imágenes que se tomaron de las puntas que se lograron obtener con el método de abrasión química a una temperatura de 35°C y un tiempo de exposición de 70min. Como se observa en las primeras tres imágenes se obtuvieron muy buenos resultados, mientras que en las siguientes se presenta fractura de la punta.

Imagen tomada en 1000X, la punta aparenta ser de  $.3\mu\text{m}$ .



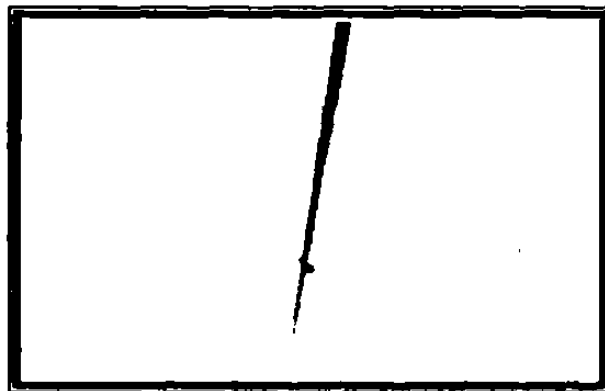
**Imagen 14**

La punta de la imagen 14 se presenta en la siguiente imagen que fue tomada con un aumento de 4000X. Se encontró que la punta tiene un grosor de  $.5\mu\text{m}$ .



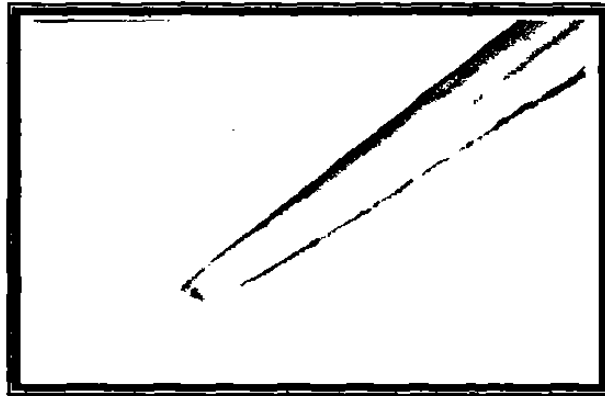
**Imagen 15**

En la siguiente imagen se aprecia una mota cerca del borde de la punta. Esta fue lograda después de 50min de abrasión química a  $35^{\circ}\text{C}$ . La magnificación es de 1000X.



**Imagen 16**

En la siguiente imagen se observa una punta bastante delineada, pero gruesa. Fue lograda con 40min de abrasión química a 35°C. La magnificación es de 1000X.



**Imagen 17**

Las siguientes son las imágenes 18 y 19 de las puntas de fibra óptica que tuvieron fracturas, debido a la forma en que se extrajo el plástico después de la abrasión química a la que se les sometió. Son de una exposición de 55min y 70min respectivamente a una temperatura de 35°C. La magnificación de estas imágenes es de 1000X.

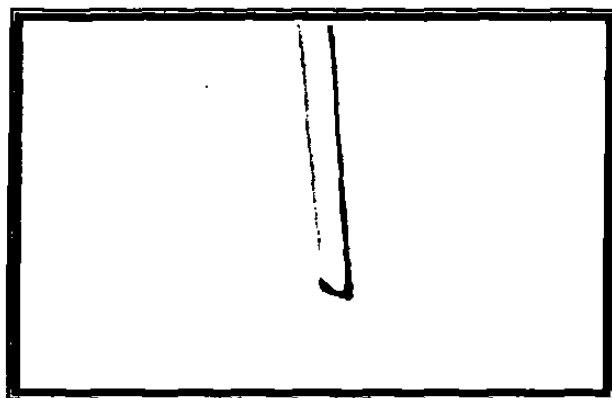


**Imagen 18**



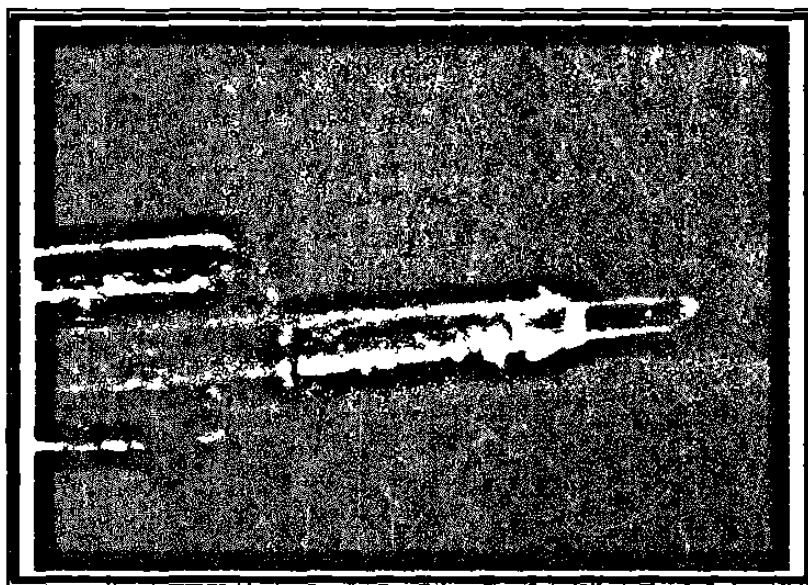
**Imagen 19**

La punta de la imagen 20 se fractura casi desde la base. La punta mide  $6\mu\text{m}$  de ancho y fue obtenida después de 60min de abrasión química a una temperatura de  $35^{\circ}\text{C}$ . La magnificación es de 1000X.



**Imagen 20**

Por último se presenta en la imagen 21, una fibra óptica insertada en una micropipeta para poder manejarla y controlarla con el dispositivo de acercamiento fino.



**Imagen 21**

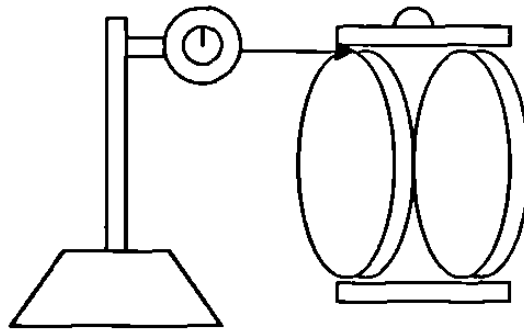


## **CAPÍTULO VIII**

### **DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS REALIZADAS SOBRE EL SISTEMA DE ACERCAMIENTO PRIMARIO**

Para comprobar la propuesta correspondiente al buen funcionamiento del sistema de acercamiento grueso se realizaron una serie de experimentos sobre la estabilidad en el aparato y la alta confiabilidad en la precisión del acercamiento.

En la siguiente figura se muestra como fue dispuesto el sistema de acercamiento:



**Figura 5**

El micrómetro de carátula que se utilizó y que aparece en la figura 5 tiene una resolución de 0.01mm y es de la marca Mitutoyo de tipo Antimagnético y su modelo es NO.513-406 Jeweled (diamantado para mayor fineza en el registro), hecho en Japón.

En la parte superior del sistema de acercamiento primario se colocó una base sobre la cual se acomodaron las masas calibradas de 5kgs que se dispusieron para realizar las mediciones de desplazamiento por peso que probarán la exactitud de los desplazamientos.

Antes de realizar las pruebas se calibró el instrumento como sigue:

1°) Se tomó una regla metálica con escala micrométrica, con cuyos bordes se revisó que los aros del sistema quedaran bien alineados.

2°) Se destornilló cada tornillo de las placas del sistema para que pudieran moverse libremente.

3°) Las placas de la parte inferior se sobrepusieron con los tornillos puestos, pero sin apretar, el perno se colocó en su lugar, presionándose con la placa, para que los aros se quedaran en su sitio aproximado.

4°) Se procede a atornillar cada uno de los tornillos, dando solamente una vuelta a la vez a cada uno, pero sin que se llegue a hacer presión extra, de manera que se puedan mover los aros sin gran dificultad quedando en su lugar respectivo.

5°) Se realiza la primer alineación, usando la regla por dentro y fuera de los aros de manera que sus superficies queden paralelas y colineales.

6°) Se aprietan los tornillos de las placas inferiores.

7°) Se procede como en el 2° paso pero con las placas superiores dejándolas un poco más sueltas de manera que se muevan un poco más fácilmente.

8°) Utilizando la regla metálica y los pernos salientes, se alinean las placas de arriba con las debajo de modo que las juntas formadas por: placa, perno, aro y

placa, de la parte superior e inferior queden colineales con el centro; es decir, la línea sobre las que se unen los aros con las placas debe coincidir con los ejes radiales de los aros.

9°) Se hacen coincidir nuevamente los aros como en el 4° punto.

10°) Se procede a apretar cada tornillo,  $\frac{1}{4}$  de vuelta a la vez cada uno, hasta que se sienta una presión alta. Recordar que hay que apretar los tornillos, empezando en una esquina y luego yendo a cada contraesquina, es decir, en forma cruzada.

Ya que quedaron alineados los aros se monta la estructura.

1°) Se coloca la base de acero en un piso nivelado.

2°) Se ubica el sistema de acercamiento sobre la base de acero y se sujeta con una prensa manual de acero.

3°) Se introduce la punta del micrómetro de carátula en el interior de los aros tocando la parte media de la placa superior.

4°) Se agrega una base en la parte superior del sistema de acercamiento primario y se ajusta la carátula en micrómetro en 0's para empezar las mediciones.

5°) Se tienen varias masas de un patrón secundario de 5 kilogramos que se sobrepondrán una sobre la otra, de una en una y registrando cada vez la marcación del micrómetro.

6°) La relación de masa/desplazamiento se coloca en una tabla.

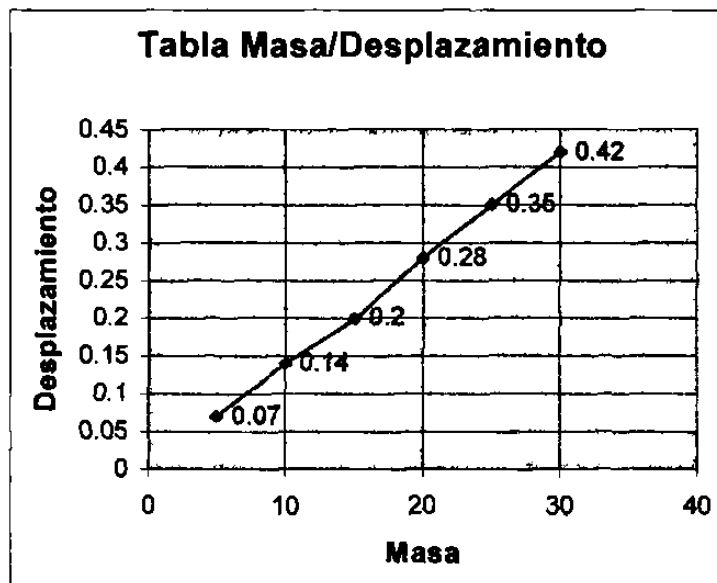
Tabla de resultados:

5 kg.	0.07 mm
10 kg.	0.14 mm
15 kg.	0.20 mm
20 kg.	0.28 mm
25 kg.	0.35 mm
30 kg.	0.42 mm

Tabla 1

Resultados obtenidos el día 4 de septiembre de 1997 en la empresa Métrica localizada en Alfonso Reyes # 3513 cruz con Ruiz Cortinez.

A continuación presentamos la gráfica de masa contra desplazamiento obtenida a partir de la tabla 1:



Gráfica 1

Utilizando el método de mínimos cuadrados la línea recta buscada es:

$$Y = b + mX$$

donde  $Y$  corresponde al desplazamiento,  $X$  es la masa colocada sobre el dispositivo,  $b$  es la ordenada en el origen y  $m$  es la pendiente.

Se encontró que  $m$  es igual a 0.014057, mientras que  $b$  es igual a 0.00266, por lo que la ecuación de la recta encontrada es:

$$Y = 0.00266 + 0.014057X$$

El respectivo coeficiente de correlación, dado por (Ref. 19):

$$\rho = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_x \cdot S_y}}$$

tiene el siguiente valor:

$$\rho = 0.999526.$$

## **CAPÍTULO IX CONCLUSIONES Y COMENTARIOS**

La estructura mecánica del microscopio de efecto túnel ha sido terminada en su totalidad y a su vez probada en su funcionalidad para el propósito de la tesis, como se indicó en el capítulo VIII.

Aunque la mayor parte de las piezas fueron maquinadas sobre pedido, para esta estructura se consiguieron varias piezas en el mercado, siendo estas: el tornillo de acercamiento grueso, el opresor y el resorte para el acercamiento fino y el rodamiento axial de efecto simple.

Como el coeficiente de correlación alcanzó el valor de 0.999526, las condiciones de linealidad para el mecanismo de acercamiento primario son equivalentes a las de microscopios comerciales similares (Ref. 10, 11 y 12).

El costo aproximado del aparato fue de \$3,000.00 (M.N.), que al compararlo con los aproximadamente \$10,000.00 (dólares U.S.A.), que puede llegar a costar una estructura de este tipo, se vuelve un costo mucho muy accesible.

Por otro lado, la necesaria generación de puntas de fibra óptica también concuerda con el objetivo propuesto, dado que las fibras ópticas son materiales muy accesibles, económicos, fáciles de conseguir y de muy sencilla metodología para lograr el acabado propuesto.

Los resultados del presente trabajo fueron presentados parcialmente en el XL Congreso Nacional de Física de la SMF celebrado en esta ciudad de Monterrey del 27 al 31 de octubre de 1997 (Ref. 18).

Lo anteriormente expuesto permite corroborar total y satisfactoriamente la propuesta de esta tesis.

Este trabajo en ningún momento se debe considerar como algo completamente acabado y agotado, sino por el contrario, se constituye en material fuente para optimizarse en todos sus aspectos, lográndose así uno de los objetivos básicos de la investigación científica, que es el de generar más actividades de esta naturaleza.

## REFERENCIAS

- 1- IBM Journal of Research and Development  
International Business Machine, September 1986
- 2- Diccionario Escolar Enciclopédico Novaro  
Organización Editorial Novaro, 1980
- 3- Asimov I.  
Enciclopedia Bibliográfica de Ciencia y Tecnología  
Doubleday & Company Inc., 1971
- 4- Wiesendanger R., Güntherodt H.  
Scanning Tunneling Microscopy II  
Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1992
- 5- Wickramasinghe H.  
Scanned Probe Microscopes  
Scientific American, Octubre 1989
- 6- Sharp S., Warmack R., Goudonnet J., Lee I., Ferrel T.  
Spectroscopy and Imaging Using Photon Scanning-Tunneling Microscope  
Acc. Chemical Research, Vol. 26, No. 7, 1993
- 7- Zenhausern F., Martin Y., Wickramasinghe H.  
Scanning Interferometric Apertureless Microscopy: Optical Imaging at 10  
Angstrom Resolution  
Science, Vol. 269, 1995
- 8- Meyer G.  
Pinpointing Individual Adsorbants  
Physics Today, Octubre 1996



- 9- Yazdani A., Eigler D., Lang N.  
The Electrical Resistance of a Single Xenon Atom  
Physics Today, Septiembre 1996
- 10- Scanning Probe and Scanning Electron Microscope  
Topometrix, Inc.  
Physics Today, Junio 1994
- 11- Scanning Probe Microscope for Industry  
Park Scientific Instruments, Inc.  
Physics Today, Mayo 1992
- 12- Scanning Tunneling and Atomic Force Microscopes  
Burleigh Instruments, Inc.  
Physics Today, Noviembre 1996
- 13- Ultrahigh-Vacuum Scanning Tunneling Microscope  
Omicron, Inc.  
Physics Today, Noviembre 1996
- 14- García R., Padierna F., Alfaro P.  
Determinación de la respuesta espectral absoluta de un fotodiodo  
Depto. Ing. Eléctrica, CINVESTAV, IPN, 1989
- 15- Christensen A.  
Electrochemical Aspects of STM and Related Techniques  
Chemical Society Reviews, 1992
- 16- Tien Z., Mao B.  
Corriente Faradéica en un Microscopio Túnel Electroquímico  
Ultramicroscopy, 1992
- 17- Feynman R., Leighton R.  
Física Vol II: Electromagnetismo y Materia  
Addison-Wesley Iberoamericana, 1964

18- Treviño F., Rodríguez B., García R.

Diseño y Construcción de un Sistema de Acercamiento Primario para un  
Microscopio de Campo Cercano

Memorias del XL Congreso Nal. de Física de la SMF, Octubre 1997

19- Freund J., Walpole R.

Estadística Matemática con aplicaciones

Prentice-Hall Hispanoamérica, 1987, Cuarta Edición

