

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



DISEÑO MECANICO DE UN DETECTOR DE IMAGEN  
BIDIMENSIONAL TIPO MEPSICRON

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
(AREA MECANICA)

P R E S E N T A N :  
JOSE ANTONIO GUTIERREZ FRIAS  
ERIC PORRAS MUSALEM

DIRECTOR: DR. GIANFRANCO BISIACCHI GIRALDI  
CODIRECTOR: ING. UBALDO MARQUEZ AMADOR  
ASESOR: F I S. CARLOS ESPEJO PIEDRA

MEXICO, D. F.,

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

1994



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

**DISEÑO MECANICO DE UN DETECTOR DE  
IMAGEN BIDIMENSIONAL TIPO MEPSICRON**

***A mis padres, Agustín y Doris***

***A mi hermana, Laila***

***A mi compañera, Verónica***

***Eric***

*A la memoria de mi mamá,  
a mi papá,  
a mis hermanas,  
y a Elena.*

*José Antonio*

*¿Es el análisis matemático... tan solo un vano juego de la mente? Le da al físico únicamente un lenguaje conveniente; ¿no es éste un servicio mediocre del cual, estrictamente hablando, se podría prescindir? y más aún, ¿no es de temerse que este lenguaje artificial pueda ser un velo interpuesto entre la realidad y el ojo del físico? Lejos de ello; sin este lenguaje, la mayor parte de las analogías íntimas entre las cosas nos seguirían siendo desconocidas; y, para siempre, habríamos permanecido ignorantes de la armonía interna del mundo, la cual es... la única realidad verdaderamente objetiva.*

**Henri Poincaré**

**Al Fís. Carlos Espejo P., por su invaluable asesoría, colaboración y dirección de la presente tesis. Gracias por tu amistad y apoyo.**

**Al Dr. Gianfranco Bisiacchi, por haber dirigido el presente trabajo.**

**Al Ing. Ubaldo Márquez A., por la revisión de la presente tesis.**

**Al Departamento de Ingeniería Mecánica, por las facilidades prestadas durante la elaboración de este trabajo.**

**A la Facultad de Ingeniería de la UNAM, por la formación recibida durante estos años, misma que culmina con la realización de este proyecto.**

**Al Instituto de Astronomía, UNAM, por haber hecho de este trabajo una experiencia diferente.**

**A nuestros amigos, por los momentos compartidos.**

*Lo difícil es que uno tiene que apuntar alto si es que quiere simplemente dar en alguna parte. Y eso puede llegar a ser descorazonador... Intentar cada vez llegar a lo sublime, y lograr únicamente evitar lo ridículo o lo mediocre.*

*Por muy alto que uno apunte, no puede alcanzar la velocidad de liberación. La ambición es una trayectoria cuyo punto de impacto, por muy potente que sea el lanzamiento, está en la nada.*

**Walter M. Miller, Jr.**



## INDICE

INTRODUCCION	i
<i>Marco General</i>	i
<i>Objetivo</i>	ii
<i>El Método de Diseño</i>	ii
<i>Contenido</i>	iii
<i>Observaciones</i>	iii
CAPITULO I: Funcionamiento del MEPSICRON	1
I.1. Introducción	2
I.2. Partes Constitutivas del Detector	2
I.2.1. Descripción General	2
I.2.2. Fotocátodo (FC)	3
I.2.3. Placas Microcanales (PMC's)	6
I.2.4. Anodo Resistivo (AR)	9
I.3. Funcionamiento del Detector	11
I.4. Procesamiento de la Información: Funcionamiento del Preamplificador y Analizador de Posición de Eventos	12
I.4.1. Preamplificador	13
I.4.2. Analizador de Posición de Eventos (APE)	13
I.5. Sistema de Vacío	15
I.5.1. Condiciones de Vacío para el Funcionamiento del Detector	15

I.5.2. Sistema de Alto Vacío: Bomba Turbomolecular	16
Bibliografía del capítulo I	20
<b>CAPITULO II: Diseño del Detector MEPSICRON</b>	<b>21</b>
II.1. Introducción	22
II.2. Diseño y Descripción de las Piezas	24
II.2.1. Estructura Interna del Detector	25
II.2.1.a. Descripción General	25
II.2.1.b. Soporte de la Estructura Interna	27
II.2.1.c. Conexiones Eléctricas de la Estructura Interna	30
II.2.2. Ventana de Cuarzo: Fotocátodo	31
II.2.2.a. Tapa del Contenedor	31
II.2.2.b. Sustrato de Cuarzo y Medio de Conexión	32
II.2.3. Contenedor del Detector	33
II.2.3.a. Base del Contenedor	34
II.2.3.b. Pared Cilíndrica del Contenedor	35
II.2.4. Descripción de los Procesos de Soldadura del Ensamble	37
II.3. Diseño del Tubo ITT	46
II.3.1. Descripción del Diseño	46
II.3.2. Características en el Diseño de ITT con respecto al Detector MEPSICRON	50
Bibliografía del capítulo II	52

<b>CAPITULO III: Análisis Mecánico de la Estructura Interna del MEPSICRON</b>	<b>53</b>
<b>III.1. Introducción</b>	<b>54</b>
<b>III.2. Planteamiento del Problema</b>	<b>54</b>
<b>III.3. Consideraciones y Simplificaciones al Problema Real</b>	<b>55</b>
<b>III.3.1. Consideraciones Generales</b>	<b>55</b>
<b>III.3.2. Consideraciones Geométricas</b>	<b>56</b>
<b>III.3.3. Consideraciones de Propiedades de Materiales</b>	<b>57</b>
<b>III.3.4. Consideraciones sobre las Fuerzas Actuantes</b>	<b>58</b>
<b>III.4. Análisis Estático</b>	<b>58</b>
<b>III.4.1. Procedimiento</b>	<b>58</b>
<b>III.4.2. Análisis de Información</b>	<b>58</b>
<b>III.4.3. Modelado</b>	<b>60</b>
<b>III.4.3.a. Pruebas Experimentales de Flexión para la Placa Microcanal y Tornillo de Cerámica</b>	<b>66</b>
<b>III.4.4. Resultados Teóricos vs. Resultados Experimentales</b>	<b>70</b>
<b>III.5. Análisis Dinámico</b>	<b>71</b>
<b>III.5.1. Viga Sometida a Flexión por Vibración</b>	<b>71</b>
<b>III.5.2. El Problema de Vibraciones Mecánicas</b>	<b>85</b>
<b>III.5.2.a. Análisis de Información</b>	<b>86</b>
<b>III.5.2.b. Respuesta del Sistema a Excitación Aleatoria</b>	<b>89</b>
<b>III.6. Conclusiones</b>	<b>104</b>
<b>Bibliografía del capítulo III</b>	<b>106</b>

<b>CAPITULO IV: Ensamble y Pruebas del MEPSICRON</b>	<b>107</b>
<b>IV.1. Introducción</b>	<b>108</b>
<b>IV.2. Ensamble y Sellado del Detector</b>	<b>108</b>
<b>IV.2.1. Ensamble del Contenedor</b>	<b>108</b>
<b>IV.2.2. Ensamble de la Estructura Interna</b>	<b>111</b>
<b>IV.2.3. Inserción de la Estructura Interna dentro del Contenedor y Conexiones Eléctricas</b>	<b>112</b>
<b>IV.2.4. Sellado del Detector dentro de la Cámara de Vacío</b>	<b>113</b>
<b>IV.3. Pruebas del MEPSICRON</b>	<b>115</b>
<b>IV.3.1. Pruebas del Fotocátodo</b>	<b>115</b>
<b>IV.3.2. Pruebas de Funcionamiento del Detector</b>	<b>118</b>
<b>Bibliografía del capítulo IV</b>	<b>122</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>123</b>
<b>APENDICES</b>	<b>124</b>
<b>Apéndice A: Radiación Electromagnética</b>	<b>125</b>
<b>Apéndice B: Procesos y Teoría de Soldadura</b>	<b>130</b>
<b>Apéndice C: Fundamentos de Mecánica de Sólidos</b>	<b>147</b>
<b>Apéndice D: Normas ASTM</b>	<b>161</b>
<b>Apéndice E: Fundamentos de Vibraciones Mecánicas</b>	<b>172</b>

## INTRODUCCION

### *Marco General.*

La detección de imágenes bidimensionales ha sido un problema importante en áreas específicas de física e ingeniería desde principios de este siglo. Con este fin se han desarrollado diversos tipos de detectores, los cuales tienen como propósito el manejo de imágenes y la adquisición de datos.

Los primeros detectores bidimensionales utilizados fueron las placas fotográficas. Dichas placas tienen la desventaja de tener un rango dinámico reducido, falta de linealidad, tiempo de revelado (no se tienen imágenes en tiempo real), digitalización y proceso de la información (la imagen es el único dato obtenido).

Las placas fotográficas fueron sustituidas posteriormente por los tubos de televisión. Uno de los más importantes fue el orticón de imagen el cual dió origen a la televisión moderna. En este tubo se capta la imagen por medio de un haz de fotones los cuales liberan electrones al incidir en una placa fotoemisiva llamada fotocátodo. El haz de electrones resultante es colimado en un vidrio conductor y posteriormente acelerado por un campo magnético. Este haz de electrones constituye la imagen eléctrica equivalente a la imagen óptica captada, la cual tiene la importante ventaja de que la energía asociada a esta imagen electrostática es mucho mayor que la producida por los fotones sobre el fotocátodo. La corriente electrónica que se obtiene termina en un dispositivo amplificador especial (multiplicador electrónico). Las variaciones de corriente a la salida del multiplicador representan la señal de video a emplear. Después del orticón se desarrolla la tecnología de detectores luminosos de estado sólido. El primero de éstos utilizaba una matriz de diodos de silicio como elemento sensible.

Paralelamente a los tubos de televisión se desarrollan los tubos de imagen o intensificadores de imagen. El principio básico del funcionamiento de un intensificador de imagen está dividido en tres etapas: conversión fotón-electrón llevado a cabo en un fotocátodo, amplificación en un tubo multiplicador de electrones y conversión electrón-fotón en una pantalla de fósforo. Con estos sistemas se pueden detectar luz visible, luz infrarroja, ultravioleta, rayos X y partículas elementales.

Un inconveniente relacionado con el uso de intensificadores de imagen es la pérdida de resolución en la reconstrucción debido a la baja razón *señal a ruido* a temperatura ambiente, a problemas en el enfoque y en la transferencia final de la pantalla de fósforo a un sistema de almacenamiento permanente, por lo que la técnica imagen-amplificación-imagen se ha traducido a imagen-amplificación-análisis-almacenamiento-imagen. Esto se ha logrado gracias al uso combinado del tubo de televisión con intensificadores de imagen y acoplando sistemas de análisis y almacenamiento a continuación de dichos dispositivos.

El detector de imagen MEPSICRON se basa en el principio descrito anteriormente y funciona básicamente de la siguiente manera: sobre un fotocátodo incide el haz de luz a captar

(paquete de fotones) desprendiendo electrones de su superficie, los cuales son acelerados por un campo eléctrico y multiplicados en unos tubos de diámetro muy pequeño ( $12\mu$ ) llamados microcanales. Al final de la etapa multiplicadora se tiene una nube electrónica la cual se proyecta sobre una placa de material resistivo (ánodo resistivo) con lo cual se tiene una distribución de carga en dicha superficie. En los extremos del ánodo resistivo se miden las intensidades de corriente debidas a la incidencia de la nube de electrones. Mediante esta información se obtiene la localización del centroide de la nube la cual coincide con la posición del fotón incidente sobre el fotocátodo. A partir de la detección de un número grande de eventos fotoemisivos se puede construir una imagen bidimensional del fenómeno captado.

### ***Objetivo.***

El presente trabajo consiste en el diseño estructural del detector de imágenes bidimensionales tipo MEPSICRON. Como ya se mencionó, este dispositivo utiliza para su funcionamiento una serie de elementos electrónicos específicos, los cuales se encuentran dispuestos dentro de una estructura mecánica que formará el soporte del detector. En este sentido, el diseño se centra sobre dicha estructura mecánica, la cual debe cumplir con una serie de características, determinadas por el funcionamiento del detector y por los métodos de construcción del mismo.

### ***El Método de Diseño.***

En términos generales, cualquier proceso de diseño mecánico consta de las siguientes etapas: 1) planteamiento del problema o necesidad, 2) análisis de alternativas de solución, 3) determinación del modelo físico, 4) evaluación de esfuerzos a los que estará sometido el sistema o modelo, 5) diseño de detalle de las piezas (planos y especificaciones) y, 6) construcción del modelo.

Sin embargo, existen diversos problemas físicos, en los cuales el método general de diseño puede atender a otro orden o inclusive constar de etapas diferentes a las mencionadas anteriormente.

El diseño que se presenta en este trabajo, surge de la necesidad de tener un detector de imágenes cuyo funcionamiento sea más estable que el que se tiene actualmente en detectores de este tipo. Debido a esto, se establece el diseño de un prototipo experimental, en base al cual se puedan controlar ciertos parámetros del funcionamiento del detector, por lo que una de las principales características del detector será su flexibilidad.

Por lo tanto, el diseño de las diferentes piezas de la estructura mecánica obedece principalmente a aspectos de funcionamiento del detector. Sin embargo, se realiza un análisis de esfuerzos en base al cual se establecerá que el diseño planteado puede satisfacer condiciones a las que se verá expuesto en ciertas aplicaciones, como su funcionamiento dentro de un satélite en el espacio exterior.

**Contenido.**

La presente tesis se encuentra dividida en cuatro capítulos, los cuales contemplan los aspectos que a continuación se describen.

En el capítulo I se explica el funcionamiento del detector MEPSICRON, para lo cual se describen cada una de las partes así como su función dentro del detector. Por otro lado, se describe el sistema dentro del cual funciona el MEPSICRON, a partir del cual se procesa la información que se extrae del detector.

El capítulo II contempla el diseño de las diferentes piezas que conforman la estructura mecánica del detector MEPSICRON. En este capítulo se exponen las razones que dieron origen al diseño así como los procesos de construcción del detector.

El diseño estructural del detector, es decir, el análisis de esfuerzos de la estructura debido a la acción de fuerzas externas producidas en un cohete, se trata en el capítulo III. Cabe señalar que en esta parte se realiza un análisis detallado de los efectos sobre el detector debido a la acción de vibraciones mecánicas.

Por último, en el capítulo IV se presentan las pruebas de funcionamiento más relevantes del detector, tanto durante como al final de su construcción.

**Observaciones.**

Un aspecto importante que se debe mencionar sobre el desarrollo de la presente tesis, es que este trabajo forma parte de un proyecto de investigación, el cual se ha desarrollado durante varios años en el Instituto de Astronomía de la UNAM, y el cual todavía no termina. De esta forma, cuando se inició esta tesis, el detector ya se encontraba en construcción, y una parte importante del diseño de la estructura ya estaba hecho. Sin embargo, durante la realización del presente proyecto, se diseñaron y construyeron una parte de las piezas de la estructura, y se desarrollaron métodos más eficientes de construcción del detector.

Una parte importante del aporte de este trabajo al proyecto de investigación del MEPSICRON, consiste en el análisis de esfuerzos sobre la estructura del mismo, para lo cual se desarrolló un procedimiento matemático de análisis de vibraciones mecánicas aleatorias, y en base al cual se obtuvo información sobre el comportamiento mecánico del MEPSICRON dentro de aplicaciones específicas.

## **CAPITULO I**

### **FUNCIONAMIENTO DEL MEPSICRON**



## **I.1. INTRODUCCION.**

En el presente capítulo se hace una descripción del funcionamiento del detector bidimensional de imagen MEPSICRON, a cuyo diseño estructural atiende esta tesis.

Como se verá más adelante, el detector MEPSICRON es un dispositivo que se utiliza para detectar señales luminosas (paquetes de fotones) en un rango determinado del espectro luminoso. Este proceso se lleva a cabo principalmente en el interior del detector, utilizando para ello una serie de elementos dispuestos de una manera determinada, cuyo funcionamiento será descrito detalladamente a lo largo del presente capítulo.

Asimismo, se describen los procesos físicos involucrados en el funcionamiento del detector, tales como fenómenos fotoemisivos, fenómenos electromagnéticos y comportamiento de materiales a alto vacío. En base al estudio de estos fenómenos se logra tener un entendimiento adecuado de la operación del detector, así como de los problemas asociados con su funcionamiento, aspectos que determinan consideraciones importantes en el diseño del MEPSICRON, el cual será tratado con detalle en el capítulo II.

Por otro lado, se describen los métodos y dispositivos utilizados en conjunto con el detector, tanto en la construcción del mismo como en su estado de operación. Debido a que la operación del detector es esencialmente de carácter electrónico, se hace necesario explicar, con cierto grado de detalle, el funcionamiento de los aparatos electrónicos que se utilizan para operar el detector, principalmente en el manejo de la información obtenida de éste, la cual básicamente consiste en señales electrónicas.

En base a lo anterior, este primer capítulo constituye la base a partir de la cual se establece el diseño de las diferentes partes que constituyen al detector, así como la comprensión de los aspectos medulares de dicho diseño.

## **I.2. PARTES CONSTITUTIVAS DEL DETECTOR.**

### **I.2.1. Descripción General.**

El detector MEPSICRON constituye un dispositivo para detección de eventos individuales producidos por radiación luminosa, la cual puede tener un rango desde el ultravioleta (longitud de onda  $< 4000 \text{ \AA}$ ) hasta el infrarrojo (longitud de onda  $> 7000 \text{ \AA}$ ). La radiación luminosa es captada por el detector en forma de paquetes de fotones, los cuales inciden sobre la superficie de una película de material fotoemisor, la cual se encuentra depositada en un elemento conocido como fotocátodo, en el interior del detector.

Cuando un fotón incide sobre el fotocátodo, se desprende de la superficie de éste un electrón, el cual es acelerado por un campo eléctrico hasta un conjunto de placas circulares conocidas como placas microcanales. Estas placas están formadas por una serie de orificios o microcanales, dentro de los cuales se multiplica el electrón resultante del proceso explicado anteriormente.

El electrón se multiplica dentro de la placa microcanal, hasta que se obtiene una nube electrónica, la cual se proyecta en forma de un cono electrónico sobre la superficie de una placa compuesta de material resistivo, la cual se conoce como ánodo resistivo. Sobre la superficie de este elemento se dispersa o distribuye la carga eléctrica producida por el haz de electrones.

Finalmente se procesan los pulsos eléctricos obtenidos en el ánodo resistivo a fin de determinar la posición del centroide de la nube electrónica incidente, la cual coincide con la posición del fotón original. En base a esta información se puede construir una imagen bidimensional del fenómeno luminoso que se esté observando.

El nombre del detector "MEPSICRON" se deriva de sus siglas en inglés: Microchannel Electron Position Sensor & Chronos. Estas siglas hacen referencia a la capacidad resolutive del detector tanto en el aspecto espacial como en el temporal, es decir, el detector tiene la capacidad de detectar la posición de los fotones incidentes así como el instante preciso en que esto ocurre, dentro de un determinado intervalo de tiempo.

A continuación se hace una descripción de cada una de las partes constitutivas del detector bidimensional de imagen tipo MEPSICRON, a partir de las cuales se lleva a cabo el proceso descrito anteriormente.

### 1.2.2. Fotocátodo (FC).

La función básica del fotocátodo es recibir el haz de luz (paquete de fotones) y transformarlo en un haz de electrones. Estos electrones, desprendidos de la superficie del fotocátodo, son acelerados por un campo eléctrico hacia las placas microcanales, dentro de las cuales se lleva a cabo la etapa de multiplicación de dichos electrones.

Por cada fotón que recibe el fotocátodo desprende uno o más electrones de su superficie de acuerdo con una función conocida como respuesta espectral<sup>1</sup> (ver fig. I.1.), la cual establece la fotoemisividad (electrones por fotón) en función de la energía del fotón (eV). Esta propiedad del fotocátodo recibe el nombre de "eficiencia cuántica" y en la construcción de estos dispositivos se busca que esta eficiencia sea siempre la mayor posible.

A continuación se describe el proceso de fabricación del fotocátodo, así como sus principales características.

---

1. Gráfica tomada de "Photoemissive Materials", A. H. Sommer, Fig. 42. p.118. (ver bibliografía al final del capítulo).

### Construcción del Fotocátodo.

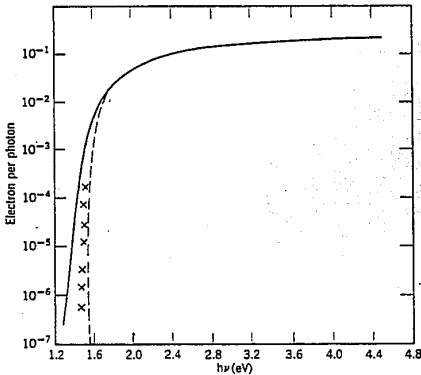
El fotocátodo se construye por evaporación en vacío de diferentes metales alcalinos (K, Cs, y Na) en combinación con un semimetal (Sb) sobre un sustrato de cuarzo. Dichos elementos forman un compuesto fotoemisor sobre la superficie del cuarzo, cuya fórmula en este caso es  $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ .

Para la construcción del fotocátodo se evaporan los elementos mencionados en vacío a partir de cromatos, como el  $\text{NaCr}_2$ , los cuales se encuentran contenidos en unos recipientes especiales conocidos como evaporadores. Los cromatos se calientan a elevadas temperaturas (mediante corriente eléctrica) provocando que el cromo reaccione con el metal que contiene al cromato, al hacerlo se libera el elemento en cuestión (Na, por ejemplo) y éste se deposita en la superficie del vidrio de cuarzo.

Alternadamente se evaporan todos los elementos que forman al material fotoemisor sobre la superficie del cuarzo, que junto con este último forman al fotocátodo. Al final del proceso de evaporación se tiene un compuesto fotoemisor cuya fórmula es  $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$  y recibe el nombre de fotocátodo S-25, debido a su respuesta espectral.

Durante la evaporación de los diferentes elementos se hace incidir un haz de luz sobre el fotocátodo en construcción y se mide la corriente obtenida por desprendimiento de electrones. De esta forma se controla el proceso y se determina que cantidad se necesita depositar de los diferentes elementos para obtener la mayor eficiencia cuántica en el fotocátodo (respuesta a la incidencia del haz de luz).

Fig. I.1.



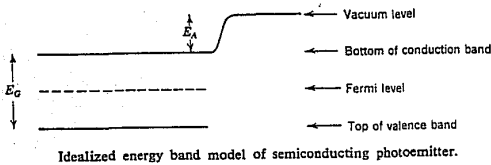
Spectral response of  $(\text{Cs})\text{Na}_2\text{KSb}$ . Solid line measured at room temperature, crosses measured at  $77^\circ\text{K}$ , dashed line theoretical curve (Spicer [347]).

### Proceso de Fotoemisión.

El fenómeno de la fotoemisión se presenta principalmente en los metales, semimetales y en materiales semiconductores. Este fenómeno se considera como un proceso de tres etapas. La primera consiste en la absorción del fotón, lo cual conduce a la producción de alta energía en los electrones del material; la segunda es la remoción de estos electrones a la interfase de conducción. La tercera etapa es el escape de los electrones de la barrera superficial del material hacia el vacío.

Un fotón puede ser absorbido y producir un electrón libre, es decir, pasar de la banda de valencia a la banda de conducción, si la energía proporcionada por el fotón excede  $E_G$  (ver fig. I.2.). Para escapar al vacío el electrón debe tener suficiente energía para superar la afinidad electrónica  $E_A$ , representada en el diagrama por la distancia entre la banda de conducción y el límite de vacío. En conclusión, la mínima energía requerida por un fotón para producir fotoemisión es  $(E_G + E_A)$ . Para un material fotoemisor determinado, la energía necesaria para desprender electrones de su superficie se expresa en términos de una función conocida como "función de trabajo".

Fig. I.2.



### Características del Fotocátodo.

El límite inferior en longitud de onda al que puede ser sensible el fotocátodo (FC) es función exclusiva del material que se utiliza como sustrato (base), con lo cual se limita el intervalo de frecuencias que observa el detector. El cuarzo se utiliza como sustrato o base ya que presenta una curva de transmisión aceptable dada la longitud de onda de la luz incidente.

Los materiales fotoemisivos deben de presentar una función de trabajo lo suficientemente baja como para permitir que aún los fotones de muy baja energía (luz infrarroja) puedan liberar electrones de su superficie. El límite inferior en frecuencia que puede detectar un fotocátodo es función exclusiva del material fotoemisivo.

Los materiales usados como fotoemisores tienen propiedades de semiconductores. Dichos materiales se fabrican normalmente a partir de metales alcalinos ya que éstos tienen la propiedad de emitir electrones cuando son irradiados (ver *Proceso de Fotoemisión*).

Existen algunas fuentes de ruido asociadas al fotocátodo, siendo la más importante la llamada "corriente oscura". Esta se debe a que algunos electrones son desprendidos de la superficie del fotocátodo sin ser excitados por fotones incidentes en el material. Esto resulta en una cascada de electrones debido a la aceleración provocada por el campo eléctrico existente entre el fotocátodo y las placas microcanales, y por lo tanto provocar ruido en la medición de eventos. Esta corriente oscura se logra disminuir cuando se opera el detector a bajas temperaturas (del orden de  $-30^{\circ}\text{C}$ ).

El fotocátodo es uno de los elementos más importantes del MEPSICRON ya que de él depende la correcta detección de eventos fotoemisivos del exterior y determina, como ya se vió, el rango de operación del detector.

### **1.2.3. Placas Microcanales (PMC's).**

Una vez que se desprende el haz electrónico de la superficie del fotocátodo, éste pasa a un arreglo de placas microcanales para la multiplicación de los electrones; esto se hace con el fin de producir una carga electrónica fácilmente medible. Como ya se mencionó, existe una diferencia de potencial entre el fotocátodo y la primera placa microcanal con el fin de proporcionarle a los electrones cierta energía cinética y llevar a cabo correctamente la etapa de multiplicación.

Las placas microcanales (PMC's) son arreglos circulares de capilares de vidrio muy delgados (aprox.  $12\mu$ ) compuestos principalmente de  $\text{PbO}$ ,  $\text{SiO}_2$  y otros óxidos alcalinos. Estos tubos capilares o microcanales tienen la propiedad de presentar una alta emisión electrónica secundaria por electrón incidente en su superficie.

El principio de funcionamiento de un microcanal se describe a continuación:

El electrón, emitido por el FC y acelerado por el campo eléctrico, incide sobre la pared interna del microcanal. Al hacerlo desprende dos o más electrones secundarios los cuales son acelerados por la diferencia de potencial a la que se encuentran los dos extremos del microcanal (ver fig. 1.3.).

Cada electrón secundario emitido incide nuevamente sobre la pared interna del microcanal desprendiendo a su vez electrones secundarios. Este proceso se repite sucesivamente de tal forma

que por cada electrón que entra al microcanal se tiene al final de éste aproximadamente un total de  $10^8$  electrones.

La forma cilíndrica de los microcanales asegura el choque de los electrones secundarios con componentes de movimiento radial contra la pared del microcanal por ser una superficie cerrada. Además los microcanales tienen un cierto ángulo de inclinación con respecto a la vertical. Esto evita la posibilidad de que los electrones sean acelerados en línea recta a través de los canales sin sufrir colisiones en las paredes internas de éstos.

El funcionamiento de las placas microcanales dentro del detector se logra por medio de arreglos de dichas placas superpuestas y no usadas aisladamente. Se utilizan dos arreglos de placas microcanales posteriores al fotocátodo: el primero de ellos consiste en dos placas superpuestas y se denomina arreglo en V. En dicho arreglo las microcanales de la placa superior, dado el ángulo de inclinación, quedan orientadas en forma opuesta a las microcanales de la placa inferior.

El segundo arreglo consiste en tres placas microcanales superpuestas y se denomina arreglo Z. Al igual que en el arreglo V, las microcanales de las placas quedan colocadas en forma opuesta a las de la placa contigua.

A continuación se describen las características más importantes de las placas microcanales.

*Alta ganancia.* Se debe procurar tener la mayor amplificación posible de electrones que se obtengan de la superficie del fotocátodo.

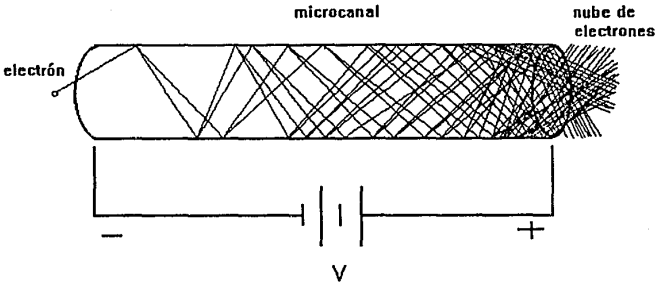
*Bajo ruido.* La relación señal a ruido debe ser grande, de lo contrario, cualquier evento extraño (no provocado por un fotón) tendría una amplitud comparable a la de la señal real.

*Alta resolución temporal.* Las placas microcanales deben de tener una respuesta lo suficientemente rápida para poder detectar eventos poco separados en el tiempo y de esta forma ampliar el intervalo dinámico del detector.

*Alta resolución espacial.* Las placas microcanales deben permitir la localización en un plano de los eventos individuales con una precisión dada.

Las placas microcanales deben de contar con las características enunciadas anteriormente para asegurar su buen funcionamiento dentro del detector.

Fig. I.3. Multiplicación de electrones dentro de un microcanal.



Un factor importante que puede alterar la correcta operación de las placas microcanales es la presencia de fuentes de ruido. La más importante de ellas es la retroalimentación iónica, producida por trazas de gas que permanecen en el envase del detector después de hacer el vacío. Si un átomo de gas residual se encuentra en el microcanal cuando se forma la cascada electrónica, existe la posibilidad de que éste se ionice. En este momento el átomo queda cargado positivamente (ión positivo). Debido a la diferencia de potencial existente este ión es acelerado en sentido opuesto al flujo de electrones, pudiendo chocar con las paredes del microcanal y desprender electrones, los cuales no corresponden a eventos de fotoemisión. Por otro lado, el ión positivo al ser acelerado puede llegar a dañar la superficie del fotocátodo si logra chocar con éste.

El efecto mencionado anteriormente se disminuye con los arreglos en V y en Z de las placas microcanales. Debido a que entre ambos arreglos existe un espacio (gap), los átomos de gas atrapados tienden a irse hacia el exterior de este interespacio, donde encuentran mayor volumen para acomodarse. Dichos átomos pueden salir a través de unos orificios dispuestos en las piezas que sostienen a las PMC's.

### *Proceso de Fabricación de las Placas Microcanales.*

El proceso de fabricación de las placas microcanales se describe a continuación:

Inicialmente se forman cilindros de vidrio por fundición, introduciéndose en ellos un corazón de vidrio soluble en ácido, formado por un haz de barras delgadas. Este corazón formará posteriormente los microcanales y además proporciona resistencia mecánica al arreglo. Enseguida se calienta el cilindro con el corazón hasta una temperatura típica de fusión y se estira regulando el diámetro con una máquina de tracción, obteniéndose cilindros muy delgados. Los cilindros son unidos posteriormente en un arreglo hexagonal. Estos arreglos se adelgazan aún más estirándolos en un horno (regulación de presión y temperatura) hasta que cada microcanal alcanza un diámetro de 12µm aproximadamente.

Posteriormente se reúnen varios de estos arreglos para formar un conjunto final más grueso (30 mm aprox.) que contiene del orden de un millón de microcanales.

Finalmente, se cortan placas delgadas, de 1 mm. de espesor aproximadamente, y se pulen las caras. Estas placas son tratadas en ácido para eliminar el corazón de vidrio y formar así los tubos microcanales o simplemente microcanales.

#### **I.2.4. Anodo Resistivo (AR).**

Una vez obtenida la nube electrónica del arreglo de placas microcanales se procede a obtener la información necesaria de dicho pulso de electrones. Esta información consiste en la posición del centroide de dicha nube electrónica así como su intensidad (corriente), medida en las cuatro esquinas del ánodo resistivo.

El método más eficiente para localizar el lugar de incidencia de una nube electrónica son los dispositivos basados en el principio de análisis de la dispersión de cargas en materiales resistivos. Dichos dispositivos se conocen con el nombre de ánodos resistivos.

En un principio los detectores bidimensionales utilizaban ánodos resistivos en forma cuadrada. Se observó que con este tipo de ánodos se formaban imágenes distorsionadas debido a las líneas de flujo del campo eléctrico ocasionadas por dicha geometría cuadrada. Se llegó a determinar que adoptando un ánodo resistivo con bordes redondeados y aristas en punta (ver fig. I.4.) se podía nulificar el efecto de distorsión y obtener imágenes con mejor definición. Este es el tipo de ánodo que se utiliza en el detector MEPSICRON. El funcionamiento del ánodo resistivo dentro del detector se describe a continuación.

A través de las cuatro esquinas del ánodo resistivo se detectan valores de corriente dependiendo de la forma del flujo de carga. De esta forma, si la incidencia de electrones se realiza cerca de alguna de las esquinas del ánodo, en ésta se tendrá un valor mayor de corriente que en cualquiera de las otras tres. Si la incidencia es exactamente en el centro del ánodo se tendrán valores iguales de corriente en las cuatro esquinas.



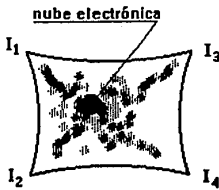


Fig. I.4. Anodo Resistivo.

Por medio del análisis de las corrientes  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  e  $I_4$  correspondientes a las cuatro esquinas del ánodo resistivo se determina la posición  $(x,y)$  del centroide de la nube electrónica incidente (ver funcionamiento del analizador de posición de eventos). Dicho centroide coincide con la posición del electrón que originó la nube electrónica en cuestión. A su vez, esta posición corresponde con la del fotón que incidió sobre el fotocátodo para desprender al electrón.

Los ánodos resistivos presentan ruido asociado a efectos térmicos los cuales varían dependiendo del valor de resistencia del ánodo. De este modo tenemos que:

- Para ánodos resistivos con resistencia grande se tienen valores de ruido grandes y velocidad de respuesta baja. La velocidad de respuesta se calcula como  $1/RC$ .
- Para ánodos resistivos con resistencia muy baja se tiene ruido pequeño y velocidad de respuesta alta.

### 1.3. FUNCIONAMIENTO DEL DETECTOR.

Todos los elementos descritos anteriormente se ensamblan y encapsulan a alto vacío en un contenedor de acero inoxidable formando así el detector MEPSICRON. Cada esquina del ánodo resistivo está conectada eléctricamente con el exterior por medio de conectores sellados en el fondo del conjunto. También se tienen conectores hacia el exterior para los potenciales eléctricos necesarios para el funcionamiento del detector. Los detalles de diseño y ensamble del detector se verán en el capítulo II.

Las diferencias de potencial que se tienen en el interior del detector para su operación son las siguientes (ver fig.1.5):

Entre el fotocátodo y la placa superior del primer arreglo de placas microcanales (arreglo V) se tiene una diferencia de potencial de +700 V ( $V_{pk}$ ); entre las dos superficies del arreglo V (placa superior e inferior) se tiene una diferencia de +1800 V ( $V_1$ ); entre el arreglo V y el arreglo Z de placas microcanales existe una diferencia de -200 V ( $V_2$ ); las dos superficies del arreglo Z (placas superior e inferior) están a +1900 V ( $V_3$ ). Por último, entre la última placa del segundo arreglo de placas microcanales (arreglo Z) y el ánodo resistivo existe una diferencia de +100 V ( $V_{AN}$ ).

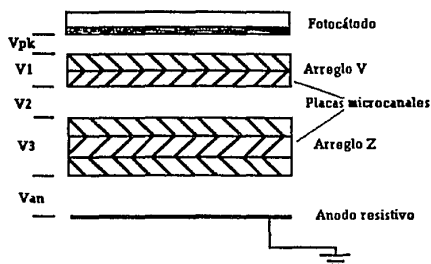
Como se puede ver, los electrones se aceleran hacia el ánodo resistivo ya que siempre se encuentran diferencias de potencial cada vez mayores en su trayectoria, excepto entre los dos arreglos de PMC's. En esta zona se tiene un potencial inverso a los demás (-200 V). El objetivo de este potencial inverso se explica a continuación:

Existen electrones que salen del primer arreglo de PMC's los cuales no tienen suficiente energía para acelerar electrones en el segundo arreglo (arreglo Z). Si estos electrones entraran en los microcanales del arreglo Z dificultarían el proceso de multiplicación ya que al chocar con electrones de alta energía se tendrían electrones con menor energía. Con el potencial inverso, dichos electrones de baja energía se aceleran en sentido opuesto y de esta forma son eliminados. El potencial es lo suficientemente bajo como para no desacelerar a los electrones de alta energía y dificultar su camino hacia el arreglo Z de microcanales.

El funcionamiento de detector se explica a continuación (ver fig. 1.5.).

Se hace incidir un haz de luz (carga de fotones) sobre la superficie del fotocátodo (ventana del detector). Dichos fotones pasan a través del vidrio de cuarzo y chocan sobre la superficie del material fotoemisor liberando electrones. Cada electrón liberado por el FC es acelerado por el campo eléctrico correspondiente antes de llegar al primer arreglo de placas microcanales (arreglo V). Los electrones se multiplican dentro de las placas microcanales con ayuda de la diferencia de potencial a la que se encuentran éstas.

Fig. I.5. Configuración del Detector MEPSICRON



Al final del segundo arreglo de placas microcanales se tiene una nube electrónica la cual es proyectada sobre la superficie del ánodo resistivo. Al hacerlo se tiene una distribución de carga la cual es detectada por los 4 conectores del ánodo en forma de intensidades de corriente.

La información obtenida de esta forma es preamplificada y pasada después al analizador de posición de eventos (APE). En este analizador se obtiene la posición  $(x,y)$  del centroide de cada nube electrónica que incide en el ánodo resistivo. Debido al tiempo de respuesta del ánodo resistivo, no todos los eventos son registrados por el sistema. Como se explicó, los centroides obtenidos coinciden con la posición original del electrón que provocó la nube y a su vez con la del fotón incidente en el fotocátodo. Por cada fotón que se proyecta sobre la ventana del detector (fotocátodo) se registra un evento en la memoria del sistema del MEPSICRON. Al cabo de un número determinado de eventos se forma una imagen bidimensional a partir de las posiciones  $(x,y)$  de cada electrón. Esta imagen es una representación en tiempo real del fenómeno que se esté observando (por ejemplo un astro o una estrella por medio de un telescopio). Dicha imagen se proyecta sobre un monitor.

#### I.4. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACION: FUNCIONAMIENTO DEL PREAMPLIFICADOR Y ANALIZADOR DE POSICION DE EVENTOS.

Una vez obtenida la información generada dentro del detector, correspondiente a los pulsos eléctricos producidos por el fenómeno fotoemisor, es necesario analizar y almacenar dicha información a fin de obtener la imagen bidimensional representativa del fenómeno luminoso que se esté observando.

A continuación se explica el funcionamiento de los dispositivos electrónicos así como los métodos empleados para procesar la información. Dichos dispositivos en conjunto con el MEPSICRON, constituyen el sistema completo de detección de imágenes.

#### I.4.1. Preamplificador.

La carga eléctrica proveniente de las 4 esquinas del ánodo resistivo tiene una intensidad muy baja, por lo que debe ser integrada y preamplificada en cuatro circuitos (PA-1 a PA-4).

El preamplificador consta principalmente de un amplificador de carga-corriente de alta ganancia y alta velocidad que integra la carga que proviene del MEPSICRON. El preamplificador tarda 50 ns en integrar la carga de un evento y se reestablece en aproximadamente 150 ns. La señal del preamplificador se envía mediante líneas de transmisión hacia el analizador de posición de eventos (APE).

#### I.4.2. Analizador de Posición de Eventos (APE).

El analizador de posición de eventos recibe la señal de los cuatro preamplificadores para su procesamiento. A continuación se muestra un esquema de la configuración básica del analizador de posición de eventos (APE) (ver fig. I.6.):

El algoritmo mediante el cual se obtienen las coordenadas (x,y) del centroide de cada nube de electrones es el siguiente:

Cuando una nube de electrones incide sobre la superficie resistiva se presenta una distribución de carga a partir del punto de incidencia, con lo cual se presenta un voltaje en dicho punto. La intensidad de las corrientes que se miden en las cuatro esquinas del ánodo resistivo están en función de la localización del centroide de la nube. Las coordenadas del centroide son obtenidas como sigue. Las corrientes registradas en las cuatro esquinas son amplificadas e integradas teniendo como resultado voltajes proporcionales. A nivel electrónico se realizan las siguientes operaciones para determinar (x,y):

$$x = \frac{V_1 + V_2}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4}$$

$$y = \frac{V_1 + V_4}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4}$$

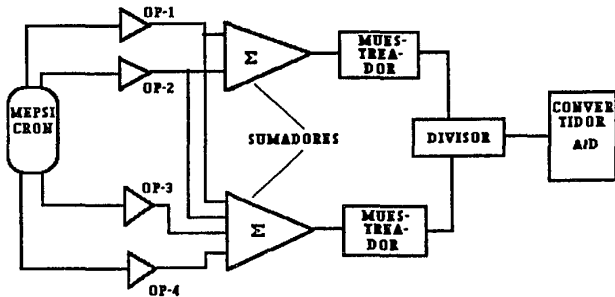


Fig. 1.6. Configuración del Sistema MEPSICRON-APE.

Las ecuaciones anteriores se obtienen de considerar que las corrientes medidas, y por tanto los voltajes, varían linealmente con respecto a la posición del evento.

Los circuitos integrados OP-1 a OP-3 son amplificadores operacionales de alta velocidad y alta impedancia de entrada en los que se realizan las sumas  $V_1+V_4$  para la coordenada  $x$ ,  $V_2+V_3$  para la coordenada  $y$  y  $V_1+V_2+V_3+V_4$  para el denominador de la división.

La señal de los amplificadores es muestreada por el CI-5 que es un muestreador inversor de alta velocidad el cual es dirigido por el circuito de control para sostener el nivel de la señal mientras se efectúa la conversión A/D (analógico/digital).

## I.5. SISTEMA DE VACIO.

### I.5.1. Condiciones de Vacío para el Funcionamiento del Detector.

El detector bidimensional de imagen MEPSICRON debe operar a alto vacío por las razones que a continuación se explican.

a) Los fotocátodos se construyen y operan a altas presiones de vacío. Esto se debe a que los elementos que forman el material fotoemisorio (Na, K y Cs) sólo "viven" en vacío. A presión ambiente sólo es posible encontrarlos en forma de óxidos y otros compuestos.

El proceso de construcción del fotocátodo anteriormente descrito se debe efectuar a alto vacío para asegurar que efectivamente se evaporan los elementos puros mencionados. El compuesto obtenido sólo puede trabajar en vacío ya que si estuviera en contacto con aire el material reaccionaría y se tendría otra composición diferente a la original.

b) Otra razón importante de la operación en vacío del detector está determinada por el funcionamiento de las placas microcanales. Dichas placas tienen un espesor 0.5 mm y están sometidas a altos voltajes dentro del detector (3 kV). Si se tuviera la presencia de algún gas dentro de los microcanales se formarían fácilmente arcos eléctricos y las placas dejarían de funcionar. El vacío que se necesita tener para que lo anterior no ocurra se logra con presiones del orden de  $10^{-6}$  mbar.

Es difícil impedir que algunas moléculas de gas queden atrapadas dentro de las microcanales. Cuando los electrones provenientes del fotocátodo entran en las microcanales y se empiezan a multiplicar, es posible que algunos electrones choquen con los átomos de gas atrapados y liberen más electrones. El resultado de este efecto es que al final de los arreglos de placas microcanales se tendrá una nube electrónica en la cual un número determinado de electrones no corresponden a un evento fotoemisorio, es decir, no fueron originados por algún fotón incidente en la superficie del fotocátodo. En este sentido se dificulta la localización del centroide de la nube. En la medida que se logra una mejor calidad de vacío se disminuye este efecto y se mejora el rango dinámico del detector.

c) Otro factor importante relacionado con el funcionamiento en vacío del detector es el relacionado con la "calidad de limpieza". Es importante que durante el ensamble y funcionamiento del detector MEPSICRON se tenga la mayor calidad de limpieza posible de todas las piezas que componen al tubo (detector). Se ha observado que a mayores presiones de vacío se logran fotocátodos más estables. Estas presiones son del orden de  $10^{-10}$  mbares. El hecho de que los fotocátodos sean más estables garantiza que su vida de duración sea mucho mayor sin decremento de su capacidad de detección.

### **I.5.2. Sistema de Alto Vacío: Bomba turbomolecular.**

Para lograr las presiones de vacío necesarias para la fabricación y el ensamble del detector MEPSICRON se utiliza un sistema de vacío compuesto principalmente de los siguientes elementos:

- Cámara de vacío.
- Bomba turbomolecular.
- Bomba mecánica.
- Trampa fría.

La cámara de vacío es el espacio del cual se remueven aire y otros gases para lograr las condiciones de vacío adecuadas. En esta cámara se lleva a cabo el proceso de fabricación del fotocátodo (por evaporación), limpieza de las piezas y ensamble del detector.

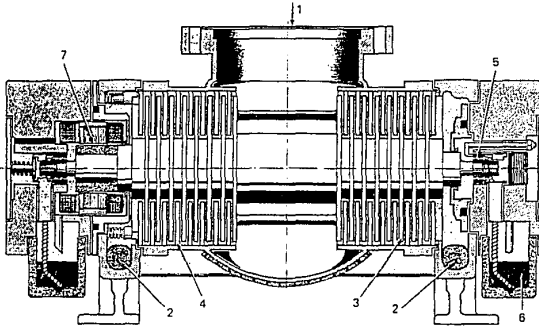
Las paredes que conforman la cámara de vacío deben ser de un material adecuado el cual debe de presentar muy bajos niveles de permeabilidad. Gases tales como nitrógeno, oxígeno, vapor de agua, etc. que normalmente se encuentran en el aire que rodea a la cámara de vacío, podrían penetrar en ésta a través de las paredes al momento de crear alto vacío en su interior. Los aceros inoxidables son los materiales que presentan mejores características para la fabricación de contenedores que trabajan a altos niveles de vacío.

La bomba turbomolecular es la parte central del sistema de vacío. Esta bomba está conectada directamente a la cámara de vacío y funciona de la siguiente manera:

La bomba turbomolecular está formada por una turbina la cual consta de dos secciones de álabes rotatorios dispuestos simétricamente sobre la flecha de la turbina (ver fig. I.7.). La compresión se logra por medio de la transferencia de momentum de los álabes rotatorios hacia las moléculas del gas en cuestión. Los álabes tienen una cierta inclinación con respecto al eje de la flecha con lo cual las moléculas siempre son impulsadas en dirección de la siguiente serie de álabes hasta lograr su expulsión de la bomba.

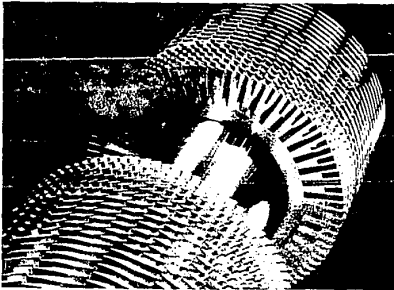
Las series de álabes rotatorios se alternan con series de álabes fijos (estator). La velocidad relativa entre los dos grupos de álabes hace probable que una molécula de gas sea transportada desde la entrada de la bomba hasta su salida. La bomba opera con velocidades del rotor que van desde 24,000 hasta 60,000 rpm. En la fig. I.8. se muestra un corte transversal de la bomba turbomolecular.

Fig. I.7.



Section view of Pfeiffer TPU-200 turbomolecular pump: (1) inlet, (2) outlet, rotor disk, (4) stator disk, (5) bearing, (6) oil reservoir, (7) motor. Reprinted with mission from A. Pfeiffer Vakuumtechnik, G.m.b.H., Wetzlar, Germany.

Fig. I.8.



Three-stage rotor from a Pfeiffer TPU-200 turbomolecular pump. Reprinted with permission from A. Pfeiffer Vakuumtechnik, G.m.b.H., Wetzlar, West Germany.



Para que la bomba turbomolecular pueda bombear gas desde la cámara de vacío hasta el exterior, debe de existir una presión diferencial entre estos dos puntos. La bomba turbomolecular no puede crear por sí sola esta presión diferencial por lo que para funcionar debe de tener conectada a la salida una bomba mecánica que sea capaz de crear dicha diferencia de presión.

Entre la bomba mecánica y la bomba turbomolecular existe una trampa fría o trampa de frío. La función de esta trampa es evitar que cualquier gota de aceite del sistema de sello de la bomba mecánica se introduzca en la cámara de vacío pasando a través de la bomba turbomolecular. Esto puede suceder ya que aunque la bomba turbomolecular constantemente está bombeando gas hacia el exterior, la cámara de vacío se encuentra a una presión mucho menor que la atmosférica y cualquier partícula de gas se puede sentir atraída hacia el interior de la cámara. La trampa fría condensa cualquier gota que entre a su interior, evitando así que pase hacia la cámara de vacío.

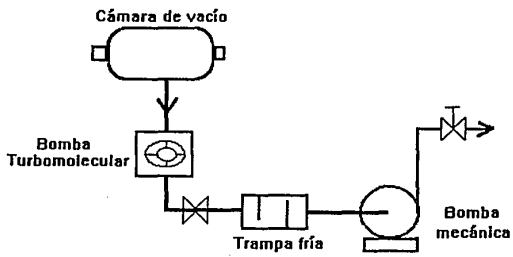
Para lograr la calidad de vacío que se requiere en los procesos de construcción del detector, el sistema se opera de la siguiente manera:

El sistema se enciende y se empieza a bombear gas del interior de la cámara de vacío hacia el exterior. Al mismo tiempo se eleva la temperatura de las paredes que conforman la cámara por medio de chaquetas de calentamiento (resistencias eléctricas).

Por efectos de difusión algunas moléculas de gas quedan atrapadas en el interior de las paredes y en el momento de crear vacío se ven forzadas a salir hacia el interior de la cámara. Calentando las paredes se acelera este proceso de difusión y de esta forma se logra una limpieza adecuada de la cámara de vacío.

Una vez que se ha removido la mayor cantidad posible de gas del interior de las paredes de la cámara, se elimina el calentamiento y se sigue bombeando hacia el exterior. Para lograr las presiones de vacío necesarias de aproximadamente  $10^{-10}$  mbar se debe mantener en funcionamiento la bomba turbomolecular durante todo el tiempo que se requiera el vacío. A continuación se muestra un diagrama del sistema completo de vacío.

Fig. I.9. DIGRAMA DEL SISTEMA DE VACIO.



**BIBLIOGRAFIA DEL CAPITULO I.**

1. Sommer, A. H. "Photoemissive Materials", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1968.
2. Mortimer, C. E. "Química", Grupo Editorial Iberoamérica, México, 1983.
3. Gutiérrez, L. A. "Sistema de Adquisición de Datos y Manejo de Imágenes para un Detector Bidimensional Tipo MEPSICRON", Tesis Profesional, Facultad de Ciencias, UNAM, México D.F., 1984.
4. Angeles, F. U. "Analizador de Posición de Eventos para un Detector Bidimensional Tipo MEPSICRON", Tesis Profesional, Facultad de Ciencias, UNAM, México D.F., 1986.
5. O'Hanlon, J. F. "A User's Guide to Vacuum Technology", New York, 1980.

## **CAPITULO II**

### **DISEÑO DEL DETECTOR MEPSICRON**

## II.1. INTRODUCCION.

### *Antecedentes.*

Durante la década pasada, una amplia variedad de sistemas de detección bidimensional de imágenes se desarrollaron. Ejemplos de estos sistemas son el VIDICON, los CCD's, intensificadores de imagen y fotomultiplicadores con microcanales. Posteriormente se desarrollan sistemas de detección más avanzados en base a placas microcanales.

Uno de estos sistemas es el detector RANICON, el cual utiliza un fotocátodo (transformación fotón-electrón), dos placas microcanales formando un arreglo V y un ánodo resistivo. El RANICON constituye el primer sistema de detección que utiliza para la etapa de multiplicación un arreglo de dos placas microcanales. Otro elemento innovador en este detector es el ánodo resistivo, por medio del cual se miden los pulsos eléctricos en las cuatro esquinas de este elemento para posteriormente analizar la información en un sistema computarizado. En base a este análisis se determina la posición relativa de cada nube de electrones incidente en la superficie del ánodo resistivo.

En base al RANICON y atendiendo principalmente a la etapa de multiplicación de electrones dentro de las PMC's, se desarrolla en el Instituto de Astronomía de la UNAM un nuevo detector, conocido con el nombre de MEPSICRON.

La principal diferencia entre el RANICON y el MEPSICRON es la implementación, en este último, de un arreglo de tres placas microcanales en una configuración Z, el cual se encuentra colocado inmediatamente después del arreglo V. Con esta modificación se consigue incrementar la ganancia del detector de  $1 \times 10^7$  a  $1 \times 10^8$  electrones. Una mayor ganancia electrónica hace que se facilite el proceso de detección de la señal registrada en los extremos del ánodo resistivo.

Asimismo, se logra mejorar la resolución espacial del detector, es decir, se tiene una mejor definición de la nube electrónica que sale de las PMC's. Esta característica se debe a la posibilidad de eliminar electrones de baja energía por medio del potencial inverso que existe entre los dos arreglos de PMC's. En el caso del RANICON no existe un potencial inverso, por lo que la presencia de electrones que no corresponden a fenómenos fotoemisivos hace que el tamaño del cono de electrones a la salida de las PMC's se incremente. Por esta razón, la determinación de la posición del centroide de la nube electrónica se realice con mayor exactitud en el MEPSICRON. La resolución espacial en el RANICON es de  $50\mu$  mientras que en el MEPSICRON es de  $42\mu$ .

En el periodo en que se desarrolla el diseño del MEPSICRON, no se contaba en el Instituto de Astronomía con la tecnología adecuada para poder construir este nuevo detector, por lo que se decide fabricarlo en los Laboratorios de I.T.T., en E.E.U.U.

I.T.T. ensambla el MEPSICRON en base a la estructura que se tenía para el detector RANICON, modificándola para poder implementar el segundo arreglo de placas microcanales. El

diseño del MEPSICRON realizado por I.T.T. será expuesto en la última parte del presente capítulo.

Posteriormente, el Instituto de Astronomía adquiere sucesivamente dos detectores MEPSICRON ensamblados por I.T.T., de los cuales el primero tiene un periodo de vida útil de 2 años. El segundo detector sólo dura 2 meses funcionando correctamente.

En base a esta experiencia se decide abrir el MEPSICRON fabricado por I.T.T. Del análisis del diseño de este detector, se determina que modificando la estructura del mismo, se podía conseguir un detector de mejor calidad y más estable. Este detector sería diseñado y ensamblado en el Instituto de Astronomía de la UNAM.

El primer paso importante para poder fabricar el detector dentro del Instituto, era implementar un laboratorio de alto vacío, donde se pudiera realizar la construcción de fotocátodos y el ensamble del detector. Es así como surge el laboratorio de detectores del Instituto donde se comienza la investigación para la construcción del detector MEPSICRON.

De esta forma surge el detector MEPSICRON al cual atiende el presente trabajo y cuyo diseño se explica en este capítulo. Para distinguir entre los dos diseños del MEPSICRON, es decir, el fabricado por I.T.T. y el desarrollado y ensamblado en el Instituto de Astronomía, se denomina al primero como Tubo ITT y al segundo como MEPSICRON, aunque ambos detectores constituyen un detector MEPSICRON, el cual contempla un fotocátodo, dos arreglos de PMC's (V y Z) y un ánodo resistivo. La diferencia entre ambos diseños estriba exclusivamente en la estructura externa y soporte de la estructura interna del detector, pero la base de funcionamiento de ambos es la misma.

### *Aspectos Generales del Capítulo II.*

En la siguiente sección (Diseño y Descripción de las Piezas), se hace una descripción detallada del diseño de las piezas que conforman al detector MEPSICRON, así como la función específica de cada una de ellas dentro del detector. El diseño de estas piezas atiende principalmente a aspectos de funcionamiento del detector, así como al proceso de construcción del mismo. Una etapa de dicho proceso se lleva a cabo dentro de una cámara de vacío, por lo que se deben emplear materiales adecuados para aplicaciones a altos niveles de vacío.

Como ya se mencionó, el análisis de esfuerzos de la estructura del detector no forma parte directamente del diseño. Sin embargo, debido a las aplicaciones astronómicas del detector en el espacio exterior (abordo de un satélite), es necesario realizar dicho análisis, con el fin de determinar si el prototipo, obtenido del diseño planteado, puede ser utilizado en las aplicaciones mencionadas. Debido a la complejidad del análisis de esfuerzos, éste se presenta en el capítulo III.

En la parte final del presente capítulo se describe el diseño del Tubo ITT, en base al cual se desarrolla el nuevo detector. Se presentan las características principales de este diseño y sus desventajas con respecto al diseño del MEPSICRON. Asimismo, se presentan las consideraciones

más importantes que se tomaron en cuenta para modificar el diseño de ITT y lograr obtener un detector con mejores características tanto para el ensamble como para su funcionamiento.

Cabe mencionar que el MEPSICRON constituye un prototipo experimental, el cual deberá tener modificaciones futuras para lograr un detector capaz de ser industrializado sin perder las características que originaron su diseño.

Tanto el ensamble del MEPSICRON en alto vacío como las pruebas experimentales finales serán tema del capítulo IV.

## **II.2. DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DE LAS PIEZAS.**

En esta sección se expone el diseño del detector MEPSICRON, el cual contempla el encapsulado o contenedor del detector, el soporte de los diferentes elementos y las conexiones eléctricas necesarias para su funcionamiento.

Se explican las razones que originaron el presente diseño desde el punto de vista funcional, así como la interacción entre las diferentes partes en base al diseño expuesto.

Asimismo, se hace una descripción de los materiales utilizados y las características que se obtienen en el diseño en base al empleo de estos materiales. También se exponen los tipos de soldadura para la unión de las diferentes partes del detector.

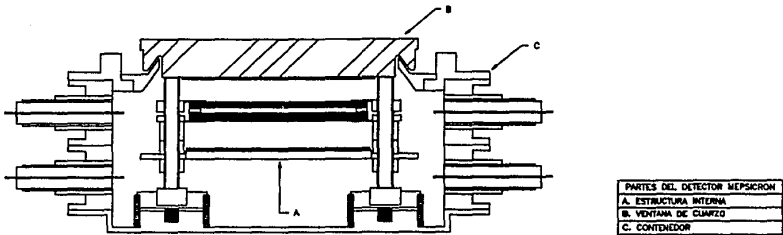
A continuación se presenta una descripción general del detector a fin de establecer sus diferentes partes, en base a las cuales se explica el diseño del detector MEPSICRON.

### *Descripción General.*

El detector MEPSICRON está compuesto fundamentalmente por tres partes (ver fig. II.1.):

- a) *Estructura interna.*
- b) *Ventana de cuarzo.*
- c) *Contenedor*

Fig. II.1.



La estructura interna junto con la ventana de cuarzo forman la parte fundamental del detector, ya que en los elementos que los componen se lleva a cabo el proceso de captación y conversión de los fotones en electrones y la extracción de información de estos últimos.

Por medio del contenedor se logra aislar a la estructura interna del detector, con lo cual se mantiene en el interior del mismo el nivel de vacío necesario para su funcionamiento.

Las tres partes mencionadas anteriormente, interactúan estrechamente entre sí para llevar a cabo el proceso de detección de imágenes.

En los siguientes puntos se hace una descripción detallada de cada una de las diferentes partes que componen al detector, así como un estudio las características y parámetros de diseño de las piezas involucradas y de los materiales utilizados.

## II.2.1. Estructura Interna del Detector.

### II.2.1.a. Descripción General.

Como se mencionó anteriormente, la estructura interna del detector en conjunto con la ventana de cuarzo, donde se encuentra depositado el fotocátodo, forman la parte fundamental del detector de imagen MEPSICRON. En este apartado se describen las piezas que componen a la estructura interna del detector.

Las partes esenciales de la estructura interna del detector son los dos paquetes de placas microcanales y el ánodo resistivo.



Los demás componentes de esta estructura constituyen el soporte, aislamiento y conexiones eléctricas tanto de las placas microcanales como del ánodo resistivo.

Las diferentes partes que componen a la estructura interna del detector se encuentran dispuestas en un arreglo piramidal (en tándem) del cual se distinguen claramente dos zonas (ver plano MEP-1):

- i. La zona superior en la que se encuentran los dos paquetes de placas microcanales.
- ii. La zona inferior en la que se encuentra la placa que contiene al ánodo resistivo.

A continuación se describe cada una de las zonas establecidas con anterioridad.

i. *Zona superior.*

Esta zona está definida por dos piezas circulares de acero inoxidable 304, las cuales soportan al arreglo V y al arreglo Z de placas microcanales.

Como se estudió en el primer capítulo, en la parte superior de esta zona se tiene el arreglo V y posterior a éste se encuentra el arreglo Z de placas microcanales.

El primer arreglo de placas microcanales (arreglo V) se encuentra soportado en su parte superior por una de las piezas circulares de acero inoxidable. Este primer arreglo consta de dos placas microcanales superpuestas. En la parte inferior del arreglo V se tiene un primer anillo metálico, el cual tiene como función hacer el contacto eléctrico inferior para este primer arreglo de placas microcanales. El contacto eléctrico superior del arreglo se tiene directamente en la pieza de acero inoxidable que sirve de soporte.

A continuación del primer anillo metálico, se dispone de una serie de anillos circulares de poliamida los cuales aíslan eléctricamente a los dos arreglos de placas microcanales. Este conjunto de anillos aislantes definen la distancia que debe existir entre los dos arreglos de placas microcanales, la cual es de 1 mm. Esta distancia está determinada por el funcionamiento de las placas microcanales.

En seguida del paquete de anillos de poliamida se encuentra un segundo anillo metálico, el cual tiene la función de hacer el contacto eléctrico superior del siguiente arreglo de placas microcanales (arreglo Z). Este segundo arreglo Z está compuesto por tres placas microcanales superpuestas. Al final del arreglo Z se tiene la siguiente pieza circular de acero inoxidable, la cual soporta a los dos paquetes de placas microcanales y sirve de contacto eléctrico inferior del arreglo Z.

ii. *Zona inferior.*

En esta zona se encuentra ubicado el ánodo resistivo. El ánodo resistivo consta de una placa de forma cuadrada fabricada de alúmina, sobre la cual se deposita por serigrafía una película

gruesa de carbono, la cual forma propiamente el material resistivo. En las cuatro esquinas de la placa se tienen los contactos eléctricos en los cuales se miden los pulsos eléctricos provocados por las nubes de electrones incidentes en la superficie del ánodo resistivo.

La placa del ánodo resistivo es soportada por una tercera pieza circular de acero inoxidable 304. Esta pieza define la zona inferior de la estructura interna del detector.

### **II.2.1.b. Soporte de la Estructura Interna.**

#### *Descripción.*

El soporte de la estructura está constituido por tres piezas circulares de acero inoxidable 304 y cuatro tornillos de cerámica. Como se mencionó anteriormente, dos de estas piezas están destinadas a sujetar los dos arreglos de placas microcanales. La pieza restante será el soporte de la placa que contiene al ánodo resistivo.

Las tres piezas circulares que soportan a las placas microcanales y al ánodo resistivo se encuentran alineadas en el arreglo piramidal descrito en el punto anterior.

Cada una de las piezas circulares de acero cuenta con cuatro barrenos, distribuidos simétricamente a lo largo de la periferia de dichas piezas. Sólo la pieza superior del soporte de las PMC's cuenta con rosca en los barrenos. A través de los barrenos de las piezas circulares pasan los cuatro tornillos de cerámica, los cuales constituyen el soporte de toda la estructura interna y mediante éstos se puede definir la distancia que debe existir entre la zona superior y la zona inferior descritas anteriormente.

A continuación se hace una descripción detallada de cada una de las partes que constituyen el soporte de la estructura interna del detector.

#### *Piezas Circulares del Soporte de la Estructura Interna.*

En este apartado se hará una descripción de cada una de las piezas circulares de acero inoxidable que sostienen a los dos arreglos de placas microcanales y al ánodo resistivo.

Las tres piezas en cuestión tienen una geometría similar, la cual está basada en un anillo circular con pestañas interiores, sobre las cuales se apoyan directamente los diferentes elementos (placas microcanales y placa del ánodo resistivo).

En el caso de las dos piezas que soportan a las placas microcanales, se diseñaron en forma circular debido a las siguientes razones:

- Las placas microcanales son de forma circular y el soporte se simplifica siendo las piezas de esta forma.

- Se logran áreas de contacto menores entre las piezas de acero y las placas microcanales, con lo cual se evitan al máximo la formación de condensadores. Debido a que se tienen dos placas metálicas con un material aislante en el interior (placas microcanales), se puede presentar este fenómeno de condensación, el cual causaría distorsiones durante el proceso de amplificación de los electrones dentro de las placas microcanales. La forma de evitar este problema con la forma circular de las piezas de acero, es por medio de las pestañas internas, las cuales sostienen a las placas microcanales.

La forma circular de la pieza circular que soporta al ánodo resistivo, obedece a la siguiente razón: se debe de evitar que existan zonas de la pieza de acero directamente por debajo de la placa que contiene al ánodo resistivo. De esta forma se elimina al máximo la posibilidad de distorsiones eléctricas al momento de hacer las mediciones sobre las esquinas del ánodo resistivo. La manera de lograrlo es precisamente mediante la forma circular de la pieza con lo cual sólo se apoyan las esquinas de la placa del ánodo y el material resistivo queda sin interacción con material metálico.

A continuación se describen cada una de las tres piezas circulares que forman parte del soporte de la estructura interna.

#### 1) *Soporte de las Placas Microcanales: Pieza Circular Superior.*

Esta pieza consiste en un anillo con cuatro pestañas o salientes interiores, las cuales se encuentran dispuestas simétricamente entre sí a lo largo de la periferia de la pieza (ver plano MEP-2). Estas pestañas tienen forma de cono truncado con lo cual se minimiza la superficie de contacto de material metálico con el vidrio de las placas microcanales.

Cada una de las cuatro pestañas de la pieza consta de un escalón delgado. Sobre la superficie interna de este escalón se apoyan directamente las dos placas microcanales del arreglo V, es decir, las pestañas quedan colocadas por encima de las placas microcanales.

La pieza cuenta con cuatro barrenos roscados distribuidos simétricamente alrededor de la periferia. A través de estos barrenos la pieza se sostiene sobre los 4 tornillos de cerámica.

La pieza es de acero inoxidable 304, el cual es un acero no magnético y tiene buenas propiedades para el maquinado.

#### 2) *Soporte de las Placas Microcanales: Pieza Circular Inferior.*

Esta pieza tiene una geometría similar a la pieza superior descrita en el punto anterior (ver plano MEP-3). De la misma forma cuenta con cuatro pestañas interiores escalonadas, sobre las cuales quedarán apoyadas las tres placas microcanales del arreglo Z. A pesar que la pieza debe soportar tres placas microcanales, los escalones de las pestañas son de menor altura que los de la pieza superior. Esto se debe a la forma final en que queda soportado todo el paquete de placas microcanales, aislantes y contactos eléctricos. En este caso las placas microcanales quedan sujetas por encima de las cuatro pestañas interiores. De esta forma se logra sujetar rígidamente a los dos arreglos de placas microcanales (estructura de sandwich).

La pieza cuenta con cuatro orificios sin rosca por medio de los cuales pasan los tornillos de cerámica. Esta pieza también es de acero inoxidable 304 no magnético.

### 3) *Soporte del Anodo Resistivo: Pieza Circular Unica.*

La pieza que soporta a la placa del ánodo resistivo es un anillo circular de mayor diámetro que las dos piezas anteriores (ver plano MEP-4).

Cuenta con cuatro pestañas interiores sin escalón, distribuidas simétricamente a lo largo de la periferia de la pieza. De la misma forma, cuenta con cuatro muescas o hendiduras, practicadas simétricamente en la periferia interior de la pieza.

Sobre las cuatro muescas, se apoyan cada una de las esquinas de la placa del ánodo resistivo. Las esquinas se fijan a la pieza circular puntéandolas sobre la superficie de la misma. De esta forma se garantiza que ninguna zona metálica se encuentre por debajo del material resistivo. Si esto ocurriera, se tendrían problemas en el momento de obtener la señal eléctrica del ánodo resistivo debido a distorsiones eléctricas ocasionadas por el material metálico.

Las cuatro pestañas interiores con que cuenta la pieza, tienen en su parte central un orificio sin rosca. A través de estos orificios pasan los 4 tornillos de cerámica.

Esta pieza circular también está maquinada en acero inoxidable 304 con propiedades no magnéticas y altamente maquinable.

### *Tornillos de Cerámica.*

Como se mencionó con anterioridad, se utilizan cuatro tornillos de cerámica los cuales soportan a las tres piezas circulares que contienen a las placas microcanales y al ánodo resistivo anteriormente descritas (ver plano MEP-1).

Los tornillos son de cerámica debido a que se deben tener perfectamente aisladas eléctricamente las piezas de acero inox. entre ellas. Con esto se logra tener cada sección de la estructura interna al potencial de voltaje requerido. Como ventaja adicional, los tornillos de cerámica presentan buena resistencia a la compresión, que será el tipo de esfuerzo más importante al que estarán sometidos dentro del detector.

Resumiendo, los tornillos de cerámica tienen tres funciones principales:

- a. Ser el soporte de las piezas circulares de acero inoxidable, las cuales a su vez son el soporte de toda la estructura interna.
- b. Por medio de los tornillos se fija la distancia que debe existir entre la última placa microcanal (arreglo Z) y la superficie del ánodo resistivo.
- c. Ser el medio aislante entre las diferentes piezas.

### *Mecanismo de Soporte de los Tornillos de Cerámica.*

La parte superior de los cuatro tornillos de cerámica queda en contacto con la cara interna del cuarzo. En su parte inferior (base de los tornillos), éstos quedan apoyados sobre la superficie interior de la base del contenedor del detector.

Cada tornillo en su cara superior está perfectamente cortado y pulido, de manera que se logre el mejor contacto de éstos con la ventana de cuarzo. La distancia que existe entre la superficie del vidrio de cuarzo, es decir, el fotocátodo, y la primera placa microcanal (arreglo V), queda definida por la sección del tornillo que sobresale por encima de la pieza circular superior.

En la parte inferior de los tornillos se encuentran las cabezas de los mismos. La cabeza de cada tornillo descansa sobre una base de acero inoxidable. Las bases a su vez quedan montadas sobre cuatro resortes metálicos los cuales quedan directamente apoyados sobre la superficie interna de la base del detector (ver plano MEP-1).

La forma de fijar las piezas circulares del soporte de la estructura interna a los tornillos de cerámica es la siguiente:

La pieza circular superior cuenta con cuatro barrenos roscados, por medio de los cuales se fija perfectamente la pieza a los 4 tornillos de cerámica. Posteriormente se tiene la siguiente pieza circular del soporte de las placas microcanales. Esta pieza no cuenta con barrenos roscados, sólo se tienen 4 orificios por donde pasan los tornillos. La forma de fijar esta pieza es por medio de 4 tuercas metálicas que se ubican por debajo de la pieza. La última pieza circular, que constituye el soporte del ánodo resistivo, tampoco cuenta con barrenos roscados, por lo que es necesario colocar otras 4 tuercas metálicas por debajo de esta pieza.

El ajuste final de la distancia entre el ánodo resistivo y la superficie inferior de la última placa microcanal, se logra por medio de cuatro piezas especiales de pirex de forma cuadrada y con uno de sus lados abiertos. Estas cuatro piezas se colocan entre las tuercas que soportan a la última pieza circular (soporte del ánodo resistivo).

#### **II.2.1.c. Conexiones Eléctricas de la Estructura Interna.**

Todas las conexiones eléctricas del detector MEPSICRON se encuentran en la estructura interna y tienen las siguientes funciones:

- i. Proporcionar los potenciales de voltaje a las placas microcanales para su funcionamiento.
- ii. Extraer los pulsos eléctricos generados en la superficie del ánodo resistivo debido a la incidencia de los electrones. Las conexiones eléctricas deben atravesar el encapsulado o contenedor del detector y quedar colocadas dentro del detector.

Las conexiones eléctricas se fijan a través del contenedor del detector por medio de traspasadores, los cuales se sueldan sobre los orificios con que cuenta la pared del contenedor para este fin.

Se tienen un total de 5 conexiones eléctricas para proporcionar los voltajes de operación del detector. Estas conexiones pasan a través de la pieza superior de la pared cilíndrica del contenedor.

Para extraer los pulsos del ánodo resistivo se cuenta con cuatro conexiones, las cuales pasan al interior del detector a través de la pieza inferior de la pared cilíndrica.

Los traspasadores cuentan con un tubo de cerámica para lograr aislamiento entre el alambre de la conexión y la pared cilíndrica. Posteriormente se tiene un recubrimiento de acero inoxidable, y es por medio de este recubrimiento que se hace la soldadura del traspasador a los orificios de la pared cilíndrica.

La unión de los traspasadores a la pared de acero inox. se realiza por medio de un proceso de soldadura TIG, utilizando gas argón para protección de la superficie.

### **II.2.2. Ventana de Cuarzo: Fotocátodo.**

La ventana del detector está formada por un disco de cuarzo, esmerilado y pulido, el cual tiene las siguientes funciones (ver plano MEP-5):

- i.* Es la tapa del contenedor del detector.
- ii.* Es el medio de conexión entre el fenómeno luminoso a analizar y la estructura interna del detector.
- iii.* Es el sustrato sobre el cual se deposita el material que forma al fotocátodo (material fotoemisivo).

La ventana de cuarzo tiene forma de plato circular, con un filete perimetral. Dicho filete facilita la unión de esta pieza con el contenedor.

A continuación se explica detalladamente cada una de estas funciones y las características de diseño en cada caso.

#### **II.2.2.a. Tapa del Contenedor.**

La ventana de cuarzo es la parte que cierra, en su parte superior, al contenedor del detector. El cierre del contenedor con esta pieza de cuarzo se realiza dentro de la cámara de vacío

y es el último paso en el proceso de ensamble del detector. En el siguiente capítulo se explicará con detalle el proceso de ensamble y sellado del detector.

La forma de sellar el contenedor con el vidrio de cuarzo se hace por medio de una pieza circular de cobre, la cual queda colocada entre la parte superior del contenedor y el vidrio de cuarzo. Como se explicará en la sección 4., es necesario utilizar esta pieza de cobre para lograr la unión entre la pieza de acero inoxidable y el vidrio de cuarzo, dada la imposibilidad de soldar directamente cuarzo con acero inoxidable.

El cuarzo se suelda a la pieza de cobre por medio de una soldadura especial de bajo punto de fusión. Para lograr la unión, se debe tener una capa de plata sobre la superficie del cuarzo. La forma de aplicar esta capa de plata es por medio de una metalización del cuarzo. Dicha metalización consiste en aplicar una capa de una pasta especial, la cual contiene un compuesto de plata. El proceso se completa horneando el vidrio una vez aplicada la pasta hasta unos 600°C por espacio de 15 min.

La metalización del vidrio de cuarzo se realiza exclusivamente en la zona del filete de la pieza en cuestión, debido a que esta parte será la que quede en contacto con la parte superior del contenedor.

### II.2.2.b. Sustrato de Cuarzo y Medio de Conexión.

En la zona central de la superficie interna del cuarzo se deposita el material que forma al fotocátodo. La ventana de cuarzo tiene la función de ser el sustrato sobre el cual se tiene el material fotoemisor. El fotocátodo queda depositado en la cara interna del cuarzo por medio de un proceso en ultra alto vacío de evaporación.

El cuarzo, al ser un material traslúcido, permite el paso de fotones desde la superficie exterior del vidrio hasta la superficie superior del fotocátodo (parte interna del cuarzo). De esta forma se excitan los electrones dentro del material fotoemisor, los cuales se desprenden de la superficie del fotocátodo para pasar a la etapa de multiplicación dentro de las placas microcanales.

#### *Maquinado del Cuarzo.*

La pieza de cuarzo consiste en un disco (cilindro) el cual se fabrica esmerilando una pieza de cuarzo con una pieza de acero, la cual tiene forma opuesta (macho) al perfil final del vidrio.

Una vez obtenidas las dimensiones finales del cuarzo se procede a pulir perfectamente las caras de éste por medio de abrasivos.

### II.2.3. Contenedor del Detector.

#### *Descripción.*

El contenedor proporciona el soporte mecánico a la estructura interna del detector y en conjunto con la ventana de cuarzo se logra el aislamiento físico del detector con el medio exterior (ver fig. II.1.). De esta forma, por medio del contenedor y la ventana de cuarzo se mantiene el nivel de vacío necesario para el funcionamiento del detector.

Todas las piezas que componen al contenedor son de forma cilíndrica y están maquinadas en acero inoxidable 304. La razón del porqué estas características de diseño se explican a continuación:

- i.* La forma cilíndrica de las piezas obedece a la forma que tienen las placas microcanales (placas circulares), las cuales definen la forma cilíndrica de todo el contenedor, tanto del soporte de la estructura interna como del contenedor y la ventana de cuarzo.
- ii.* Siendo las piezas del contenedor cilíndricas se logran sellos más uniformes entre las diferentes partes, lo cual es necesario para obtener la calidad de vacío necesaria para el correcto funcionamiento del detector.
- iii.* El material en que están maquinadas las piezas del contenedor es acero 304, no magnético. Como se explicó con anterioridad el acero es un material adecuado para aplicaciones en alto vacío. De esta forma se tiene un contenedor de acero que provee al contenedor un medio óptimo para mantener las presiones de vacío a las cuales estará sometido el interior del detector.
- iv.* Una razón importante a la cual obedece el maquinado en acero inox. de las piezas se debe a la unión que se requiere de los traspasadores de los contactos eléctricos con la pared del contenedor. Como se explicó anteriormente, los traspasadores son de cerámica con un recubrimiento de acero inox. Al ser las piezas de la pared cilíndrica de acero, se facilita la soldadura entre los traspasadores y los bordes de los orificios con que cuenta la pared del contenedor.

Todas las piezas que componen al contenedor se encuentran unidas entre sí por medio de soldadura TIG. Con este método de unión de las diferentes piezas se logra un aislamiento total entre el interior del detector y el exterior, lo cual es necesario para mantener el nivel de vacío adecuado dentro del detector.

El contenedor del detector está formado por dos partes fundamentales:

- i.* Base del contenedor.
- ii.* Pared cilíndrica del contenedor.



A continuación se explica detalladamente cada una de las piezas que componen a las dos partes mencionadas anteriormente.

### **II.2.3.a. Base del Contenedor.**

La base del contenedor es una pieza circular de acero inoxidable 304, la cual soporta interiormente a la estructura interna del detector. Toda la base está maquinada en una sola pieza (ver plano MEP-6).

Entre la periferia y la zona central de la base existe un desnivel que divide a estas dos zonas. La zona periférica se encuentra soldada a la zona inferior de la pared cilíndrica. Para esta unión se utiliza un proceso de soldadura TIG, el cual resulta ser óptimo para soldar entre sí piezas de acero inoxidable (ver sección II.2.4.).

La zona central de la base cuenta, en su cara interna, con cuatro guías cilíndricas dispuestas simétricamente entre sí. Los centros geométricos de cada guía se encuentran ubicados en las aristas de un cuadrado imaginario. Cada guía cuenta con un barreno central el cual es parte del soporte de los tornillos de cerámica como se verá más adelante.

Las guías cilíndricas tienen como función soportar a los cuatro tornillos de cerámica, los cuales a su vez son el medio de sujeción de toda la estructura interna del detector. A continuación se explica la forma en que se realiza el soporte de los tornillos de cerámica por medio de las guías cilíndricas.

El soporte de cada tornillo de cerámica se hace por medio de dos resortes: uno externo a la guía y uno confinado dentro del barreno. En la parte superior del resorte externo se apoya la pieza cilíndrica que contiene a la base del tornillo, es decir, dicha pieza queda confinada dentro del resorte. Sobre el resorte que queda dentro del barreno se apoya la base de la pieza cilíndrica que contiene a la base del tornillo de cerámica.

Los resortes tienen una función de ajuste de la estructura interna con la ventana de cuarzo. Este ajuste se lleva a cabo en el momento del cierre del detector y por medio de los resortes se asegura que los extremos superiores de los cuatro tornillos de cerámica queden en contacto con la cara interna de la ventana de cuarzo. Posteriormente se explicará detalladamente el proceso de ensamble y sellado del detector.

La disposición de las cuatro guías cilíndricas está determinada o definida por la posición en que se encuentran los 4 tornillos de cerámica que sostienen a la estructura interna.

#### *Maquinado de la Base del Detector.*

Como ya se mencionó, la base del detector está maquinada en torno en una sola pieza de acero inoxidable 304. Para el maquinado de las guías cilíndricas internas se tuvo que descentrar el mandril del torno.

### II.2.3.b. Pared Cilíndrica del Contenedor.

La pared cilíndrica del contenedor forma prácticamente el cuerpo del detector. En su parte inferior se encuentra soldada la base del contenedor para formar la estructura completa del contenedor.

La pared cilíndrica del contenedor se cierra en su parte superior con el vidrio de cuarzo, el cual conforma la ventana de cuarzo del detector.

La pared del contenedor está formada por dos piezas cilíndricas en forma de brida y simétricas entre sí.

Las dos piezas se unen entre sí por medio de soldadura TIG (acero inox.-acero inox.) para formar lo que se denomina pared cilíndrica del contenedor. La unión de estas dos piezas se realiza por medio de dos de sus caras. En estas caras se tiene una zona maquinada especialmente para lograr un sellado perfecto entre las dos piezas, al presentar cada una de ellas áreas de contacto lo suficientemente grandes para asegurar el mayor contacto posible.

A continuación se explican las características de diseño de las dos piezas cilíndricas que forman la pared del contenedor.

#### *Piezas Cilíndricas.*

La pared del contenedor está formada por dos piezas cilíndricas geoméricamente iguales entre sí. Cada pieza está maquinada en una sola pieza de acero inoxidable 304. A continuación se describe una de las piezas (ver plano MEP-7).

La forma geométrica de la pieza es similar a una brida para unión de tuberías. Cuenta en sus dos extremos con superficies planas para facilitar la unión de las dos piezas entre sí y de ambas piezas con la base del contenedor en su parte inferior y la ventana de cuarzo en su parte superior.

Ambas piezas cuentan con orificios maquinados a lo largo de la pared de las mismas. Estos orificios forman los traspasadores a través de los cuales se fijan las conexiones eléctricas hacia el interior del detector. Cada traspasador cuenta con una pared externa delgada la cual sirve de apoyo para lograr la unión del acero inox. con el traspasador de la conexión eléctrica.

#### *Maquinado de las Piezas.*

De la misma forma que en el caso de la base, las dos piezas cilíndricas de la pared del contenedor se fabrican en torno, con lo cual se facilita el maquinado de las superficies que se utilizan en la unión de las piezas.

### *Unión del Contenedor con la Ventana de Cuarzo.*

En su parte superior, el contenedor se cierra por medio de la ventana de cuarzo. La unión de la ventana de cuarzo con la pieza de acero inox. se realiza por medio de una pieza intermedia de cobre OFHC (Oxigen Free High Conductivity).

La razón de porqué se utiliza una pieza de cobre para lograr la unión entre la pared cilíndrica del contenedor y el vidrio de cuarzo se debe a la dificultad de soldar directamente acero inoxidable con cuarzo. En la actualidad no se cuenta con un método eficaz para unir estos dos materiales.

Sin embargo se puede lograr la unión de cobre con cuarzo por medio de una soldadura especial con la cual se une la pieza de cobre con la superficie metalizada del vidrio de cuarzo. En este caso se usa una soldadura de bajo punto de fusión compuesta de indio, estaño y bismuto. (I, Sn, Bi).

La utilización de la soldadura de bajo punto de fusión obedece al proceso de ensamble del detector, el cual se realiza a altos niveles de vacío. Con esta soldadura se evita tener temperaturas muy elevadas dentro de la cámara de vacío en el momento de cierre del detector, con lo cual se protegen las piezas de la estructura interna del detector.

### *Piezas de Cobre (Planos MEP-8 y MEP-9).*

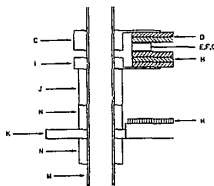
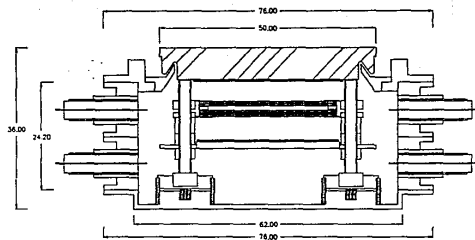
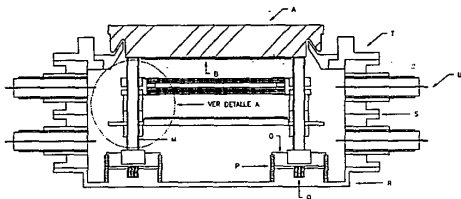
Se utilizan dos piezas de cobre como medio de unión entre el contenedor del detector y la ventana de cuarzo, las cuales se unen entre sí por medio de cuatro tornillos pequeños.

Las piezas de cobre, al quedar unidas entre sí, forman un espacio en forma de canaleta a lo largo de la periferia de su unión. En este espacio se deposita la soldadura de bajo punto de fusión para unir la ventana de cuarzo al contenedor.

La pieza de cobre exterior se une al contenedor por medio de soldadura TIG. Este proceso de unión se lleva a cabo fuera de la cámara de vacío. Posteriormente, y una vez colocada la estructura interna dentro del contenedor, se une la ventana de cuarzo a las piezas de cobre dentro de la cámara de vacío. Como se explicó en el capítulo I, para lograr la unión es necesario metalizar previamente la ventana de cuarzo.

Posteriormente, cuando se tiene el detector dentro de la cámara de vacío para su sellado, se calienta todo el conjunto (contenedor y parte interna del detector), hasta una temperatura de aproximadamente 60°C.

Una vez que se tiene la soldadura en estado líquido, se coloca el vidrio de cuarzo (filete) sobre la canaleta de las piezas de cobre.



DETALLE A

PIEZAS CONSTITUTIVAS DEL DETECTOR MEPSICRON	
A.	VENTANA DE CUARZO (PLANO "MEP-5")
B.	FOTOCATODO
C.	PIEZA CIRCULAR SUPERIOR DE ACERO INOXIDABLE (PLANO "MEP-2")
D.	ARREGLO "Y" DE PLACAS MICROCANALES
E.	ANILLO METALICO (CONTACTO ELECTRICO)
F.	PAQUETE DE POLIAMIDA
G.	ANILLO METALICO (CONTACTO ELECTRICO)
H.	ARREGLO "Z" DE PLACAS MICROCANALES
I.	PIEZA CIRCULAR INFERIOR DE ACERO INOXIDABLE (PLANO "MEP-3")
J.	PIEZAS DE PINEA
K.	SOPORTE DEL ANODO RESISTIVO (PIEZA DE ACERO INOX. PLANO "MEP-4")
L.	ANODO RESISTIVO
M.	TORNILLOS DE CERAMICA
N.	TUERCAS DE ACERO INOXIDABLE
O.	SOPORTE DE LOS TORNILLOS DE CERAMICA (PIEZA DE ACERO INOX.)
P.	RESORTE EXTERIOR
Q.	RESORTE INTERIOR
R.	BASE DEL DETECTOR (PIEZA DE ACERO INOXIDABLE PLANO "MEP-6")
S.	PARED CILINDRICA DEL DETECTOR (PIEZAS DE ACERO INOX. PLANO "MEP-7")
T.	PIEZAS DE COBRE (PLANOS "MEP-8" Y "MEP-9")
U.	TRASPASADOR DEL CONTENEDOR

DISENO DE UN DETECTOR TIPO MEPSICRON

IA.UNAM. Plano:  
 FI.UNAM. CORTE DEL DETECTOR MEPSICRON

ERIC PORRAS MUSALEM  
 JOSE A. GUTIERREZ FRIAS

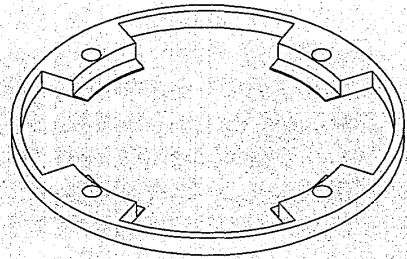
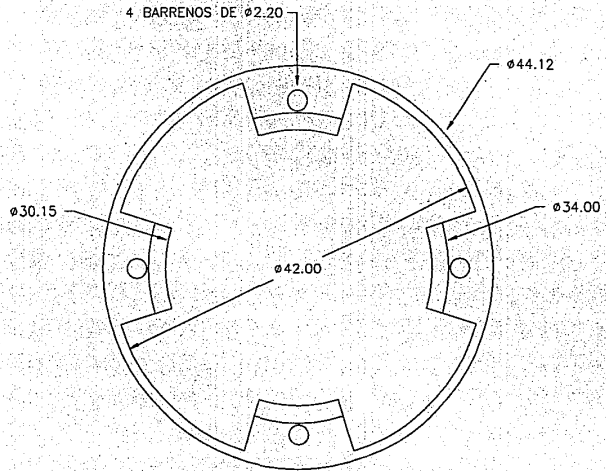
acot. mm

esc. 1:1

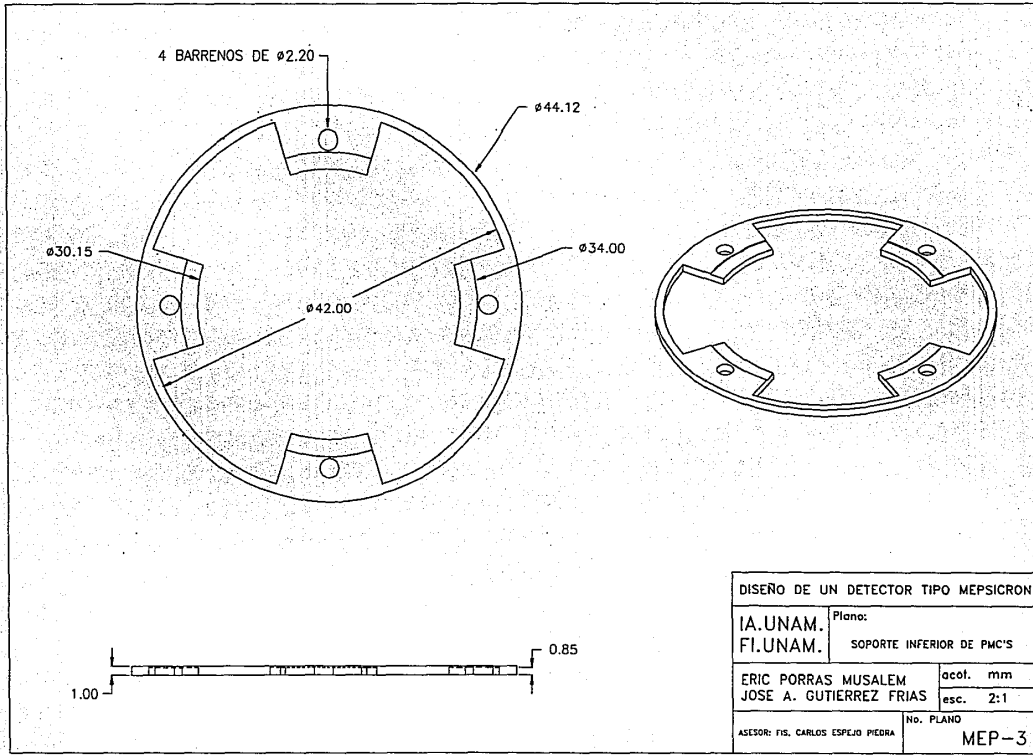
ASESOR: FIS. CARLOS ESPEJO PIEDRA

No. PLANO

MEP-1



DISEÑO DE UN DETECTOR TIPO MEPSICRON	
IA.UNAM. FI.UNAM.	Plano: SOPORTE SUPERIOR DE PMC'S
ERIC PORRAS MUSALEM JOSE A. GUTIERREZ FRIAS	acot. mm esc. 2:1
ASESOR: FIS. CARLOS ESPEJO PIEDRA	No. PLANO MEP-2



DISEÑO DE UN DETECTOR TIPO MEPSICRON

IA.UNAM.  
FI.UNAM.

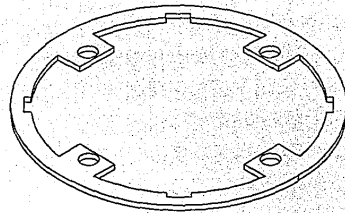
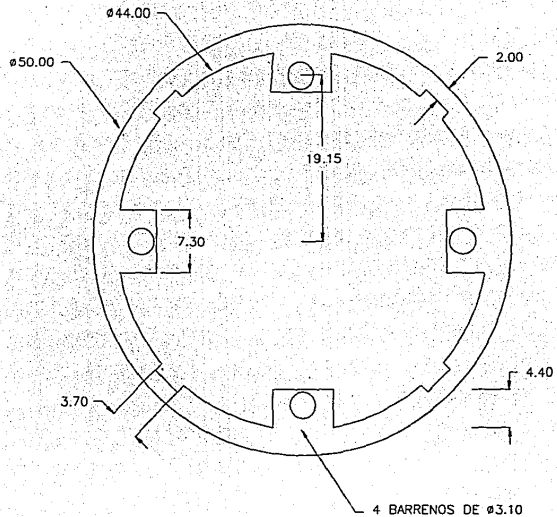
Plano:  
SOPORTE INFERIOR DE PMC'S

ERIC PORRAS MUSALEM  
JOSE A. GUTIERREZ FRIAS

acol. mm  
esc. 2:1

ASESOR: FIS. CARLOS ESPEJO PIEDRA

No. PLANO  
MEP-3

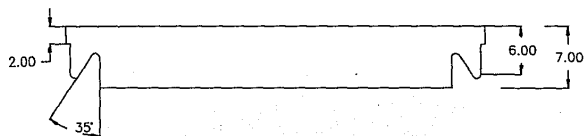
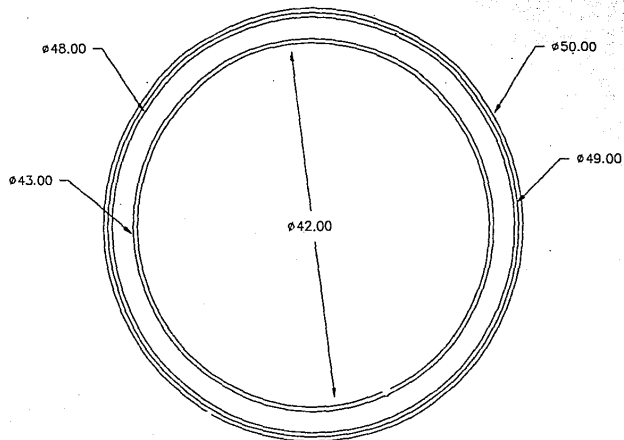


DISEÑO DE UN DETECTOR TIPO MEPSICRON

IA.UNAM. Plano:  
 FI.UNAM. SOPORTE DEL ANODO RESISTIVO

ERIC PORRAS MUSALEM acot. mm  
 JOSE A. GUTIERREZ FRIAS esc. 2:1

ASESOR: FIS. CARLOS ESPEJO PIEDRA No. PLANO  
 MEP-4



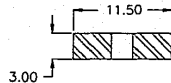
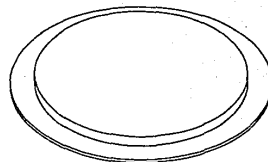
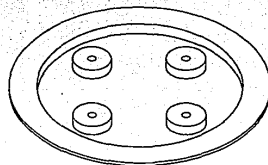
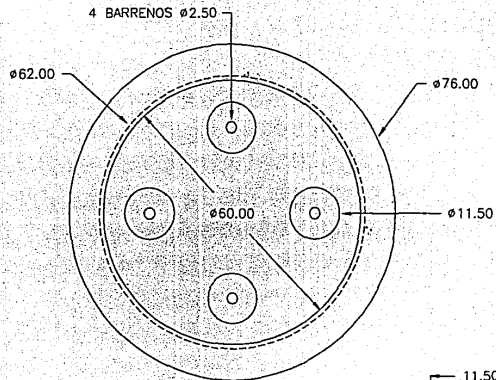
DISEÑO DE UN DETECTOR TIPO MEPSICRON

IA.UNAM. Plano:  
 FI.UNAM. VENTANA DE CUARZO

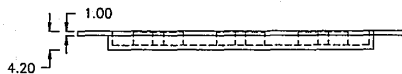
ERIC PORRAS MUSALEM acol. mm  
 JOSE A. GUTIERREZ FRIAS esc. 2:1

ASESOR: FIS. CARLOS ESPEJO PIEDRA No. PLANO  
 MEP-5





DETALLE "A" (esc. 2:1)



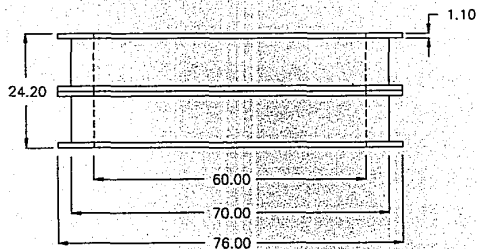
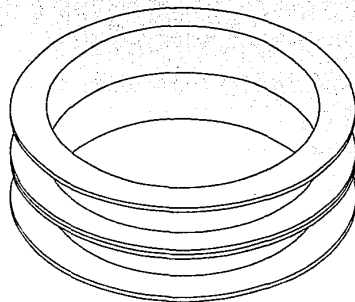
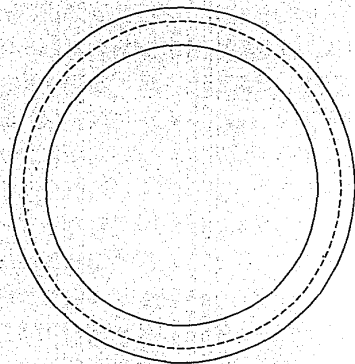
DISEÑO DE UN DETECTOR TIPO MEPSICRON

IA.UNAM. Flano:  
FI.UNAM. BASE DEL CONTENEDOR

ERIC PORRAS MUSALEM acot. mm  
JOSE A. GUTIERREZ FRIAS esc. 1:1

ASESOR: FIS. CARLOS ESPEJO PIEDRA No. PLANO

MEP-6



DISEÑO DE UN DETECTOR TIPO MEPSICRON

IA.UNAM.  
FI.UNAM.

Plano:

PARED CILINDRICA DEL CONTENEDOR

ERIC PORRAS MUSALEM  
JOSE A. GUTIERREZ FRIAS

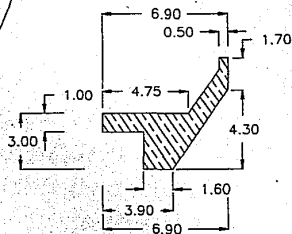
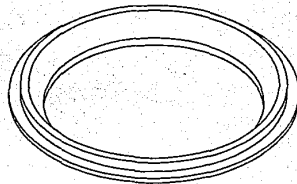
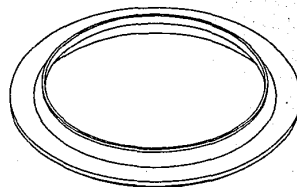
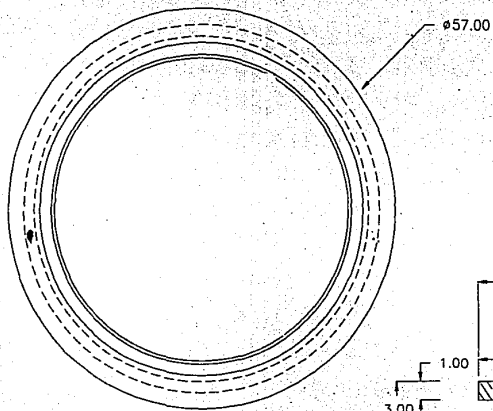
acol. mm

esc. 1:1

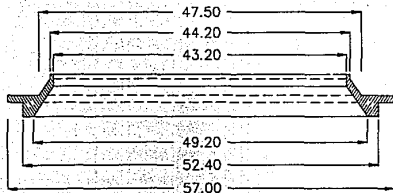
ASESOR: FIS. CARLOS ESPEJO PIEDRA

No. PLANO

MEP-7



DETALLE "A" (esc. 4:1)



DISEÑO DE UN DETECTOR TIPO MEPSICRON

IA.UNAM.  
FI.UNAM.

Plano:

PIEZA DE COBRE INTERIOR

ERIC PORRAS MUSALEM  
JOSE A. GUTIERREZ FRIAS

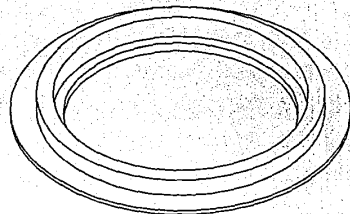
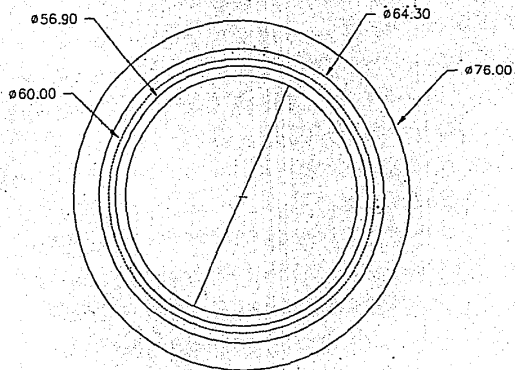
acol. mm

esc. 3:2

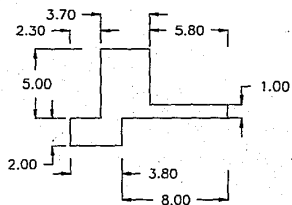
ASESOR: FIS. CARLOS ESPEJO PIEDRA

No. PLANO

MEP-8



DETALLE "A" (esc. 3:1)



DISEÑO DE UN DETECTOR TIPO MEPSICRON

IA.UNAM. Plano:  
 FI.UNAM. PIEZA DE COBRE EXTERIOR

ERIC PORRAS MUSALEM acot. mm  
 JOSE A. GUTIERREZ FRIAS esc. 2:1

ASESOR: FIS. CARLOS ESPEJO PIEDRA No. PLANO  
 MEP-9

#### II.2.4. Descripción de los Procesos de Soldadura del Ensamble.

En el proceso de ensamblado del detector MEPSICRON, se tienen que hacer tres tipos de uniones por medio de soldadura, los cuales son:

- a. La unión de las dos piezas de acero inoxidable que conforman la pared cilíndrica del contenedor (incluidos los traspasadores), así como la base del mismo (también de acero inoxidable).
- b. La unión de la parte superior del contenedor con la pieza exterior de cobre.
- c. Por último, la unión de las dos piezas de cobre (exterior e interior) y la ventana de cuarzo (previamente metalizada).

La descripción que se hace en esta sección está enfocada a la selección de los procesos de soldadura más viables para efectuar los tipos de uniones citados anteriormente. Para ello, es necesario establecer las ventajas y desventajas de cada proceso con el fin de llegar a la elección más adecuada.

La razón para emplear un proceso determinado de soldadura obedece al siguiente principio: ningún proceso de unión, excepto la soldadura, cumple satisfactoriamente con el nivel de hermeticidad requerido para el contenedor del detector.

En el apéndice B se describe la teoría general de soldadura, donde se explican los principios de los diversos procesos de soldadura, con el fin de sustentar los procesos utilizados para la construcción del detector. Cabe mencionar que la utilización de los procesos de soldadura descritos está respaldada por una serie de experimentos, los cuales fueron realizados en los talleres y laboratorios del Instituto de Astronomía.

Debido a la diferencia existente entre los tres tipos de uniones a realizar es conveniente describir cada proceso por separado, aunque en forma general, las uniones deberán cumplir con los siguientes requerimientos:

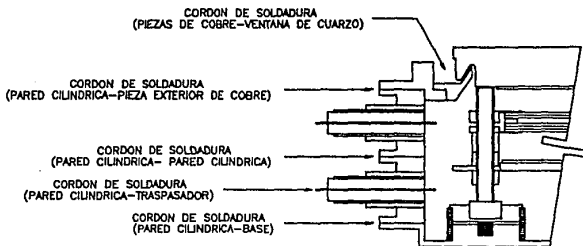
- a. Las tres uniones deben tener un alto grado de hermeticidad, esto es, no deben presentar fugas al interior del contenedor, debido a que la presión interna es del orden de  $1 \times 10^{-10}$  mbars. Cualquier fuga a una presión mayor provocaría la destrucción del fotocátodo. La película que conforma al fotocátodo debe ser creada a altos niveles de vacío.
- b. Las tres uniones no estarán sometidas a grandes esfuerzos, por lo que no es de primordial importancia lograr una soldadura con excelentes propiedades mecánicas, aunque no se debe descuidar del todo este aspecto, especialmente si se realizara alguna unión con procesos de soldadura con latón, dura o blanda.
- c. Debido a que la zona destinada para efectuar la unión en los tres tipos de soldadura es demasiado estrecha, los cordones de soldadura, y en especial, el que se llevará acabo entre las

piezas de acero inoxidable, deben ser lo más angosto y lo más profundo posible, sin afectar la calidad de la soldadura.

d. Para la unión de las piezas de la pared cilíndrica con la base y con la pieza exterior de cobre, el espacio destinado para los cordones es tan angosto que sería casi imposible maquinarse alguna muesca, por lo que se deberá emplear cordones de tipo bordo.

e. En las tres uniones debe tenerse excelente control de la temperatura y localización del calor introducido, para que la zona afectada por el calor sea lo más reducida posible (ver fig. II.2).

Fig. II.2.



#### *Soldadura del Contenedor y Pieza de la Base.*

La primera unión que se describe es la que se efectuará entre las dos piezas de acero inoxidable que forman la pared cilíndrica y su unión con la base (también de acero inoxidable), para lo cual se pueden emplear varios procesos de soldadura con resultados satisfactorios. Uno de los factores determinantes para la elección del proceso a emplear es el equipo disponible en los talleres del Instituto. En base a esto, se tienen los siguientes procesos susceptibles de ser utilizados para efectuar la unión:

1. proceso para soldadura por arco eléctrico TIG,
2. proceso para soldadura por arco eléctrico MIG,
3. proceso para soldadura oxiacetilénica,

4. proceso para soldadura por resistencia eléctrica a base de puntos y.
5. proceso en hornos de resistencias para soldadura con latón, dura y blanda.

A continuación se hace una descripción de cada uno de los procesos para evaluar la factibilidad en el uso de cualquiera de ellos para realizar la unión en cuestión.

El acero inoxidable en términos generales es fácilmente soldable por cualquiera de los cinco métodos enunciados. Debido a que para la unión el cordón debe efectuarse en la periferia de las dos piezas que forman el contenedor, el uso de los procesos de soldadura con latón, dura o blanda queda imposibilitado, ya que sería muy difícil depositar el metal fundido en un borde periférico, además, en un caso hipotético, debido a lo angosto del cordón, la unión sería demasiado frágil y quizá no se lograría la hermeticidad requerida.

El empleo de algún método de soldadura por resistencia eléctrica es también descartado, debido a la geometría cilíndrica de las piezas y al requerimiento enunciado en el inciso (c). El borde destinado para efectuar la soldadura es demasiado pequeño, de manera que no permite que los electrodos presionen correctamente las piezas a soldar. Los procesos de soldadura por resistencia eléctrica encuentran su mayor aplicación en la unión de placas.

Un tercer proceso posible para soldar las piezas de acero inoxidable es mediante soldadura con gas. La soldadura oxiacetilénica ofrece ventajas sobre los procesos descritos anteriormente. Debido a que su aplicación en los talleres es manual, la calidad de la unión dependerá en gran medida de la habilidad del soldador. Sin embargo, en este proceso se tiene un control deficiente en cuanto a temperatura y localización del calor introducido, pudiendo causar daños severos a los traspasadores del detector, además de que la utilización de algún fundente dificulta la limpieza posterior debido a la geometría circular de la pieza.

La soldadura por arco eléctrico MIG constituye un buen proceso para soldar acero inoxidable. Este proceso es ideal para soldar placas delgadas hasta de 1/4 pulgadas de espesor. El calor para soldar se genera mediante un arco eléctrico que se forma entre la pieza de trabajo y el electrodo, el cual también se utiliza como material de aporte. Tanto el metal fundido como el electrodo son protegidos de la contaminación ambiental por medio de la inyección de un gas inerte. Este proceso tiene la ventaja de no formar escoria como en el caso de otros procesos. La formación de escoria puede ser la causante de defectos en la soldadura, lo cual pudiera traducirse en fugas. Otra ventaja es que los cordones obtenidos pueden ser menores a 1/16 pulg. (1.59 mm), para lo cual se dispone de una gran diversidad de diámetro de electrodos.

Para soldar acero inoxidable se recomienda usar como gas protector argón, argón más 1 ó 2% de oxígeno o bióxido de carbono. El argón puede ser usado para soldar cualquier metal, dicho gas tiene un menor potencial de ionización que otros gases (helio, por ejemplo), lo cual se traduce en un arco eléctrico de menor intensidad que el obtenido por otros procesos, pero esta característica le da al argón ventaja sobre otros gases para ser usado en la unión de placas delgadas.

Otro método disponible para soldar las piezas de acero inoxidable es mediante el proceso de soldadura por arco eléctrico TIG. En este proceso, el arco es formado por un electrodo no consumible de tungsteno y la pieza de trabajo. Al igual que el proceso MIG, el electrodo y la zona del metal fundido son protegidas del gas atmosférico por un flujo de gas inerte. La soldadura TIG es recomendable para placas delgadas de hasta 0.005 pulgadas de espesor. La soldadura obtenida mediante el proceso TIG es de gran calidad y de gran diversidad ya que con ella se pueden soldar casi todos los metales incluyendo al acero inoxidable, aunque está restringida a pequeños espesores. Para soldar acero inoxidable se pueden usar como gas protector helio o argón y es recomendable usar electrodos de tungsteno toriados.

A continuación se describe un ejemplo práctico en el uso de soldadura MIG o TIG, en base al cual se sustenta el empleo de alguno de estos procesos para su utilización en la unión de las piezas de acero inoxidable.

Al recavar información acerca de soldaduras entre piezas de acero inoxidable sometidas a un riguroso control antifuga, se encontró un ejemplo en el Metals Handbook editado por la American Society for Metals, el cual trata este tópico<sup>1</sup>. El ejemplo muestra las dificultades que se tenían para soldar las cubiertas de compresores usados para instalaciones de aire acondicionado. El problema principal que se tenía eran las constantes fugas de freón a través de la unión. El proceso de soldadura inicialmente empleado era el MIG, usando como gas protector 98% de argón y 2% de oxígeno. Con este proceso se tenía una eficiencia del 93%, por lo que el 7% restante significaban fugas, las normas de calidad de la empresa aceptaban solamente un 3% de compresores con fuga. Las fugas eran causadas por la formación de porosidades y por fusión incompleta. El problema fue corregido después de un estudio con otros procesos de soldadura al cambiar únicamente el gas protector utilizado. Se logró un error de solamente el 2% al emplear bióxido de carbono.

Este ejemplo es muy significativo en cuanto al objetivo de hermeticidad que se requiere en nuestra unión, por lo que es conveniente, hacer el mayor número de experimentos probando diferentes métodos de soldadura, gases protectores y electrodos. El ejemplo anterior no es una receta a seguir, sin embargo indica que es muy factible que al usar los procesos MIG o TIG se logre la calidad deseada en la unión.

Tanto el proceso TIG como el MIG son muy usados para unir acero inoxidable, de manera que dependerá de la habilidad del soldador para determinar que proceso será empleado. En el Instituto se han desarrollado soldaduras de piezas de acero inoxidable con éxito mediante el proceso de soldadura por arco eléctrico TIG, sin el empleo de material de aporte. Las soldaduras se han probado contra posibles fugas en una cámara de vacío, obteniéndose muy buenos resultados en la mayoría de los casos, estos es, no existen fugas a los niveles de vacío requeridos. La prueba antifuga se describe a continuación:

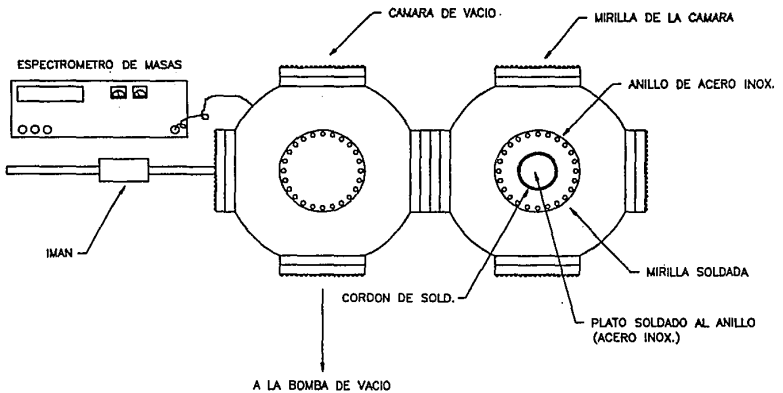
Una de las mirillas de la cámara de vacío es sustituida por otra, la cual está constituida por dos piezas soldadas (ambas de acero inoxidable); un anillo exterior, el cual se sujeta al cuerpo de la cámara y un plato de forma circular, cuyo diámetro es igual al diámetro interior del anillo. La

1. Ver ejemplo No. 79 pág. 86, Metals Handbook, 8va. edición, volumen VI: "Welding and Brazing".



prueba comienza al accionar la bomba de vacío y mediante un espectrómetro de masas se mide constantemente la presión dentro de la cámara. Dicho instrumento mide la presión total y las presiones parciales de los gases residuales dentro de la cámara entre 0 y 64  $\mu\text{m}^2$ , por lo que dependiendo de las intensidades relativas y de los espectros de masa para un sistema sin fugas, se puede comparar si el sistema experimental tiene o no fugas (ver figura II.3.). La prueba finaliza al llegar al nivel de vacío deseado, lo cual indica la ausencia de fugas, o bien al presentarse alguna fuga en la soldadura.

Fig. II.3.



#### *Soldadura del Contenedor y la Pieza Exterior de Cobre.*

La segunda unión a analizar es la que se efectuará entre el contenedor y la pieza exterior de cobre. Esta unión por el hecho de ser entre materiales disimilares, representa un problema extra. El cordón de soldadura debe ser muy semejante al cordón que unirá las piezas integrantes del contenedor, por lo que también quedan descartados los procesos de soldadura dura, por latón, blanda, por resistencia eléctrica y por gas. Este tipo de unión debido a la poca información teórica obtenida se tratará básicamente en experimentar constantemente hasta lograr los resultados

deseados. Como información se obtuvieron dos ejemplos descritos en el *Metals Handbook* que usan los procesos de soldadura por arco eléctrico TIG para soldar materiales disimilares<sup>2</sup>. A continuación se describe uno de los dos ejemplos.

El ejemplo expone la unión formada entre dos bases de latón que son soldadas a los lados mediante dos barras de acero 1018. Esta pieza es usada como un martinete deslizante. Originalmente esta unión se hacía con el proceso de arco eléctrico sin uso de gas protector y se empleaba un electrodo de bronce aleado con fósforo. Este procedimiento era inconveniente ya que las barras se deformaban por el calor y además que se perdía mucho tiempo para remover la escoria formada. La soldadura fue mejorada al cambiar el proceso antes utilizado por el proceso TIG usando argón como gas protector y como material de aporte bronce aleado con fósforo. Este proceso eliminó la distorsión del metal y la necesidad de remoción de escoria.

Mediante el proceso de soldadura con arco eléctrico TIG es posible soldar metales disimilares tales como: acero con bajo contenido de carbono con acero inoxidable, acero con bajo contenido de carbono con aleaciones de cobre y, acero inoxidable con aleaciones de cobre.

Para la unión de metales disimilares es conveniente el uso de material de aporte, pero se debe tener mucho cuidado en la selección de este, ya que depende del material de aporte en gran parte la calidad de la unión lograda.

Es posible lograr la soldadura del contenedor de acero inoxidable y la pieza de cobre con un alto grado de eficiencia, actualmente esta unión es la que ha representado mayor dificultad, ya que es donde se ha mostrado un mayor índice de fugas y solo se ha tenido éxito en casos aislados. El proceso que se ha empleado es el TIG sin usar material de aporte y con electrodo de tungsteno toriado.

Se han realizado varias pruebas antifuga para soldaduras de este tipo. Dichas pruebas son muy similares a las desarrolladas para examinar la soldadura entre dos piezas de acero inoxidable, teniendo como única diferencia el material usado para el plato circular, que en este caso es de cobre, el cual está soldado al anillo de acero inoxidable. Se acciona la bomba y la soldadura entre los dos materiales disimilares es probada ( ver fig II.4.).

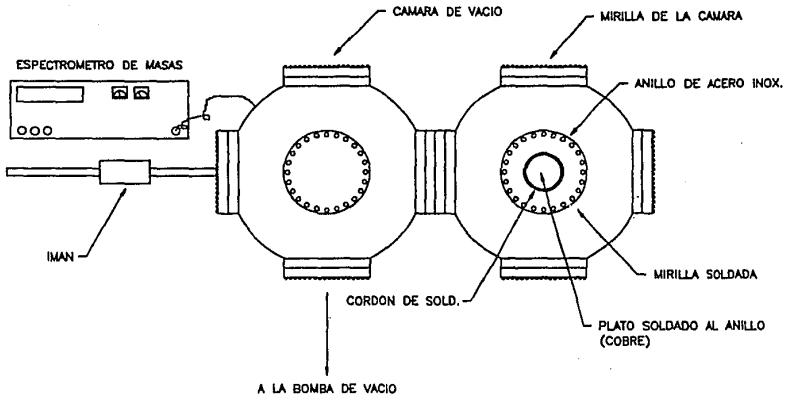
#### *Soldadura de las Piezas de Cobre y el Cuarzo.*

El tercer tipo de soldadura a efectuarse será entre las piezas de cobre y la ventana de cuarzo. Esta unión se lleva a cabo dentro de la cámara de vacío y por ser el paso final del proceso de ensamble del detector es la que presenta mayor dificultad y debe ser con la que se tenga mayor cuidado. Debido a que todos los componentes del detector estarán situados en sus respectivos sitios y algunos de los cuales son susceptibles a cambios bruscos en la temperatura (como es el caso de las placas microcanales, el paquete de poliamida y sobre todo el fotocátodo), la unión debe realizarse a la menor temperatura posible para no dañar alguno de los componentes del detector.

---

2. Ver ejemplos 134 y 135, págs. 133 y 134, *Metals Handbook*, 8va. edición, volumen VI: "Welding and Brazing".

Fig. II.4.



El proceso de soldadura más conveniente a emplear, según lo citado anteriormente, es algún proceso de soldadura blanda. En el diseño geométrico de las piezas de cobre se contempla esto, ya que en la zona de unión de ambas piezas se cuenta con una muesca que es en donde se depositará el metal fundido. En dicha muesca embonará también el filete del cuarzo, de modo que al depositar el metal fundido se suelden las piezas de cobre y el cuarzo.

El metal de relleno que se está utilizando actualmente en el Instituto es una aleación de estaño, bismuto e indio, esta aleación tiene una temperatura de fusión de aproximadamente  $63^{\circ}\text{C}$ .

Como ya fue explicado en el capítulo I, el cuarzo tiene que ser metalizado en la zona del filete, dicha metalización constituye la ligadura entre el cuarzo y la soldadura de baja punto de fusión, y éstos a su vez con las piezas de cobre. La metalización del cuarzo puede hacerse de varias formas:

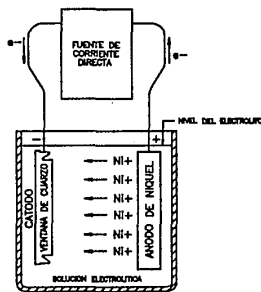
1. Por medio de la evaporación de algún metal, en la cual los vapores son dirigidos mediante mamparas hacia el filete perimetral, adhiriéndose y solidificándose en esta zona.

2. La metalización también se puede lograr al aplicar una pasta metálica en la zona del filete del cuarzo mediante un pincel. Posteriormente el cuarzo es introducido a un horno de resistencias, calentándolo a  $600^{\circ}\text{C}$  aproximadamente por un lapso de quince minutos.
3. Sputtering. Este proceso consiste en la deposición de partículas de metal sobre el sustrato de cuarzo. Dichas partículas se desprenden de un cátodo al hacer incidir sobre éste moléculas ionizadas de gas argón, dentro de una cámara de vacío.

El método utilizado fue el segundo, ya que es mucho más sencillo que los otros dos. Se ha intentado metalizar el cuarzo con pastas de plata, oro y platino sin obtener buenos resultados, ya que en todos los casos, a pesar de lograr la unión, se han tenido fugas. Una de las principales razones por las cuales se presentaron las fugas, es la formación de porosidades al solidificar la pasta. En el caso de la metalización con plata, se tuvieron problemas de oxidación.

Debido a lo anterior, se decidió cambiar la composición de la pasta por una aleación de molibdeno-manganeso, la cual después de ser aplicada y horneada, se le agrega por electrólisis una capa de níquel (ver fig II.5.). El proceso de metalizado es complementado al adherir a la capa de níquel una película de indio.

Fig II.5.

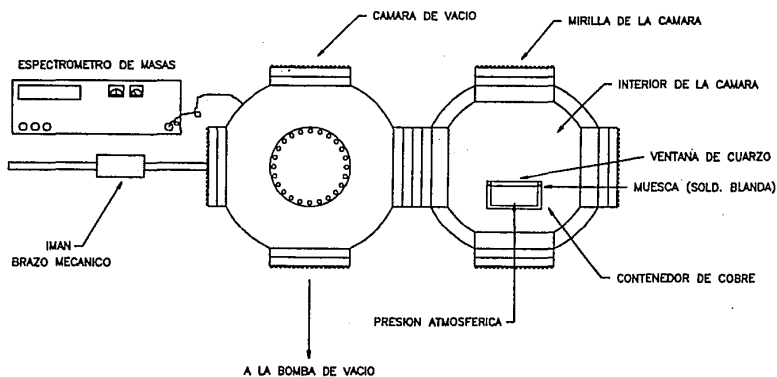


La experimento para probar la soldadura entre el cobre y el cuarzo se explica a continuación.

El cuarzo es metalizado por medio de alguno de los tres métodos descritos anteriormente. Se cuenta con un contenedor de cobre, que simula al contenedor del detector, y se la agrega la soldadura de bajo punto de fusión en estado líquido en la muesca maquinada en la parte superior del contenedor. Una vez que se distribuye perfectamente la soldadura sobre toda la muesca, se coloca el cuarzo de modo que el filete sea mojado por el metal fundido. Al solidificarse, las piezas soldadas son introducidas a la cámara de vacío. Cabe señalar que la unión entre el contenedor de cobre y el cuarzo es lo más parecida posible a la que se efectuará entre el cuarzo y el contenedor del detector MEPSICRON, lo cual se hace con el fin de simular lo mejor posible el caso real.

Al igual que en los experimentos para los dos tipos de soldadura descritos anteriormente, se acciona la bomba de vacío. Como el contenedor y el cuarzo han sido soldados a presión ambiente, la presión existente dentro del contenedor será también la atmosférica. Al generarse vacío en la cámara, y en el caso de existir alguna fuga en la soldadura, el gas atrapado en el contenedor escapará a través de éste hacia la cámara. Lo anterior puede ser detectado fácilmente mediante un espectrómetro de masas, mediante el cual se conoce de manera inmediata si la soldadura presenta o no fugas (ver fig. II.6.).

Fig. II.6.



*Soldaduras en el Proceso de Ensamblado.*

Para el ensamblado, las soldaduras se efectuarán de acuerdo al siguiente criterio:

La soldadura en la que se genere mayor temperatura será la primera en efectuarse, y así sucesivamente hasta llegar a aquella unión que se realice a menor temperatura. Lo anterior evita que componentes del detector, o bien las mismas soldaduras de baja temperatura puedan ser dañados al elevar drásticamente la temperatura.

La soldadura de las piezas que conforman al contenedor (incluyendo los traspasadores) y la base será la primera en realizarse, ya que es la unión en la que se generará la mayor temperatura. El proceso de unión del contenedor se realiza paralelamente al ensamblado de la estructura interna (ver sección IV.2., cap. IV.), por lo que no existe contacto alguno entre ambas partes, evitando así posibles daños.

La segunda unión a realizar en el proceso de ensamblado es la del contenedor y la pieza exterior de cobre. En dicha unión tampoco se tiene contacto con la estructura interna.

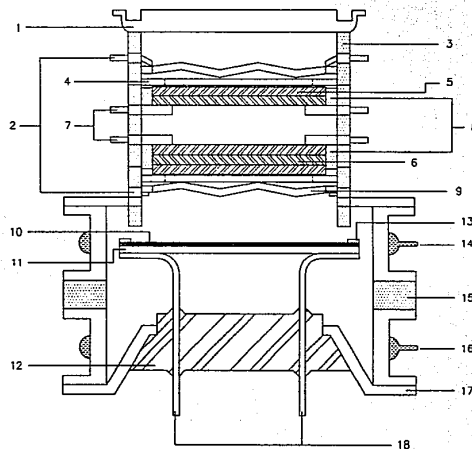
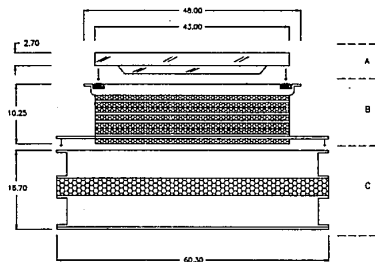
Por último, se debe realizar la unión entre la pieza exterior de cobre con la pieza interior y el cuarzo. Cabe mencionar que la pieza interior de cobre ha sido previamente sujeta a la exterior mediante tornillos, esto es con el fin de evitar algún movimiento de la pieza interior que provoque la introducción del metal fundido hacia el interior del detector, o bien que evite el sellado. Como ya se explicó esta unión por ser el cierre del detector se llevará a cabo a un alto vacío y deberá ser hermética a una presión del orden de  $1 \times 10^{-10}$  mbars.

**II.3. DISEÑO DEL TUBO ITT****II.3.1. Descripción del Diseño.***Introducción.*

El detector de ITT (tubo ITT), al igual que el MEPSICRON, es un detector de imagen bidimensional, el cual está constituido por un fotocátodo, dos arreglos de placas microcanales (configuraciones V y Z) y un ánodo resistivo. El tubo ITT está diseñado en base a una estructura compacta, dentro de la cual se encuentran dispuestos los elementos anteriormente mencionados, de manera similar que en el detector MEPSICRON (ver plano ITT-1).

Los parámetros de operación del tubo ITT son los mismos que los explicados en el capítulo I para el detector MEPSICRON, por lo que la diferencia entre ambos detectores está relacionada solamente con la estructura de soporte interna y externa, así como con otras características físicas que serán tratadas en este capítulo.

Nº. PIEZA	DESCRIPCION
1	PIEZA DE COBRE (UNION CON LA VENTANA DE CUARZO)
2	ANILLOS METALICOS: SOPORTE Y CONEXIONES ELECTRICAS DE PMC'S
3	ANILLOS DE CERAMICA: SOPORTE Y AISLANTES
4	ANILLO METALICO PLANO: CONTACTO ELECTRICO Y SUJECION DE PMC'S
5	PLACAS MICROCANALES: ARREGLO "Y"
6	PLACAS MICROCANALES: ARREGLO "Z"
7	PIEZAS CIRCULARES DEL SOPORTE DE LAS PMC'S
8	PIEZA CUADRADA DE CERAMICA: CENTRADO DE PMC'S
9	RESORTE METALICO INTERNO: CONEXION Y SUJECION DE PMC'S
10	ANODO RESISTIVO
11	PLACA DE POLIAMIDA: SUSTRATO DEL ANODO RESISTIVO
12	PIEZA DE VIDRIO: SOPORTE Y TRASPASADORES DEL ANODO RESISTIVO
13	CONEXION ELECTRICA DEL ANODO RESISTIVO
14	CONTACTO ELECTRICO INFERIOR DE PMC'S (ARREGLO "Z")
15	ANILLO DE CERAMICA: SOPORTE Y AISLANTE
16	CONTACTO ELECTRICO: TIERRA FISICA DEL SISTEMA
17	PIEZA METALICA CILINDRICA: SOPORTE DE LA PIEZA DE VIDRIO
18	TRASPASADORES METALICOS: SOPORTE Y CONEXIONES DEL ANODO RESISTIVO



TUBO DE ITT	
A	VENTANA DE CUARZO: FOTOCATODO
B	CILINDRO SUPERIOR: PLACAS MICROCANALES
C	CILINDRO INFERIOR: ANODO RESISTIVO

DISEÑO DE UN DETECTOR TIPO MEPSICRON

IA.UNAM. Plano:  
FI.UNAM. DETECTOR BIDIMENSIONAL ITT

ERIC PORRAS MUSALEM acol. mm  
JOSE A. GUTIERREZ FRIAS esc. 1:1

ASESOR: FIS. CARLOS ESPEJO PIEDRA No. PLANO  
ITT-1

A continuación se explica el diseño del soporte, conexiones eléctricas, aislamientos y sellos de las diferentes partes que componen al tubo ITT así como las diferencias principales de este diseño con respecto al detector MEPSICRON.

#### *Placas Microcanales y Fotocátodo.*

El detector de ITT utiliza para la etapa de multiplicación de electrones dos series de placas microcanales, las cuales, como ya se mencionó, consisten en una configuración V seguida de una configuración Z.

Para soportar los dos arreglos de placas microcanales (V y Z), se utilizan dos placas metálicas delgadas con geometría circular, las cuales cuentan con tres pestañas internas para la sujeción de las PMC's. Estas placas, a diferencia de las piezas utilizadas para el soporte de las PMC's en el MEPSICRON, son completamente planas (sin escalonamientos) y de un espesor mucho más pequeño.

Cada arreglo de PMC's queda soportado entre una de estas placas metálicas y un anillo metálico, el cual, además de fijar a las placas, constituye el contacto eléctrico de las mismas. Tanto las placas metálicas como los anillos metálicos se intercalan o colocan entre anillos de cerámica, por medio de los cuales se logra aislar eléctricamente a los dos arreglos de PMC's. Dichos anillos de cerámica constituyen también el soporte mecánico de toda la estructura.

Tanto las placas y anillos metálicos como los anillos de cerámica tienen el mismo diámetro exterior e interior, por lo que al quedar unidos, forman un cilindro el cual constituye el encapsulado de la estructura interna del detector (PMC's y fotocátodo).

En la parte superior de esta estructura cilíndrica, se tiene una pieza de cobre (similar que en la estructura del MEPSICRON), soldada a un anillo de cerámica, sobre la cual se suelda el cuarzo, el cual contiene depositado en su cara interna al fotocátodo.

La pieza de cobre cuenta con una canaleta a lo largo de su periferia, en el interior de la cual se deposita un cordón de soldadura de bajo punto de fusión, por medio de la cual se sella el vidrio a toda la estructura.

De la misma forma que en el MEPSICRON, el vidrio se somete previamente a un proceso de metalización a lo largo de su periferia. La superficie metalizada entra en contacto con la soldadura, para lograr el sello dentro de la cámara de vacío.

En este punto tenemos la primera diferencia importante con respecto al diseño del detector MEPSICRON. En el tubo ITT, el sello del cuarzo a la pieza de cobre, se hace por medio de una superficie completamente plana en el vidrio, con una metalización de aproximadamente 2 mm de espesor. Debido a esta característica, es posible que al momento de soldar el vidrio, algunas zonas no queden perfectamente selladas, y por lo tanto, se tiene la posibilidad de que existan fugas hacia el interior del detector.



La dificultad de lograr un sello perfecto a lo largo de toda la periferia del vidrio, radica por lo tanto en dos factores:

1. La superficie de contacto entre el vidrio y la soldadura es escasa, y
2. Debido a que se tiene una superficie de contacto en el vidrio completamente plana, al momento de colocarlo sobre la pieza de cobre, existe la posibilidad de que ambas piezas queden descentradas y por lo tanto el sello no sea perfecto.

En el caso del MEPSICRON, se diseñó un perfil triangular para la zona de contacto del vidrio con la soldadura, por lo que la superficie de contacto aumenta considerablemente. Como ventaja adicional, el perfil triangular del vidrio permite, al momento de colocarlo sobre la pieza de cobre, centrar ambas piezas con relativa facilidad. Por estas razones, la posibilidad de lograr un sello perfecto en el detector MEPSICRON aumenta considerablemente con respecto al tubo ITT.

#### *Conexiones Eléctricas.*

Las conexiones eléctricas en el tubo ITT, al igual que en el MEPSICRON, son necesarias para proveer al fotocátodo, a las placas microcanales y al ánodo resistivo de los potenciales requeridos para su funcionamiento.

En el caso de las placas microcanales, las conexiones eléctricas se realizan por medio de los anillos metálicos utilizados para el soporte de las mismas, los cuales, como ya se explicó, quedan intercalados entre anillos de cerámica. Cada uno de estos anillos (uno para cada arreglo de PMC's), presenta 3 pestañas internas por medio de las cuales se realiza el contacto eléctrico.

El contacto eléctrico del arreglo V, se realiza por medio de la placa circular que lo soporta (contacto inferior) y por medio de uno de los anillos descritos anteriormente (contacto superior). Para asegurar el contacto eléctrico superior se utilizan dos plaquitas circulares delgadas, las cuales se colocan una vez armada toda la estructura cilíndrica que contiene a las PMC's, por lo que dichas piezas son internas a la estructura. La forma de lograr la conexión eléctrica del arreglo V se explica a continuación.

Una vez montadas las PMC's en la pieza soporte, las pestañas internas del anillo metálico quedan por encima del arreglo. Para efectuar el contacto se introduce una de las dos piezas delgadas, la cual está constituida por un anillo metálico cuyo diámetro es ligeramente mayor que el de las PMC's.

Posteriormente se coloca la siguiente pieza delgada, constituida por un anillo metálico oblicuo, tipo resorte. Este resorte cuenta con tres muescas colocadas en el exterior de su periferia. De esta forma y haciendo coincidir las muescas con las pestañas del anillo metálico, se puede colocar dicha pieza sobre el arreglo anterior. Una vez colocado el resorte, se gira 90° de manera que presione a todo el conjunto mientras toca las tres pestañas interiores del contacto eléctrico.

Para realizar el contacto eléctrico del arreglo Z, el procedimiento a seguir es el mismo que el descrito para el arreglo V, sólo que en este caso el anillo metálico del contacto eléctrico, es decir, las tres pestañas internas, quedan por debajo de las PMC's, constituyendo el contacto eléctrico inferior de dichas placas. El contacto eléctrico superior del arreglo Z se realiza por medio de la pieza cilíndrica que lo soporta.

En base a lo anterior se observa que el contacto eléctrico de las PMC's es inestable y con altas probabilidades de fallo. Esto se debe principalmente a que las pestañas internas son de un espesor pequeño, y el conjunto anillo-resorte que presiona las placas contra estas pestañas no está completamente fijo a la estructura.

El contacto eléctrico para establecer el potencial entre el fotocátodo y la primer placa microcanal, se lleva a cabo por medio de un cordón metálico depositado sobre la superficie del cuarzo, el cual toca toda la periferia de la pieza de cobre sobre la cual se encuentra colocado. El contacto se establece a través de la pieza de cobre.

Para las conexiones eléctricas del ánodo resistivo, se utilizan 4 traspasadores de kovar, los cuales atraviesan el vidrio que se encuentra colocado en la parte inferior de la estructura. Estos cuatro traspasadores tienen además la función de soportar la placa que contiene al ánodo resistivo.

La tierra de todo el sistema se establece en la última pieza cilíndrica de la estructura externa del tubo ITT.

#### *Encapsulado del Tubo ITT.*

La estructura de anillos metálicos intercalados con anillos de cerámica, además de constituir el soporte y aislamiento eléctrico de las PMC's, forma parte del encapsulado que aísla la parte interna del detector con el medio exterior.

En el diseño del detector MEPSICRON se tiene una estructura modular, en donde el encapsulado y la parte interna (PMC's, soporte y aislamiento) constituyen entidades separadas.

En el caso del diseño de ITT, la estructura compacta hace difícil cualquier modificación u operación que se requiera hacer en el interior del detector, debido a que las piezas que soportan a la estructura interna (PMC's) se encuentran soldadas entre sí (recordemos que en el MEPSICRON estas piezas están constituidas por los tornillos de cerámica), y por lo tanto si se necesita remover o volver a configurar las PMC's, es necesario romper todas las uniones de soldadura y posteriormente volver a armar y sellar toda la estructura. Este proceso se explica a continuación.

El ensamble de la estructura que soporta y aísla a las PMC's, es decir, la unión de todos los anillos de cerámica con los anillos y placas metálicas, es un proceso complicado debido a las múltiples etapas de sellado entre cada una de estas partes.

Cada unión corresponde a un proceso de soldadura en el cual se deposita el cordón de soldadura a lo largo del anillo de cerámica, se coloca encima el correspondiente anillo o placa

metálica y se someten ambas piezas a un proceso de horneado a 400°C durante 40 min. aproximadamente.

El proceso completo de ensamble de esta estructura, consta de 15 etapas de unión utilizando el proceso descrito con anterioridad, en las cuales se sueldan un total de 8 anillos de cerámica con sus correspondientes 8 piezas metálicas circulares (placas o anillos).

#### *Anodo Resistivo.*

Vista desde el exterior, la estructura del tubo ITT está formada básicamente por dos cilindros unidos entre sí. El cilindro superior contiene en su interior a las PMC's y al fotocátodo y está constituido por la estructura de anillos descrita anteriormente. El cilindro inferior, de mayor tamaño que el superior, constituye el soporte y aislamiento del ánodo resistivo. Dicho cilindro está formado por dos piezas de kovar de forma cilíndrica y simétricas entre sí. Estas piezas se unen por medio de un anillo de cerámica de igual diámetro, el cual funciona como aislante eléctrico entre el último arreglo de PMC's y la tierra de todo el sistema.

Se utiliza kovar en las piezas cilíndricas debido a que es un material (aleación) cuyo coeficiente de dilatación térmica es prácticamente el mismo que el de la cerámica. Esta característica hace posible la unión entre las piezas metálicas por medio del anillo de cerámica, debido a que al momento de hornear dichas piezas en el proceso de soldadura, la dilatación de cada una de las piezas es la misma y se evita la posibilidad de fractura.

A la pieza cilíndrica inferior de esta estructura, se suelda una pieza de vidrio, por medio de la cual se realiza el soporte mecánico del ánodo resistivo. Este soporte está formado por cuatro traspasadores, los cuales están constituidos por espigas largas y delgadas las cuales atraviesan la superficie del vidrio (estas piezas quedan soldadas al vidrio). Los cuatro traspasadores se sueldan a las esquinas de la placa sobre la cual se encuentra depositado el ánodo resistivo. De esta forma se consigue también establecer las conexiones eléctricas del ánodo resistivo.

Por último, además de los elementos descritos, se tienen cuatro traspasadores adicionales que atraviesan la superficie del vidrio, los cuales contienen en su parte superior (dentro del detector), evaporadores por medio de los cuales se pueden compensar las pérdidas que pudieran tenerse en el material fotoemisor por posibles fugas en el interior del detector.

### **II.3.2. Características en el Diseño de ITT con respecto al Detector MEPSICRON.**

A continuación se hace una comparación entre las características de ambos detectores (tubo ITT y MEPSICRON) con el fin de evaluar las ventajas que se obtienen con el diseño del detector MEPSICRON.

A. La estructura de anillos en el tubo ITT, en la cual se tiene a la vez el soporte, aislamiento y conexiones eléctricas de las PMC's, provee al detector de un diseño compacto en el cual se tiene

un ahorro importante de materiales y se consigue un tamaño del detector cercano al tamaño de las placas microcanales (2.5 cm de diámetro).

**B.** En el tubo ITT, las placas microcanales quedan atrapadas por la estructura que forma el encapsulado del detector. Para poder hacer cualquier modificación en la estructura interna del detector, como reconfiguración de las placas microcanales o reparación de las mismas, se debe romper la unión que existe entre el cuarzo y la pieza de cobre intermedia. De esta forma se pueden alcanzar las placas microcanales del arreglo V. Sin embargo, las placas del arreglo Z permanecen atrapadas y para poder llegar a ellas es necesario romper la unión que existe entre los dos cilindros que conforman el encapsulado del detector. Finalmente, si se desea hacer alguna modificación en la placa del ánodo resistivo se deberá romper la unión que existe entre el vidrio que soporta a esta pieza y la última pieza de kovar de la estructura.

En base a lo anterior, se puede decir que el diseño del tubo ITT es totalmente rígido, debido a la dificultad de desarmar las diferentes partes del mismo. Aún cuando podamos deshacer las uniones y desarmar las placas microcanales y el ánodo resistivo, es prácticamente imposible modificar las distancias y dimensiones entre estas partes, por lo que no es posible tener diferentes configuraciones de la estructura interna del detector.

En el caso del MEPSICRON, el encapsulado del detector está formado por 4 piezas cilíndricas unidas entre sí por un proceso de soldadura TIG, finalmente sellado en su parte superior por el cuarzo.

Si se necesita abrir el MEPSICRON y hacer alguna modificación o reparación a la estructura interna del detector, basta con romper la unión del cuarzo con la pieza de cobre intermedia y sacar del interior del encapsulado la estructura interna compuesta por las placas de acero y los tornillos de cerámica. Dicha ruptura se puede hacer calentando el detector a 70 °C con lo cual se derrite la soldadura de bajo punto de fusión. Toda la estructura interna es perfectamente desarmable, con lo cual se tiene acceso a los dos arreglos de placas microcanales y al ánodo resistivo. Gracias a los tornillos de cerámica es posible configurar el arreglo de la estructura modificando las distancias entre sus diferentes elementos o variando el número de placas microcanales.

**C.** Con respecto a las conexiones eléctricas del tubo ITT, podemos ver que la posibilidad de fallo en los contactos es alta. En el caso del MEPSICRON, los contactos eléctricos se realizan por medio de piezas completamente fijas a toda la estructura, y las zonas de contacto son mayores que en el caso del tubo ITT. En este sentido se reduce en un alto porcentaje la posibilidad de que las conexiones fallen.

**D.** En el interespacio que existe entre los dos arreglos de placas microcanales, es posible que queden atrapadas moléculas de gas al momento de sellar el detector. Esta posibilidad está presente en ambos detectores. En el caso del tubo ITT, no existe ninguna forma en que dichas moléculas de gas puedan salir, debido a que no existe ningún orificio o espacio en las placas metálicas que soportan a las PMC's. En el caso del MEPSICRON, la pieza de acero superior que soportan a las PMC's del arreglo V, cuentan con dos orificios sobre su superficie, por medio de los cuales,

cualquier molécula de gas atrapada, tiene la posibilidad de salir hacia la parte externa de las PMC's.

*E.* Una diferencia importante entre ambos detectores es el aspecto industrial y experimental en cada caso. El detector fabricado por ITT, está diseñado en base a un proceso productivo industrializado, en el cual se atiende a criterios de ahorro de materiales y como es característico de un producto comercial, se busca también su rigidez y tiempo de vida determinado. Es por esta razón importante que el detector fabricado por ITT presenta las características y desventajas explicadas anteriormente.

Por otro lado, tenemos el diseño de un prototipo experimental, es decir, el detector MEPSICRON, desarrollado y ensamblado en el Instituto de Astronomía de la UNAM. Para este diseño no se tomó en consideración el ahorro de materiales, sin embargo, se busca obtener la mayor seguridad en los sellos y en la resistencia mecánica de las diferentes partes. En este sentido, el único punto débil del MEPSICRON es el soporte constituido por los tornillos de cerámica, los cuales dotan al detector de una estructura altamente flexible y modular pero son poco resistentes a esfuerzos cortantes.

Como se ha podido observar, el prototipo experimental es superior en muchos aspectos al tubo ITT, sin embargo sería necesario modificarlo para tener un detector susceptible de ser industrializado. En este caso se deberán contemplar criterios de ahorro de materiales así como minimización de los tiempos de ensamble y sellado.

## ***BIBLIOGRAFIA DEL CAPITULO II.***

1. Avallone Eugene A. & Baumeister Theodore III, "Standard Handbook for Mechanical Engineers", Cap. 13 (section 13.3 "Welding"), ed. Mc Graw-Hill.
2. Doyle, L. E. "Procesos de Manufactura y Materiales para Ingenieros", ed. Diana.
3. "Metals Handbook, Vol. VI: Welding and Brazing", American Society for Metals, 8va. edición.
4. Askeland, D. R. "La Ciencia e Ingeniería de los Materiales", Grupo Editorial Iberoamericana.
5. Flinn, R. A. & Trojan, P. K. "Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones", Mc Graw-Hill.

## **CAPITULO III**

### **ANALISIS MECANICO DE LA ESTRUCTURA INTERNA DEL MEPSICRON**

### III.1. INTRODUCCION.

El detector MEPSICRON es un detector de imagen que se diseñó básicamente con fines astronómicos. Dado que existen satélites astronómicos, es factible el uso del MEPSICRON como detector dentro de algún tipo de dichos satélites, razón por la cual estará sometido al despegue dentro de un cohete para poder ser puesto en órbita. En dicho despegue se generan diferentes tipos de fuerzas asociadas con el funcionamiento del cohete y su interacción con el medio que lo rodea. Estas fuerzas actúan sobre toda la estructura del cohete y por lo tanto sobre cualquier dispositivo que se encuentre dentro de éste.

El objetivo del presente capítulo es plantear un método de estudio para el análisis de los efectos mecánicos provocados por las fuerzas mencionadas anteriormente sobre el detector MEPSICRON, así como la obtención de los parámetros más importantes derivados de este análisis.

Para tal efecto, se plantean las simplificaciones necesarias para el estudio del problema real y se determinan las propiedades mecánicas de los elementos involucrados.

En la primera parte del capítulo se define el problema que será analizado, así como los elementos necesarios para realizar el estudio.

Posteriormente se describen las simplificaciones y consideraciones necesarias para poder establecer el modelo matemático en base al cual se hará el análisis de esfuerzos.

Una vez definido el problema a estudiar, se realiza el análisis estático, en el cual se determinan los efectos de las fuerzas producidas por la aceleración del cohete sobre el sistema planteado.

Finalmente se realiza un estudio de las vibraciones mecánicas del cohete y sus efectos sobre el MEPSICRON, para lo cual se plantea un modelo matemático de análisis de vibraciones en sistemas continuos así como el modelo probabilístico que describe la excitación al sistema en cuestión.

Tanto en el análisis estático como en el dinámico, los resultados finales se obtienen en base a la comparación de los resultados teóricos con los obtenidos experimentalmente.

### III.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El problema consiste en analizar el comportamiento mecánico de la estructura interna del MEPSICRON debido a la acción de las fuerzas generadas durante el despegue.

Las fuerzas más importantes que pueden actuar sobre el MEPSICRON son principalmente de dos tipos:

1. Fuerzas asociadas con la aceleración longitudinal del cohete.
2. Fuerzas debidas a las vibraciones mecánicas producidas por los motores del cohete.

El estudio se hace en base al análisis de la estructura interna del detector, debido a que es la zona que contiene a los elementos más importantes del funcionamiento del detector: las placas microcanales. Asimismo, estos elementos presentan una alta fragilidad con respecto a las demás partes que componen a la estructura interna. Además de las placas, existen otros elementos susceptibles de verse afectados por fuerzas externas. Dentro de ellos, los tornillos de cerámica representan la zona más crítica, ya que pueden verse sujetos a fuerzas cortantes que afecten su equilibrio mecánico. Sin embargo, se determinó experimentalmente (ver sección III.4.3.a.) que los tornillos de cerámica ofrecen una resistencia a esfuerzos cortantes cuatro veces mayor que las placas microcanales. Por esta razón, el estudio se centra exclusivamente sobre las placas microcanales.

En base a lo anterior, se establece que el sistema a estudiar está formado por las placas microcanales y sus respectivos soportes. Este sistema estará sometido a la acción de las fuerzas establecidas anteriormente.

Debido a la naturaleza de las fuerzas involucradas en el problema descrito, el estudio se divide en dos partes:

- a. *Análisis Estático.* Se analizan los efectos provocados por la acción de las fuerzas generadas por la aceleración del cohete. Para este estudio se utiliza el valor máximo que adquiere la aceleración, por lo que se considera como un problema estático con un valor máximo de fuerza.
- b. *Análisis Dinámico.* Se estudian las fuerzas vibratorias y sus efectos sobre la estructura considerada. Es importante señalar que tales vibraciones, debido a las causas que las generan, son de carácter aleatorio y por lo tanto el modelo matemático que se utiliza para el análisis es esencialmente un modelo probabilístico.

### III.3. CONSIDERACIONES Y SIMPLIFICACIONES AL PROBLEMA REAL.

#### III.3.1. Consideraciones Generales.

Debido a la complejidad del problema real es necesario hacer una serie de consideraciones, las cuales simplifican el problema para su modelado matemático. Para establecer las simplificaciones se asumen criterios en base a los cuales se plantean situaciones siempre más



desfavorables con respecto al problema original, en cuanto al comportamiento mecánico de los elementos analizados.

La estructura interna del MEPSICRON, sujeta al presente estudio, consiste básicamente en el paquete de los dos arreglos de PMC's (configuraciones V y Z) soportadas por las dos piezas circulares de acero. El problema real consiste en el análisis del comportamiento de las placas microcanales sometidas a las condiciones geométricas dadas por el sistema de soporte que las mantiene fijas dentro de la estructura. Dicho soporte se puede visualizar como un empotramiento de las placas microcanales en las cuatro pestañas de las piezas de acero. Se considera como primera aproximación que toda la estructura es perfectamente rígida, es decir, que no contiene ningún elemento disipador de energía (amortiguadores).

Las PMC's se encuentran superpuestas en cada uno de los arreglos, lo cual nos permite suponer que cada placa se comporta independientemente al momento de experimentar fuerzas que afecten su estado de equilibrio mecánico. Es por esta razón que para el modelado del problema se considera una placa microcanal aislada, la cual se encuentra empotrada en cuatro zonas y estará sujeta a la acción de los dos tipos de fuerzas establecidos en el inciso anterior, mismas que serán analizadas con detalle a lo largo del estudio.

### III.3.2. Consideraciones Geométricas.

Para poder establecer el modelo matemático que represente al problema de la placa microcanal empotrada, se considera que dicha placa se puede aproximar como una viga doblemente empotrada.

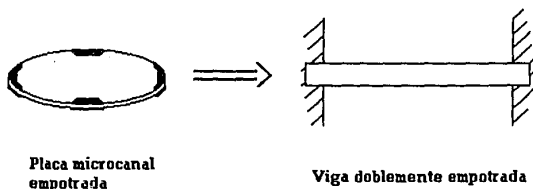
En base a las dimensiones de la placa microcanal, se modelará la viga con el mismo espesor de la placa y largo igual al diámetro de la misma. El ancho de la viga se considera igual al ancho de la pestaña de la pieza de acero que soporta a la placa microcanal.

La consideración planteada simplifica el manejo matemático del problema, y la geometría considerada presenta menor resistencia a las fuerzas que la geometría circular original, por lo que la solución de este problema nos proporciona valiosa información sobre el comportamiento de la placa microcanal sometida al estado de fuerzas dado.

Tanto el análisis estático como el dinámico se realizarán en base a la viga doblemente empotrada.

En la fig. III.1. se muestra la simplificación geométrica de la placa microcanal.

Fig. III.1. Modelado de la placa microcanal como viga empotrada.



### III.3.3. Consideraciones de Propiedades de Materiales.

El material del cual está hecha la placa microcanal es un vidrio especial conocido como Corning 8161, el cual contiene una alta cantidad de plomo.

Como se estudió en el capítulo II, las placas microcanales contienen miles de pequeños orificios en toda su superficie.

Para el presente análisis se considera al material de la placa como sólido sin orificios, es decir, isotrópico y lineal, cuyo módulo de Young se ha obtenido de tablas de propiedades de vidrios<sup>1</sup>. Esta consideración simplifica el problema notablemente, ya que el modelo matemático para resolver la geometría de la placa con orificios es de un grado de dificultad mucho mayor que el utilizado para la placa sólida, y para su solución se tendría que utilizar necesariamente un método numérico, como análisis por elementos finitos. En este caso, para nuestro problema no se cuenta con información sobre las vibraciones mecánicas que pueda ser procesada en una computadora con paquetes convencionales (NISA Display, Cosmos, etc.).

1. Tabla 3.8; "Handbook of Glass Properties", Narottam, P. B. and Doremus, R. H., Materials Engineering Department: Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, 1984.

### III.3.4. Consideraciones sobre las Fuerzas Actuantes.

En cuanto a las fuerzas debidas a la aceleración del cohete se tienen las siguientes consideraciones:

Las fuerzas que actúan sobre el detector en dirección perpendicular a las placas microcanales se consideran como las más importantes, y se desprecian aquellas fuerzas que tengan dirección tangencial. En este sentido se asume que el caso más desfavorable para el MEPSICRON será aquel en el que se encuentre colocado verticalmente con respecto al eje longitudinal del cohete, por lo que la aceleración longitudinal de éste siempre tendrá una dirección perpendicular al detector y por lo tanto a las placas microcanales. Es posible que se tengan otras situaciones en cuanto a la posición del detector dentro del cohete, pero siempre serán menos críticas para éste al momento de verse afectado por el estado de fuerzas, debido a las dos componentes que tendría la aceleración (tangencial y normal).

Sobre las fuerzas de carácter vibratorio se tienen las siguientes consideraciones importantes:

Las vibraciones mecánicas que actúan sobre la estructura del cohete se deben principalmente a las explosiones que se generan en el interior de los motores y por la fricción que se tiene entre el fuselaje y el aire circundante. Estas fuerzas vibratorias actúan en todas las direcciones, pero el caso más crítico se presenta cuando se tiene la superposición de dichas fuerzas con las debidas a la aceleración longitudinal, para las cuales ya ha sido establecido el sentido en el que se consideran, es decir, actuando perpendicularmente a las placas microcanales.

## III.4. ANALISIS ESTATICO.

### III.4.1. Procedimiento.

El análisis estático comprenderá el estudio de los efectos de las fuerzas de aceleración sobre la placa microcanal modelada como una viga doblemente empotrada.

El procedimiento consiste en encontrar la deflexión máxima en la viga al sufrir la acción de la mayor fuerza posible durante la aceleración del cohete. Posteriormente se compararán los resultados así obtenidos con los datos encontrados experimentalmente.

### III.4.2. Análisis de Información.

Para el análisis del problema se cuenta con una gráfica típica de aceleración longitudinal para un cohete tipo ariane<sup>2</sup>, que eventualmente pondría al detector en órbita.

---

2. Gráfica tomada del "User's Manual", publicado por ARIANE Space.

En la figura III.2. se presenta la gráfica de aceleración longitudinal, a partir de la cual se obtiene la información necesaria para realizar el estudio en cuestión. A continuación se presenta un análisis detallado de dicha gráfica.

#### *Curva de Aceleración Longitudinal.*

En la gráfica de la figura III.2. se presenta la curva de aceleración longitudinal durante los primeros 1040 segundos del lanzamiento, lapso durante el cual el cohete alcanza su velocidad terminal, necesaria para poder entrar en la órbita terrestre.

La curva de aceleración comienza en el tiempo igual a cero con un valor de aceleración inicial de aproximadamente  $11 \text{ m/s}^2$ , necesario para que el cohete logre vencer la fuerza de atracción gravitatoria. Este valor de aceleración es alcanzado por el cohete instantáneamente por lo que la gráfica comienza con este valor en el tiempo igual a cero. En este instante inicial la nave comienza su movimiento ascendente con el consecuente aumento de su velocidad. Los dos picos que se observan en la curva, indican el momento en que se desprenden cada una de las etapas del cohete. Cada etapa está asociada a la acción de un motor el cual se verá desprendido del cohete en el momento que se quemó todo el combustible que tenga disponible.

En la primera etapa, la aceleración alcanza un valor de  $39 \text{ m/s}^2$  en un tiempo de 170 segundos. En este momento ocurre el primer desprendimiento, lo que ocasiona un descenso brusco de la aceleración hasta alcanzar un valor mínimo de  $0.5 \text{ m/s}^2$  aproximadamente. Casi instantáneamente se activan los motores de la siguiente etapa, y la aceleración aumenta nuevamente hasta alcanzar su valor máximo de  $42.5 \text{ m/s}^2$ , el cual ocurre en el tiempo  $t=280$  seg. En este instante el cohete experimenta el desprendimiento correspondiente a esta etapa con la consecuente disminución de aceleración. Posteriormente se activan los motores de la tercera etapa, durante la cual la aceleración aumenta a un ritmo más moderado que el observado en las dos etapas anteriores. Durante esta etapa el cohete alcanza su velocidad terminal de aproximadamente  $27,000 \text{ km/hr}$  en el instante  $t=1040$  seg.

#### *Determinación de la Fuerza Máxima.*

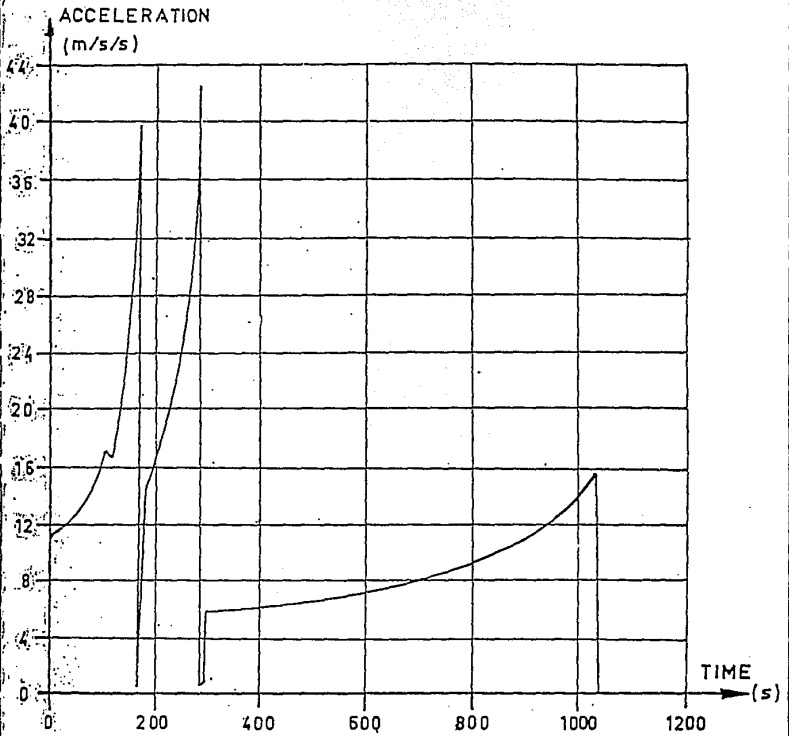
De acuerdo con la 2a. Ley de Newton<sup>3</sup> cualquier cuerpo que se encuentre dentro del cohete, experimentará una fuerza debido a la acción de la aceleración producida durante el lanzamiento. Esta fuerza será proporcional a la masa asociada con cada cuerpo y a la magnitud de la aceleración en cada instante. Durante el despegue la magnitud de la aceleración varía en cada momento, por lo que las fuerzas asociadas también son variables. Sin embargo, existe un valor en

3. En su forma más general, la 2ª Ley de Newton establece que la fuerza sobre un cuerpo será igual al cambio con respecto al tiempo del momentum lineal, esto es,

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v} \frac{dm}{dt} . \text{ Para nuestro caso, } m \text{ es constante, por lo tanto la 2ª Ley de Newton adopta la}$$

$$\text{siguiente forma: } \vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a} .$$

Fig. III.2



Typical Longitudinal acceleration profile (AR. 40)

el que la magnitud de la aceleración alcanza un valor máximo y es por lo tanto en este instante que la fuerza que experimenta cada objeto dentro del cohete alcanza su máximo valor.

En el presente análisis se estudia el efecto de la máxima fuerza sobre la placa microcanal, para lo cual se modela el problema estáticamente en el instante que el valor de la aceleración alcanza el valor máximo de  $42.5 \text{ m/s}^2$ . Este es el momento más crítico para la placa microcanal y en cualquier otro instante del lanzamiento la fuerza que ésta experimente será menor y por lo tanto se justifica sólo estudiar los efectos en este punto y considerando un sistema estático. A continuación se determina la fuerza máxima que actúa sobre la placa.

La placa microcanal tiene una masa de  $0.85 \text{ g}$ , por lo que la fuerza que actúa sobre ésta en el momento que la aceleración del cohete es de  $42.5 \text{ m/s}^2$  es:

$$F_a = m \times a = (0.85 \times 10^{-3} \text{ kg})(42.5 \text{ m/s}^2) \quad (1)$$

$$F_a = 0.036125 \text{ [N]}$$

Esta fuerza producirá sobre la placa microcanal esfuerzos que a su vez provocarán una deflexión, la cual no deberá pasar el valor máximo permitido por el material, de lo contrario la placa se fracturará. En el siguiente punto se determinan las expresiones para evaluar los efectos de dicha fuerza sobre la placa microcanal modelada como una viga doblemente empotrada. Una vez encontrado el valor de la deflexión de la placa bajo la acción de la fuerza máxima, se comparará este valor con el obtenido experimentalmente.

### III.4.3. Modelado.

El método para el cálculo de la flecha máxima provocada por la acción de fuerzas en el despegue, se realizó por el método de flexión en vigas por integración.

Como ya se mencionó anteriormente, se considera para el análisis, una viga doblemente empotrada como modelo físico de la placa microcanal soportada por las pestañas de la pieza de acero (ver plano MEP-2, Cap. II).

Este modelo, debido a las características geométricas del mismo, resulta ser de menor rigidez mecánica que el problema real, es decir, ofrece menor resistencia mecánica, por lo que los resultados que se obtengan tendrán implícito un factor de seguridad.

En el análisis hecho anteriormente sobre la gráfica de aceleración longitudinal, se calculó un valor máximo de fuerza de  $0.036125 \text{ [N]}$  aplicada en forma distribuida sobre la viga modelada. Adicionalmente a la fuerza debida a la aceleración, la placa microcanal experimenta la fuerza debida a su propio peso, la cual resulta ser:

$$F_p = m \times g = (0.85 \times 10^{-3} \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2) \quad (2)$$

$$F_p = 0.00834 \text{ [N]}$$

Por lo que la fuerza total sobre la placa microcanal será la suma de la fuerza debida a la aceleración y la debida al peso, es decir,

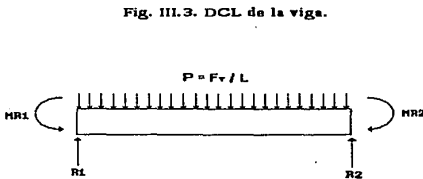
$$F_T = F_a + F_p = 0.036125 + 0.00834 = 0.04446 \text{ [N]} \quad (3)$$

El cálculo de la fuerza total se hizo considerando la masa de la placa microcanal y no la masa de la viga modelada, la cual resulta ser menor. En este caso se considera esta fuerza debido a que será un caso más crítico para el sistema (placa microcanal), y los resultados tendrán implícitos un factor de seguridad.

De acuerdo a la longitud de la viga y a la fuerza total máxima, la máxima fuerza uniformemente distribuida estará dada por:

$$P = \frac{F_T}{L} \quad (4)$$

El Diagrama de Cuerpo Libre correspondiente (DCL) se muestra en la figura III.3.



De la suma de fuerzas y momentos, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\sum F_X = 0 \quad (5)$$

$$\sum F_Y = R_1 + R_2 - F_T = 0 \quad (6)$$

$$\sum M_o = M_{R1} + R_2 L - M_{R2} - \frac{1}{2} F_T L = 0 \quad (7)$$

Las reacciones en los extremos de la viga son:

$$R_1 = R_2 = \frac{1}{2} F_T \quad (8)$$

$$M_{R1} = M_{R2} = \frac{1}{2} F_T L \quad (9)$$

Los diagramas de fuerza axial, fuerza cortante y momento flector se muestran a continuación (fig. III.4.).

Conociendo la ecuación del momento flector (11) (ver fig. III.4.) y utilizando el método de la doble integración podemos obtener las ecuaciones de la elástica, pendiente y por último la ecuación de la deflexión en la viga. De acuerdo con esto se tiene lo siguiente:

La ecuación de la elástica<sup>4</sup> es:

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M \quad (12)$$

Las ecuaciones (10) y (11) se presentan en los diagramas de la fig. III.4.

**Fig. III.4.**

*a. Fuerza axial ( $F_X$ ).*

La viga no estará sometida a fuerzas axiales.

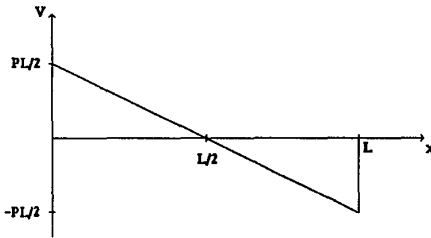
---

4. Una deducción de esta ecuación se encuentra en las secciones 11-2 y 11-3, pp. 446-451 de "Mecánica de Sólidos" de E. Popov (ver bibliografía al final del capítulo).

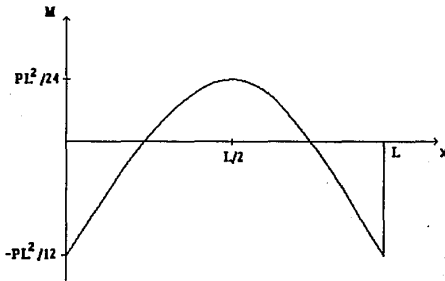


Fig. III.4. (continuación)

b. Fuerza cortante ( $V$ ). Válido para:  $0 < x < L$ ,  $V = \frac{1}{2}PL - Px$  (10)



c. Momento flector ( $M$ ). Válido para:  $0 < x < L$ ,  $M = \frac{1}{2}PLx - \frac{1}{2}PL^2 - \frac{1}{2}Px^2$  (11)



sustituyendo la ecuación (11) en la ecuación (12) se obtiene:

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{2} PLx - \frac{1}{12} PL^2 - \frac{1}{2} Px^2 \quad (13)$$

Donde la ec. (13) representa la ecuación de la elástica de la viga en cuestión. De la integración de la ec. (13) se obtiene la ecuación de la pendiente de la elástica, dada por:

$$EI \frac{dy}{dx} = \frac{1}{4} PLx^2 - \frac{1}{12} PL^2 x - \frac{1}{6} Px^3 + C_1 \quad (14)$$

Integrando la ec. (14) se obtiene la ecuación de la deflexión en la viga:

$$EIy = \frac{1}{12} PLx^3 - \frac{1}{24} PL^2 x^2 - \frac{1}{24} Px^4 + C_1 x + C_2 \quad (15)$$

Para la viga de la fig.III.1. se tienen las siguientes condiciones de contorno:

$$x = 0: \quad \frac{dy}{dx} = 0 \quad y = 0 \quad (16)$$

$$x = L: \quad \frac{dy}{dx} = 0 \quad y = 0 \quad (17)$$

Sustituyendo las ecuaciones (16) y (17) en las ecs. (14) y (15), se obtiene que  $C_1=0$  y  $C_2=0$ , por lo que la ecuación de la deflexión es:

$$EIy = \frac{1}{12} PLx^3 - \frac{1}{24} PL^2 x^2 - \frac{1}{24} Px^4 \quad (18)$$

Considerando la simetría del problema se puede ver que el valor máximo de la deflexión de la viga ocurre en  $x = \frac{1}{2} L$ , por lo que la ecuación (18) queda:

$$EIy_{mdx} = \frac{1}{384} PL^4 \quad (19)$$

El largo de la viga  $L$  se considera como la distancia que existe entre los extremos de las pestañas que sostienen a la placa microcanal (ver plano MEP-2, cap. II), el cual resulta ser de 30

mm. El ancho de la viga será igual al largo de una de estas pestañas, es decir, de 10 mm. El espesor de la viga modelada será el mismo que el de la placa microcanal, es decir, 0.5 mm.

En base a las dimensiones establecidas se calcula el momento de inercia  $I$  del área de la sección transversal de la viga, el cual está dado por:

$$I = \frac{1}{12}bh^3 \quad (20)$$

donde  $b$  es el ancho de la viga y  $h$  el espesor.

Sustituyendo los valores establecidos con anterioridad en ec. (20) se obtiene:

$$I = 1.04167 \times 10^{-13} \text{ [m}^4\text{]}$$

De tablas de propiedades de vidrios se obtuvo que el valor del módulo de Young para el vidrio corning 8161 es:

$$E = 5.792 \times 10^{10} \text{ [N / m}^2\text{]}$$

Considerando la fuerza máxima obtenida y el largo de la viga se obtiene el valor de la fuerza distribuida, dado por la ecuación (4):

$$P = \frac{F_T}{L} = \frac{0.04446 \text{ N}}{0.03 \text{ m}} = 1.4821 \text{ [N / m]}$$

Sustituyendo los valores de la fuerza distribuida, el largo de la viga, el módulo de Young y el momento de inercia en la ecuación (19), obtenemos el valor de la deflexión máxima en la viga:

$$y_{mdx} = \frac{(1/384) (1.4821 \text{ N / m}) (0.03 \text{ m})^4}{(5.792 \times 10^{10} \text{ N / m}^2) (1.04167 \times 10^{-13} \text{ m}^4)}$$

$$y_{mdx} = 5.18155 \times 10^{-7} \text{ [m]} \quad (21)$$

En base a las consideraciones hechas para el modelado de la placa microcanal como una viga, se puede asumir que el valor encontrado de  $y_{mdx}$  debe ser mayor que el valor real de deflexión de la placa, por lo tanto se toma este valor como la deflexión de la placa microcanal

sometida a la acción de la fuerza de aceleración del cohete. Si consideramos que la fuerza se aplica puntualmente sobre la placa y no distribuidamente, se presenta un caso más crítico para el equilibrio mecánico de nuestro sistema representado por la viga. Desarrollando el método de la doble integración para vigas de manera análoga a la realizada en el problema anterior, se obtiene el valor de la deflexión debido a la aplicación de la fuerza máxima en el centro de la placa:

$$EIy_{mdx} = \frac{1}{92} F \tau L^3 \quad (22)$$

Sustituyendo los valores apropiados en la ec. (22) obtenemos el valor más crítico de la deflexión de la viga:

$$y_{mdx} = \frac{(1/192) (0.4446 \text{ N}) (0.03 \text{ m})^3}{(5.792 \times 10^{10} \text{ N/m}^2) (1.04167 \times 10^{-13} \text{ m}^4)}$$

$$y_{mdx} = 1.036241 \times 10^{-6} \text{ [m]} \quad (23)$$

Se puede observar que el valor de la flecha máxima para una fuerza puntual (dado por (23)) es el doble que el valor para una carga distribuida (dado por (21)). Debido a que se está analizando el caso más crítico al que pudiera estar sometida la placa microcanal, se tomará para el análisis el valor de flecha máxima dado por (23), aunque la placa microcanal realmente está sometida a fuerzas uniformemente distribuidas.

#### III.4.3.a. Pruebas Experimentales de Flexión para la Placa Microcanal y Tornillo de Cerámica.

##### *Pruebas para la Placa Microcanal.*

Debido a la dificultad de obtener los valores de esfuerzos y deflexiones máximos permisibles para el vidrio que compone a la placa microcanal de tablas de propiedades, se llevaron a cabo pruebas experimentales para obtener estos parámetros. Cabe mencionar que debido a las características geométricas de las placas microcanales, no se pueden obtener probetas normalizadas según el código ASTM (ver norma C 158-84, apéndice D) para la prueba de flexión. Sin embargo, los datos obtenidos en las pruebas son de gran ayuda, ya que se realizaron directamente sobre la placa microcanal, lo cual representa una buena aproximación del problema real, el cual consiste en la placa apoyada en toda su periferia y sometida a fuerzas actuando perpendicularmente a la superficie de la misma.

Se realizaron dos pruebas de flexión. La primera de ellas se llevó a cabo con una placa microcanal apoyada libremente en toda su periferia y con una carga aplicada gradualmente en el centro de la misma. La segunda prueba se realizó utilizando una placa microcanal cortada con una

geometría similar a la utilizada en el modelado matemático, es decir, una probeta de forma rectangular, la cual se apoyó libremente en sus extremos y se le aplicó una carga gradualmente.

A continuación se describen detalladamente cada una de las pruebas así como los resultados obtenidos en cada una de ellas.

### ENSAYO 1.

Se utilizó para la prueba una máquina universal marca INSTRON para ensayos mecánicos. La probeta utilizada consistió en la placa microcanal apoyada libremente sobre toda su periferia. La carga se aplicó en el centro de la placa en forma gradual por medio de un punzón circular, de diámetro exterior igual a  $19.3 \text{ mm}$  y diámetro interior de  $11.1 \text{ mm}$ . En la figura III.5. se muestra un dibujo esquemático de la máquina con la disposición de la probeta y el punzón para la aplicación de la carga.

Para comenzar con el ensayo, el punzón se colocó lo más cerca posible de la superficie de la placa microcanal. Previamente se definieron los parámetros utilizados en la prueba, los cuales son: tipo de ensayo, velocidad de aplicación de la carga y datos geométricos de la probeta.

Los datos mencionados se resumen en el reporte del ensayo 1 generado por la computadora que controla a la máquina. Asimismo, se presenta una gráfica de carga aplicada [kN] vs. desplazamiento [mm] (deflexión de la placa).

#### Resultados del Ensayo 1.

De la gráfica del primer ensayo se puede ver que el punzón hace contacto con la placa microcanal en el punto A (cuando el punzón ha recorrido  $0.5 \text{ mm}$ ), las irregularidades mostradas antes de este punto se deben al ruido interno de la máquina. La deformación elástica (lineal) de la placa comienza a partir del punto B ( $0.65 \text{ mm}$ ) y termina con la fractura de la misma en el punto C ( $0.88 \text{ mm}$ ), por lo que la deformación neta de la placa es de  $0.23 \text{ mm}$ . A pesar de que la placa se fractura en el punto C, sigue ofreciendo resistencia a la aplicación de la carga hasta el punto D, donde ocurre la ruptura total de la placa. La carga máxima soportada por la placa en el punto C fue de  $9.5 \text{ [N]}$ .

### ENSAYO 2.

Este ensayo se realizó bajo las mismas condiciones que el ensayo 1. En este caso se utilizó como probeta una placa rectangular obtenida a partir de una placa microcanal, cuyas dimensiones son  $26.5 \text{ mm}$  de largo por  $10.9 \text{ mm}$  de ancho. El espesor de la probeta es el mismo que el de la placa microcanal, es decir,  $0.5 \text{ mm}$ . La probeta se apoyó libremente sobre dos soportes triangulares. En la fig. III.6. se muestra un dibujo esquemático de la disposición de la probeta para la realización del ensayo.

# ENSAYO I

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Ensayo de flexión para placa microcanal

Test type: Compressive

Instron Corporation

Series IX Automated Materials Testing System 1.04

Operator name: Adolfo Altamirano M.

Test Date: 14 Mar 1994

Sample Identification: MICROCAN

Sample Type: 32.5

Interface Type: 4200 Series

Machine Parameters of test:

Sample Rate (pts/sec): 10.00

Humidity (%): 50

Crosshead Speed (mm/min): .500

Temperature (deg. C): 23

Dimensions:

Spec. 1

Diameter (mm) 32.500

Spec gauge len (mm) .50000

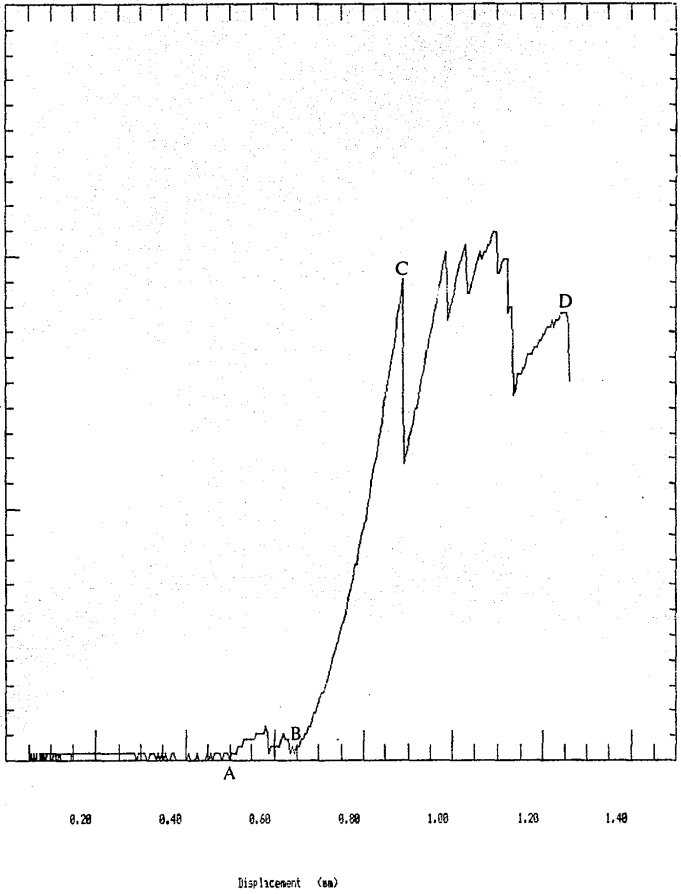
Platen Separ. (mm) .50000

Out of 1 specimens, 0 excluded.

Specimen Number	Load at Maximum (KN)	Dispicment at Maximum (mm)
1	.0106	.3599
Mean:	.0106	.3599
Standard Deviation:	-----	-----

# ENSAYO I

MICROCAN ALL



## E N S A Y O 2

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Prueba de flexión para microcanal

Test type: Flexural 3 point bend

Instron Corporation

Operator name: Adolfo Altamirano M.

Series IX Automated Materials Testing System 1.04

Test Date: 25 Mar 1994

Sample Identification: MICRONC1

Sample Type:

Interface Type: 4200 Series

Machine Parameters of test:

Sample Rate (pts/sec): 10.00

Crosshead Speed (mm/min): .500

Humidity (%): 50

Temperature (deg. C): 23

Dimensions:

Spec. 1

Width (mm) 10.900

Depth (mm) .50000

Span (mm) 26.500

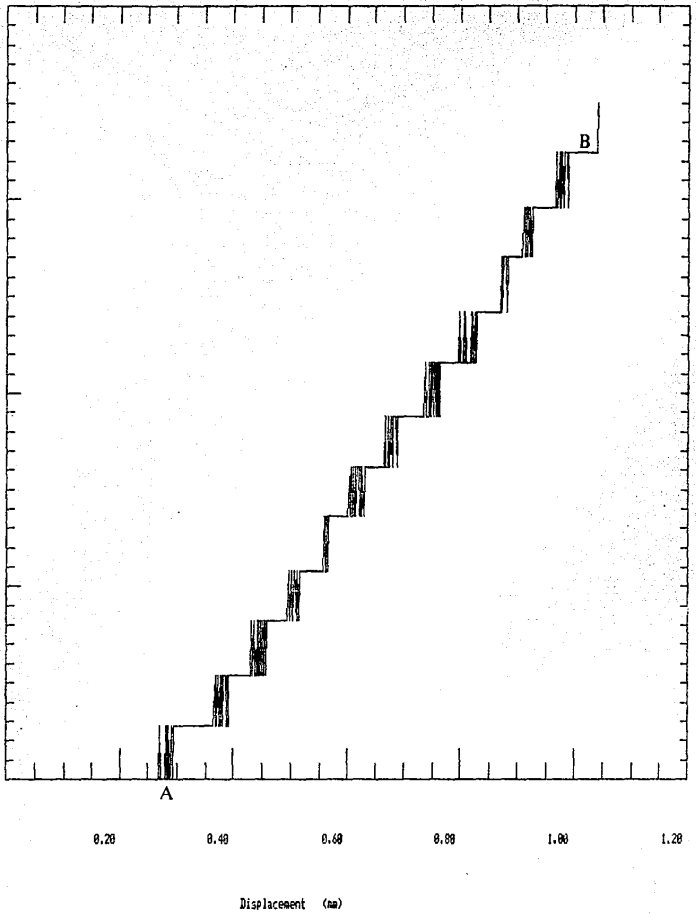
Out of 1 specimens, 0 excluded.

Specimen Number	Displcment at Yield (mm)	Strain at Yield (mm/mm)	Load at Yield (KN)	Stress at Yield (MPa)	Modulus (MPa)
1	.6863	.0029	.0018	25.53	-----
Mean:	.6863	.0029	.0018	25.53	-----
Standard Deviation:	-----	-----	-----	-----	-----



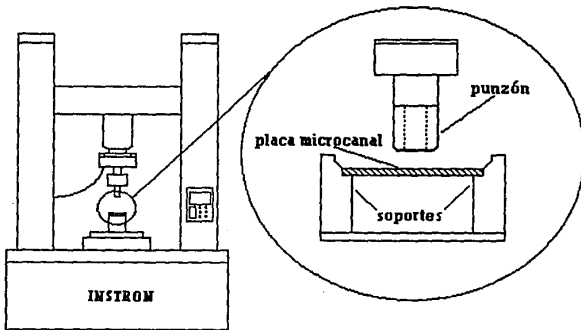
# ENSAYO 2

MICRONCI ALL



Para este ensayo la carga se aplicó por medio de un punzón con forma de prisma triangular. De la misma forma que en el ensayo anterior se definieron los parámetros correspondientes los cuales se muestran a continuación en el reporte del ensayo. Se anexa también la gráfica obtenida de carga aplicada vs. deflexión de la placa. Como se explicó anteriormente, la geometría de la probeta utilizada para este ensayo es la misma que la geometría del modelo utilizado en el análisis estático de la placa, por lo que los resultados obtenidos de esta prueba pueden ser comparados con los obtenidos teóricamente para determinar si la placa sufre o no una fractura al verse flexionada por la acción de la fuerza en cuestión.

Fig. III.5. Máquina Universal de Ensayos



### Resultados del Ensayo 2.

En la gráfica del segundo ensayo se presenta una curva de forma escalonada debido al ruido interno de la máquina. La deformación elástica de la probeta (placa rectangular) comienza en el punto A ( $0.27\text{ mm}$ ) y se deforma linealmente hasta el punto de ruptura B el cual ocurre cuando el punzón ha recorrido  $0.95\text{ mm}$ , teniendo una deformación neta de A a B de  $0.68\text{ mm}$ . La carga máxima soportada por la probeta fue de  $1.8\text{ [N]}$ .

## ENSAYO 3

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Prueba de flexión para microcanal

Test type: Flexural 3 point bend

Operator name: Adolfo Altamirano M.

Sample Identification: TORCER

Interface Type: 4200 Series

Machine Parameters of test:

Sample Rate (pts/sec): 10.00

Crosshead Speed (mm/min): .500

Instron Corporation

Series IX Automated Materials Testing System 1.04

Test Date: 20 Apr 1994

Sample Type:

Humidity (%): 50

Temperature (deg. C): 20

Dimensions:

Spec. 1

Diameter (mm) 2.7090

Span (mm) 20.000

Out of 1 specimens, 0 excluded.

Specimen Number	Displcment at Yield (mm)	Strain at Yield (mm/mm)	Load at Yield (KN)	Stress at Yield (MPa)	Modulus (MPa)
1	.0451	.0018	.0395	102.2	-----
Mean:	.0451	.0018	.0395	102.2	-----
Standard Deviation:	-----	-----	-----	-----	-----

# ENSAYO 3

TORCER ALL

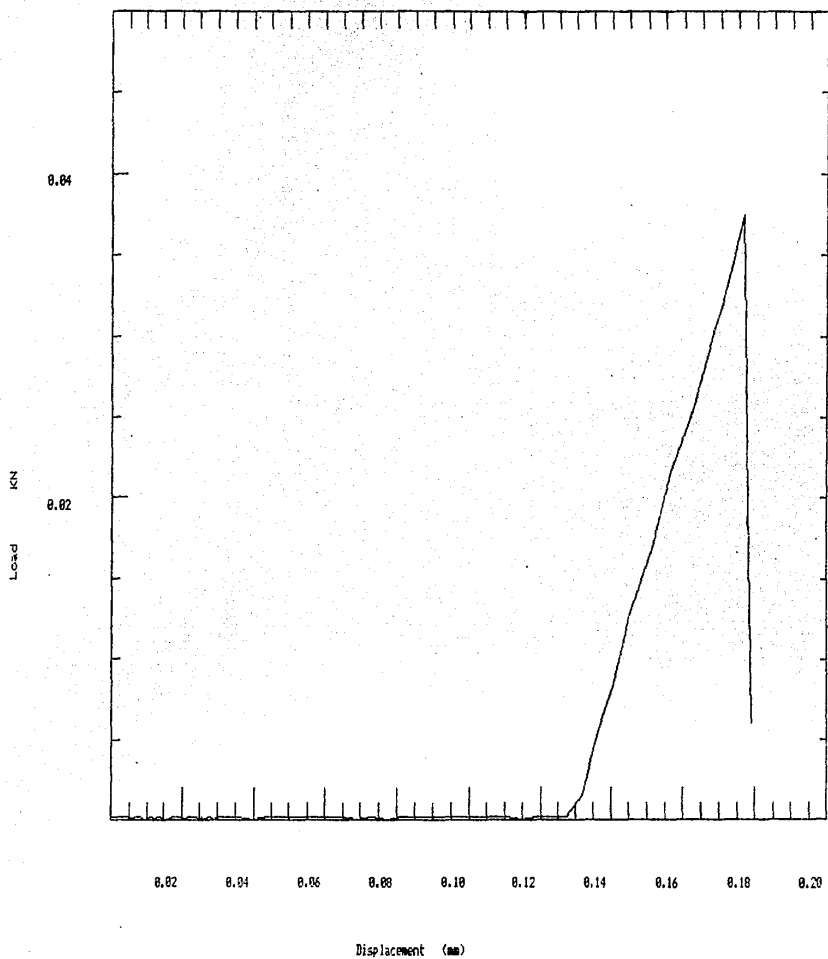
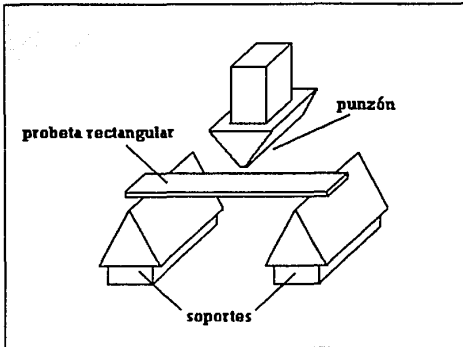


Fig. III.6.



### *Prueba de Flexión para el Tornillo de Cerámica.*

Como se explicó en el planteamiento del problema (sección III.2.), el análisis de los efectos de las fuerzas sobre la estructura interna del detector, se realiza exclusivamente para las placas microcanales por dos razones: 1) son los elementos más importantes del funcionamiento del detector y, 2) presentan la zona más frágil de la estructura interna.

Para determinar que las placas microcanales son efectivamente los elementos más críticos en cuanto a equilibrio mecánico, se realizó una prueba de flexión sobre un tornillo de cerámica, el cual forma parte (junto con los otros tres tornillos) del soporte de la estructura interna y representa también una zona crítica para el análisis mecánico.

En base a esta prueba se encontró que el tornillo de cerámica ofrece una resistencia mayor que la placa microcanal a la acción de fuerzas cortantes. A continuación se exponen los resultados del ensayo.

### *ENSAYO 3.*

Para el ensayo de flexión del tornillo de cerámica se emplearon los mismos soportes y punzón utilizados en el ensayo 2 (ver fig. III.6.). A partir de la gráfica del ensayo se obtiene que la

carga máxima soportada por el tornillo fue de 39 [N], es decir, una carga casi cuatro veces mayor que la soportada por la placa circular del ensayo 1 y cuarenta veces mayor que la soportada por la placa rectangular del ensayo 2.

De esta forma se concluye que el análisis más crítico se tiene para la placa microcanal, y se considera que si la placa soporta la acción de las fuerzas, el tornillo tampoco verá afectado su estado de equilibrio.

#### III.4.4. Resultados Teóricos vs. Resultados Experimentales.

De los resultados obtenidos de las pruebas experimentales se puede observar que la placa microcanal utilizada en el primer ensayo soportó una carga mayor (9.5 [N]) que la probeta rectangular utilizada en el segundo ensayo (1.8 [N]), lo cual se debe principalmente a que la geometría circular de la placa presenta menor concentración de esfuerzos y por lo tanto mayor resistencia mecánica. Otro factor importante que determinó la mayor resistencia de la placa microcanal con respecto a la probeta rectangular fue el tipo de apoyo utilizado para la primera, el cual fue un apoyo libre sobre toda la periferia de la placa, a diferencia del doble apoyo libre empleado en el segundo caso. Debido a lo anterior, la mayor deformación se obtuvo para la probeta rectangular usada en el segundo ensayo.

Debido a que en el análisis matemático se modeló la placa microcanal como una placa rectangular doblemente empotrada, se utilizará el resultado experimental del segundo ensayo para su comparación con los resultados teóricos.

Del análisis teórico para la viga doblemente empotrada bajo la acción de la fuerza puntual debido a la aceleración del cohete, la cual resultó ser de 0.04446 [N], se obtuvo el siguiente valor de deflexión máxima:

$$y_{mdx} = 1.03624 \times 10^{-6} [m]$$

Del segundo ensayo se tiene que la deflexión de la probeta rectangular para una carga aplicada de 1.8 [N] fue:

$$y_{experimental} = 6.8630 \times 10^{-4} [m]$$

Debido al tipo de apoyo empleado para la probeta del segundo ensayo (apoyo libre), la deflexión obtenida no puede ser comparada directamente con la calculada teóricamente, en la cual se consideró un doble empotramiento. Para poder confrontar las dos deflexiones es necesario establecer una equivalencia entre la deflexión para una viga libremente apoyada y una empotrada.

Resolviendo la ecuación de la deflexión para ambos casos (apoyo libre y empotramiento) se concluye que la deflexión en una viga libremente apoyada es cuatro veces mayor que la de una viga empotrada al aplicar una fuerza puntual al centro de las vigas.

En base a lo anterior se obtiene que la deflexión equivalente obtenida para la probeta del segundo ensayo considerando sus extremos empotrados, es:

$$y_{\text{equivalente}} = 1.7157 \times 10^{-4} \text{ [m]}$$

De los resultados anteriores se puede ver que la fuerza máxima a la que estará sometida la placa dentro del cohete, es mucho menor que la fuerza de ruptura registrada experimentalmente. Asimismo, la deflexión máxima teórica que sufrirá la placa durante el despegue será 165 veces menor que la deflexión máxima permisible (antes de la fractura). En base a estos resultados se puede ver que la placa microcanal soportará perfectamente la acción de la aceleración del cohete.

En la siguiente sección se analizan los efectos de las vibraciones mecánicas sobre la placa microcanal. Al final de este análisis se superponen los efectos tanto de la fuerza de aceleración estudiada en este punto con los efectos de las vibraciones, el cual sería el caso más crítico para la estructura interna del detector MEPSICRON.

### III.5. ANALISIS DINAMICO.

El problema dinámico a resolver consiste básicamente en encontrar las expresiones matemáticas que describan una viga sometida a vibraciones mecánicas actuando transversalmente al eje de la misma. Esta viga será la representación de la placa microcanal.

Una viga puede ser excitada por distintos tipos de vibraciones mecánicas, dependiendo de cómo se comporten éstas en el tiempo. En nuestro caso se tiene una viga (representación de la placa microcanal) sometida a la acción de vibraciones mecánicas aleatorias y el problema consiste en encontrar las deflexiones que sufrirá dicha viga por la acción de las fuerzas asociadas a la vibración.

Como primer paso se analizará el problema de la viga excitada por una fuerza vibratoria  $f(t)$ , para lo cual se utiliza la teoría de análisis de sistemas continuos excitados por una función cualquiera  $f(t)$ , la cual puede ser en general no aleatoria.

#### III.5.1. Viga Sometida a Flexión por Vibración.

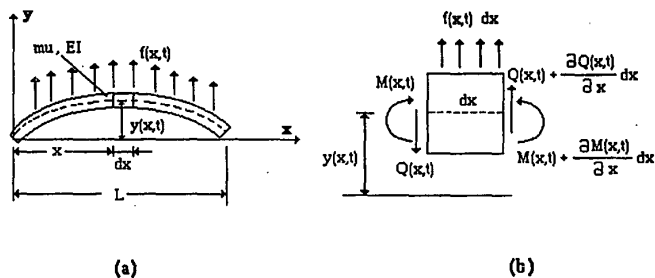
De la misma forma que en el análisis estático, para este estudio se modela la placa microcanal como una viga doblemente empotrada sometida a flexión por la acción de una fuerza vibratoria  $f(t)$ .

A continuación se hace la deducción de la ecuación de una viga sometida a flexión, la cual representará al modelo matemático a partir del cual se realiza todo el análisis dinámico de la viga.

Considérese la viga en flexión de la figura III.7.a. El desplazamiento transversal en cualquier punto  $x$  de la viga y tiempo  $t$  se denota por  $y(x,t)$  y la fuerza transversal por unidad de longitud por  $f(x,t)$ . Los parámetros involucrados en el sistema son la masa por unidad de longitud  $m_u$ , el momento de inercia de la sección transversal  $I$  y el módulo de Young  $E$ . Estas tres cantidades se consideran constantes a lo largo de la viga.

En la figura III.7.b. se muestra el diagrama de cuerpo libre de un elemento de la viga de largo  $dx$ , donde  $Q(x,t)$  representa la fuerza transversal o cortante y  $M(x,t)$  el momento flexionante.

Fig. III.7.



Utilizando la segunda ley de Newton en la dirección vertical, se obtiene la siguiente ecuación de movimiento para las fuerzas actuantes en el elemento:

$$\left[ Q(x,t) + \frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} dx \right] - Q(x,t) + f(x,t) dx = m_u dx \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} \quad (24)$$



Por otro lado se tiene la ecuación de momentos en el elemento:

$$\left[ M(x,t) + \frac{\partial M(x,t)}{\partial x} dx \right] - M(x,t) + \left[ Q(x,t) + \frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} dx \right] dx + f(x,t) dx \frac{dx}{2} = 0 \quad (25)$$

Despreciando los términos que involucren segundas potencias de  $dx$  en la ec. (25) y simplificando términos se obtiene:

$$\frac{\partial M(x,t)}{\partial x} + Q(x,t) = 0 \quad (26)$$

Sustituyendo la ecuación (26) en la ec. (24) y simplificando términos se obtiene:

$$-\frac{\partial^2 M(x,t)}{\partial x^2} + f(x,t) = m_u \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} \quad (27)$$

La ec.(27) se debe cumplir en todo el dominio  $0 < x < L$ . Esta ecuación relaciona el momento  $M(x,t)$ , la fuerza transversal  $f(x,t)$  y el desplazamiento o deflexión transversal  $y(x,t)$ .

Invocando la ecuación de la elástica (12) obtenida de teoría de mecánica de sólidos, dicha ecuación se puede expresar en la forma siguiente:

$$M(x,t) = EI \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} \quad (28)$$

Insertando la ecuación (28) en la ec. (27) se obtiene la ecuación diferencial de la viga sometida a flexión por la acción de fuerzas vibratorias:

$$-EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + f(x,t) = m_u \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} \quad (29)$$

La ec. (29) es una ecuación diferencial parcial de cuarto orden, de variables no separables, la cual debe resolverse utilizando las condiciones de contorno dadas por las características geométricas y físicas del problema.

Para la viga empotrada en ambos extremos se tienen las siguientes condiciones de contorno:

$$\text{En } x = 0: \quad y(0, t) = 0, \quad \left. \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (30)$$

$$\text{En } x = L: \quad y(L, t) = 0, \quad \left. \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad (31)$$

A continuación se procede a resolver la ecuación (29) utilizando las condiciones de contorno (30) y (31).

La solución de la ecuación diferencial (29) está dada por la solución de la homogénea asociada más la solución particular debida al término  $f(x, t)$ . En nuestro caso la solución particular de (29) no puede ser obtenida por métodos tradicionales de ecuaciones diferenciales (variación de parámetros, coeficientes indeterminados) debido a la forma aleatoria de  $f(x, t)$ , por lo que se debe de emplear un método especial basado en teoría de probabilidades, el cual será expuesto en la última parte del presente análisis.

Por el momento centraremos nuestra atención en la solución de la homogénea asociada de la ec. (29), la cual es la base para poder realizar posteriormente el análisis del sistema excitado por vibraciones aleatorias.

#### *Solución de la Homogénea Asociada de (29).*

Haciendo  $f(x, t) = 0$  en la ecuación (29) se obtiene la siguiente ecuación diferencial homogénea:

$$-EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} = m_w \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} \quad 0 < x < L \quad (32)$$

Para la solución de la ecuación (32) se considera el caso en que el movimiento de la viga es síncrono, es decir, un movimiento en el cual la forma general del desplazamiento (deflexión) de la viga no cambia con el tiempo. Considerando elementos diferenciales, esto significa que cada punto de la viga realiza el mismo movimiento en el tiempo, pasando por el punto de equilibrio y alcanzando su máximo siempre en el mismo tiempo. Matemáticamente esta consideración implica que el desplazamiento  $y(x, t)$  es separable en espacio y tiempo, lo cual se puede expresar como:

$$y(x, t) = Y(x) F(t) \quad (33)$$

donde  $Y(x)$  representa la configuración general de la viga y sólo depende de la variable espacial  $x$ , y  $F(t)$  indica el tipo de movimiento que la configuración de la viga realiza en el tiempo y depende sólo de la variable  $t$ .

Introduciendo la ec.(33) en la ec.(32) se obtiene:

$$-EI F(t) \frac{d^4 Y(x)}{dx^4} = m_u Y(x) \frac{d^2 F(t)}{dt^2} \quad (34)$$

donde debido a que  $Y$  depende sólo de  $x$  y  $F$  sólo de  $t$ , las derivadas parciales se han sustituido por derivadas totales.

Dividiendo la ecuación (34) por  $m_u Y(x) F(t)$  se obtiene:

$$-\frac{EI}{m_u Y(x)} \frac{d^4 Y(x)}{dx^4} = \frac{1}{F(t)} \frac{d^2 F(t)}{dt^2} \quad (35)$$

En la ecuación (35) se han separado las variables, de manera que el lado izquierdo de la ecuación depende sólo de  $x$ , mientras que el lado derecho depende sólo de  $t$ . En vista de esto, la única forma que la ecuación (35) se satisfice para cualquier  $x$  y  $t$  es que ambos lados de la ecuación sean iguales a una constante. La constante se denotará como  $-\omega^2$ , con lo cual se obtienen dos ecuaciones a partir de la ec.(35), una para la función  $F(t)$  y otra para  $Y(x)$ :

$$\frac{d^2 F(t)}{dt^2} + \omega^2 F(t) = 0 \quad (36)$$

$$EI \frac{d^4 Y(x)}{dx^4} - \omega^2 m_u Y(x) = 0, \quad 0 < x < L \quad (37)$$

La razón de seleccionar la constante como negativa, es que ello permite que la ecuación (36), la cual expresa la dependencia con el tiempo, se reduzca a la ecuación del oscilador armónico (ver apéndice 5), cuya solución consiste en funciones trigonométricas. Si se hubiera escogido una constante positiva, la solución de la ecuación resultante estaría dada en términos de funciones exponenciales, una con un exponente positivo y la otra con uno negativo. Debido a que la solución con el exponente positivo diverge en el tiempo y con el exponente negativo decae en el tiempo, esta solución es inconsistente con nuestro sistema, el cual se considera conservativo. Para un sistema conservativo, la energía total y por lo tanto la amplitud del movimiento, son cantidades finitas. Por lo tanto se concluye que, si el movimiento síncrono es posible,  $F(t)$  debe ser una función armónica.

La solución de (36) está dada de la siguiente forma:

$$F(t) = A_1 e^{i\omega t} + A_2 e^{-i\omega t} \quad (38)$$

En base a lo expresado anteriormente y considerando a  $F(t)$  como una función real, la ec. (38) se reduce a: (ver apéndice 5)

$$F(t) = C \cos(\omega t - \phi) \quad (39)$$

En la ecuación (39),  $\omega$  es la frecuencia del movimiento armónico y  $\phi$  es el ángulo de fase;  $C$  es una constante arbitraria. Estas tres cantidades son las mismas para cualquier función  $Y(x)$ , la cual es solución de la ec. (37).

Una vez determinada la forma de  $F(t)$ , el problema consiste en determinar la configuración espacial dada por la función  $Y(x)$ .

La ecuación (37) se puede escribir de la siguiente forma:

$$\frac{d^4 Y(x)}{dx^4} - \beta^4 Y(x) = 0, \quad \beta^4 = \frac{\omega^2 m_u}{EI} \quad (40)$$

En base a las ecuaciones (30) y (31), se pueden escribir las siguientes condiciones de contorno para la ecuación (40):

$$Y(0) = 0 \quad \left. \frac{dY(x)}{dx} \right|_{x=0} = 0 \quad (41)$$

$$Y(L) = 0 \quad \left. \frac{dY(x)}{dx} \right|_{x=L} = 0 \quad (42)$$

La ecuación (40) contiene al parámetro indeterminado  $\omega^2$ . El problema de determinar los valores de  $\omega^2$  para los cuales existen soluciones no triviales  $Y(x)$  de la ec. (40), donde dichas soluciones están sujetas a las condiciones de contorno (41) y (42), se conoce como problema de valores característicos o eigenproblema. Los valores correspondientes del parámetro  $\omega^2$  se conocen como valores característicos o eigenvalores, y las funciones asociadas  $Y(x)$  como funciones características o eigenfunciones.

La ecuación (40) es una ecuación diferencial lineal ordinaria de cuarto orden. Por lo tanto, se deben determinar cuatro constantes de integración, además del parámetro  $\omega^2$ , pero sólo se cuenta con cuatro condiciones de contorno para tal efecto. En este sentido, se resolverá la

ecuación para la configuración general de  $Y(x)$ , partiendo de la base que  $\alpha Y(x)$  es también solución de (40), donde  $\alpha$  es una constante de multiplicación.

El procedimiento consiste en utilizar dos de las cuatro condiciones de contorno para expresar la solución en términos de sólo dos de las constantes de integración. En este caso se determina la forma general que tiene  $Y(x)$  mas no su amplitud. Las restantes dos condiciones de contorno se utilizan para obtener la llamada ecuación característica. Resolviendo esta ecuación se obtienen los valores del parámetro  $\omega^2$ , los cuales consisten en un conjunto infinito de valores característicos, cuyas raíces cuadradas  $\omega_r$  ( $r= 1, 2, \dots$ ) representan las frecuencias naturales del sistema. Para cada valor característico, o frecuencia natural, corresponde una función característica, o modo natural,  $Y_r(x)$ . Como se mencionó anteriormente, debido a que la ecuación es homogénea,  $C_r Y_r(x)$  representa el mismo modo natural asociado a  $\omega_r$ , donde  $C_r$  es una constante arbitraria, por lo que las amplitudes de los modos naturales  $Y_r(x)$  permanecen indeterminadas. Las constantes  $C_r$ , y por lo tanto las amplitudes, sólo pueden ser determinadas si se aplica un proceso adecuado de normalización, el cual consiste en fijar las amplitudes de todos los modos naturales a un mismo valor. Dicho procedimiento será expuesto a lo largo del análisis. Una vez aplicado el proceso de normalización, los modos naturales se convierten en modos normalizados o normales.

En base a lo expuesto anteriormente se procede a encontrar los modos naturales  $Y_r(x)$  dados por la solución de la ecuación (40), cuya solución general está dada por:

$$Y(x) = C_1 \operatorname{sen} \beta x + C_2 \cos \beta x + C_3 \operatorname{senh} \beta x + C_4 \operatorname{cosh} \beta x \quad (43)$$

Sustituyendo las condiciones de contorno (41) en la ecuación (43) se obtiene que  $C_2 + C_4 = 0$  y  $C_1 + C_3 = 0$ , por lo que la solución general (43) se puede expresar como:

$$Y(x) = C_1 [\operatorname{sen} \beta x - \operatorname{senh} \beta x] + C_2 [\cos \beta x - \operatorname{cosh} \beta x] \quad (44)$$

Sustituyendo las condiciones de contorno (42) en la ec. (43) se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones simultáneas:

$$\begin{aligned} C_1 [\operatorname{sen} \beta L - \operatorname{senh} \beta L] + C_2 [\cos \beta L - \operatorname{cosh} \beta L] &= 0 \\ C_1 [\cos \beta L - \operatorname{cosh} \beta L] - C_2 [\operatorname{sen} \beta L + \operatorname{senh} \beta L] &= 0. \end{aligned} \quad (45)$$

Resolviendo el sistema en términos de  $C_1$  y sustituyendo el resultado en la ec. (44), se obtiene la forma general de la solución  $Y(x)$ :

$$Y(x) = \frac{C_1}{(\text{sen } \beta L + \text{senh } \beta L)} [(\text{sen } \beta L + \text{senh } \beta L)(\text{sen } \beta x - \text{senh } \beta x) + (\text{cos } \beta L - \text{cosh } \beta L)(\text{cos } \beta x - \text{cosh } \beta x)] \quad (46)$$

De la resolución del sistema de ecuaciones (45) se obtiene también la siguiente ecuación:

$$C_1 [(\text{sen}^2 \beta L - \text{senh}^2 \beta L) + (\text{cos } \beta L - \text{cosh } \beta L)^2] = 0 \quad (47)$$

Para la solución no trivial de (47) se tiene que  $C_1 \neq 0$ , por lo que la expresión encerrada en [ ] será igual a cero, a partir de lo cual y utilizando relaciones trigonométricas adecuadas se obtiene la siguiente ecuación característica:

$$\text{cos } \beta L \text{cosh } \beta L = 1 \quad (48)$$

La ecuación (48) se cumple para un número infinito de valores, denotados por  $\beta_r L$  ( $r = 1, 2, \dots$ ), los cuales al ser insertados en la ecuación (46) dan la ecuación de los modos naturales de vibración:

$$Y(x) = \frac{C_r}{(\text{sen } \beta_r L + \text{senh } \beta_r L)} [(\text{sen } \beta_r L + \text{senh } \beta_r L)(\text{sen } \beta_r x - \text{senh } \beta_r x) + (\text{cos } \beta_r L - \text{cosh } \beta_r L)(\text{cos } \beta_r x - \text{cosh } \beta_r x)] \quad (49)$$

donde

$$\beta_r^4 = \frac{\omega_r^2 m_u}{EI} \quad (50)$$

De la relación (50) se obtienen las frecuencias naturales correspondientes a los modos naturales  $Y_r(x)$ , dadas por:

$$\omega_r = \beta_r^2 \sqrt{\frac{EI}{m_u L^4}} \quad (51)$$

Resolviendo la ecuación (48) por un método gráfico-numérico, se obtienen los dos primeros modos de vibración, para los cuales se tienen los siguientes valores:

$$r = 1: \quad \beta_1 = 4.7300410/L \quad \omega_1 = 4.730041^2 \sqrt{\frac{EI}{m_u L^4}} \quad (52)$$

$$r = 2: \quad \beta_2 = 7.8532046/L \quad \omega_2 = 7.853205^2 \sqrt{\frac{EI}{m_u L^4}} \quad (53)$$

En la figura III.8. se muestra la gráfica de la ecuación (48), la cual se utilizó para obtener la solución de dicha ecuación. En la gráfica se puede observar que la amplitud de la misma crece rápidamente a ambos lados del eje y, y que corta al eje x en un número infinito de puntos. Los valores obtenidos para  $r=1,2$  son los dos primeros valores positivos de la variable  $\beta L$ , para los cuales la función toma el valor de la unidad.

$$y = \cos \beta L \cosh \beta L$$

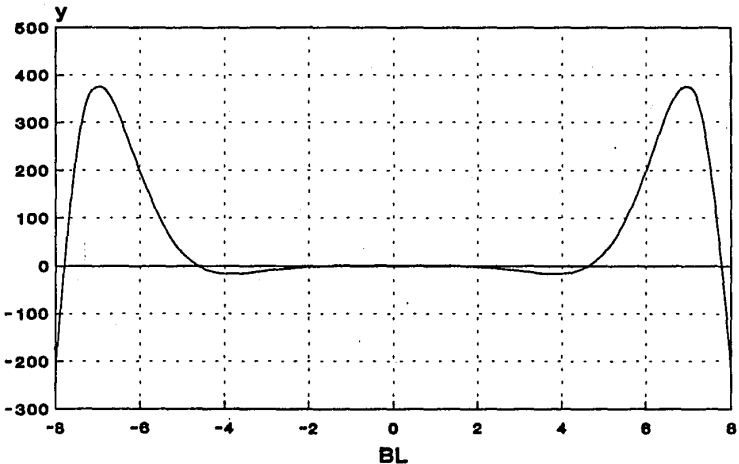


Fig III.8.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

A partir de la ecuación (48) se pueden obtener un número infinito de valores  $\beta_r$ , y por lo tanto un número infinito de modos de vibración. Sin embargo, para el problema real de la viga empotrada sometida a flexión, los modos superiores de vibración no tienen validez real. En nuestro caso particular, se asume que para la viga que representa a la placa microcanal, sólo es válido el primer modo de vibración, y en base a éste se realiza el análisis de su comportamiento mecánico.

A continuación se procede a encontrar la amplitud de los modos de vibración dados por la función  $Y_r(x)$ . La amplitud está determinada por el valor de la constante  $C_r$ , la cual será obtenida en base a un proceso de normalización, el cual consiste en obtener un valor único de amplitud para todos los modos naturales, es decir, todas las funciones  $Y_r(x)$  asociadas a los valores  $\beta_r$ , tendrán la misma amplitud de vibración.

El procedimiento matemático de normalización, está basado en una propiedad conocida como ortogonalidad de los modos naturales, la cual establece que para dos modos cualesquiera  $Y_r(x)$  y  $Y_s(x)$  se cumple lo siguiente:

$$\int_0^L m_u Y_r(x) Y_s(x) dx = 0, \quad r \neq s \quad (54)$$

La expresión (54) establece la ortogonalidad de los modos  $Y_s$  y  $Y_r$  con respecto a la masa  $m_u$ . Cuando  $r=s$ , la integral (54) será siempre una cantidad positiva, excepto para la solución trivial. De acuerdo con esto, podemos escribir dicha integral de la siguiente forma:

$$\int_0^L m_u Y_r^2(x) dx = 1, \quad (r = 1, 2, \dots) \quad (55)$$

Aplicando la integral dada por (55) se procede a normalizar los modos naturales  $Y_r(x)$  dados por la ecuación (49). En base a esto, sustituyendo la ec. (49) en la ec. (55) se obtiene:

$$\frac{m_u^2 C_r^2}{(\text{sen } \beta_r L + \text{senh } \beta_r L)^2} \int_0^L [(\text{sen } \beta_r L + \text{senh } \beta_r L)(\text{sen } \beta_r x - \text{senh } \beta_r x) + (\text{cos } \beta_r L - \text{cosh } \beta_r L)(\text{cos } \beta_r x - \text{cosh } \beta_r x)] dx = 1 \quad (56)$$

Resolviendo la integral de la ec. (56) se obtiene la siguiente expresión:



$$\frac{m_r C_r^2}{\beta_r (\text{sen } \beta_r L + \text{senh } \beta_r L)^2} [(C - A)(\frac{1}{4} \text{sen } 2\beta_r L - \text{cos } \beta_r L \text{senh } \beta_r L) + (A + C)(\frac{1}{4} \text{senh } 2\beta_r L - \text{sen } \beta_r L \text{cosh } \beta_r L) + C\beta_r L + \frac{B}{2} (\text{sen}^2 \beta_r L - 2 \text{sen } \beta_r L \text{senh } \beta_r L + \frac{1}{2} \text{cosh } 2\beta_r L - \frac{1}{2})] = 1 \quad (57)$$

donde:

$$A = (\text{sen } \beta_r L + \text{senh } \beta_r L)^2$$

$$B = 2 (\text{sen } \beta_r L + \text{senh } \beta_r L)(\text{cos } \beta_r L - \text{cosh } \beta_r L)$$

$$C = (\text{cos } \beta_r L - \text{cosh } \beta_r L)^2$$

Despejando  $C_r$  de la expresión (57) y sustituyendo el resultado en la ecuación (49), se obtiene la ecuación de los modos normalizados  $Y_r(x)$ :

$$Y_r(x) = C_r [(\text{sen } \beta_r x - \text{senh } \beta_r x) + D (\text{cos } \beta_r x - \text{cosh } \beta_r x)] \quad (58)$$

donde:

$$C_r = \frac{\beta_r^{1/2} (\text{sen } \beta_r L + \text{senh } \beta_r L)}{m_r^{1/2} [(C - A)(\frac{1}{4} \text{sen } 2\beta_r L - \text{cos } \beta_r L \text{senh } \beta_r L) + (A + C)(\frac{1}{4} \text{senh } 2\beta_r L - \text{sen } \beta_r L \text{cosh } \beta_r L) + C\beta_r L + \frac{B}{2} (\text{sen}^2 \beta_r L - 2 \text{sen } \beta_r L \text{senh } \beta_r L + \frac{1}{2} \text{cosh } 2\beta_r L - \frac{1}{2})]^{1/2}} \quad (59)$$

$$D = \frac{\text{cos } \beta_r L - \text{cosh } \beta_r L}{\text{sen } \beta_r L + \text{senh } \beta_r L} \quad (60)$$

Anteriormente se determinó, dadas las características físicas y geométricas del problema, que se asume como válido únicamente el primer modo de vibración. A continuación se presentan los dos primeros modos de vibración de la viga empotrada, de los cuales sólo el primero se considerará para el análisis posterior. Se presentan los dos primeros modos con el objetivo de comparar las configuraciones que se obtienen para cada uno de ellos y entender mejor el significado físico de la ecuación (49) así como el proceso de normalización efectuado.

Para la viga doblemente empotrada utilizada como modelo de la placa microcanal sometida a flexión se tienen los siguientes parámetros:

$$L = 0.030 \text{ [m]}$$

$$m = 0.55 \times 10^{-3} \text{ [kg]}$$

$$m_u = m/L = 0.55 \times 10^{-3} / 0.030 = 0.01833 \text{ [kg/m]}$$

En la sección III.4.3. se determinó el módulo de Young  $E$  de tablas de propiedades de vidrio, el cual es:

$$E = 5.792 \times 10^{10} \text{ [N/m}^2\text{]}$$

El momento de inercia para la geometría de la viga ha sido obtenido en base a la ecuación (20) de la sección III.4.3., el cual resultó ser:

$$I = 1.04167 \times 10^{-13} \text{ [m}^4\text{]}$$

por lo que:

$$EI = 0.0060333 \text{ [N m}^2\text{]}$$

donde  $EI$  se conoce como la rigidez de la viga.

*1er modo natural de vibración (r=1).*

En base a la ecuación (58) y considerando el valor de  $\beta_1 L = 4.730041$ , se obtiene la ecuación del primer modo natural de vibración, para el cual  $C_r = C_l = 53.425$ :

$$Y_1(x) = 53.425 [(\text{sen } 157.67x - \text{senh } 157.67x) - 1.01781 (\text{cos } 157.67x - \text{cosh } 157.67x)] \quad (61)$$

Utilizando la ec. (51), se obtiene la frecuencia natural de vibración para el primer modo:

$$\omega_1 = 18,205.1 \text{ [r/s]}$$

expresando  $\omega_1$  en hertz:

$$f_{\omega_1} = \omega_1 / (2\pi \text{ rad}) = 2,897 \text{ [Hz]}$$

2do modo natural de vibración ( $r=2$ ).

En este caso  $\beta_2 L = 7.8532046$  y la constante  $C_r = C_2 = 54.42$ , por lo que la ecuación del segundo modo de vibración es:

$$Y_2(x) = 54.42 [(\text{sen } 261.77x - \text{senh } 261.77x) - 0.99922 (\text{cos } 261.77x - \text{cosh } 261.77x)] \quad (62)$$

Utilizando la ec.(51), se obtiene la frecuencia natural de vibración para el segundo modo:

$$\omega_2 = 39,311 \text{ [r/s]}$$

expresando  $\omega_2$  en hertz:  $f_{\omega_2} = \omega_2 / (2\pi \text{ rad}) = 6,256.54 \text{ [Hz]}$

El valor de  $C_r$  debe ser el mismo para todos los modos naturales  $Y_r(x)$ , debido al proceso de normalización efectuado. En el caso de los dos primeros modos de vibración obtenidos, los valores de  $C_r$  varían en un pequeño rango, debido a que los valores de  $\beta_r L$  obtenidos en la solución de la ec. característica (48) tienen diferentes aproximaciones. Esta situación no repercute de manera importante en los resultados obtenidos, ya que se obtienen variaciones muy pequeñas, las cuales son despreciables.

En la figura III.9. se presentan las gráficas obtenidas para los dos primeros modos naturales de vibración normalizados. Estas gráficas se obtienen a partir de las ecuaciones (61) y (62). Se presenta la configuración de los dos modos en la misma gráfica para visualizar mejor el significado del proceso de normalización. Como se puede ver en las gráficas, es prácticamente imposible que la placa microcanal modelada como viga, adquiera la configuración del segundo modo de vibración. Por esta razón se considera sólo al primer modo como válido para la realización del análisis dinámico.

### MODOS NATURALES DE VIBRACION (Primero y segundo modos)

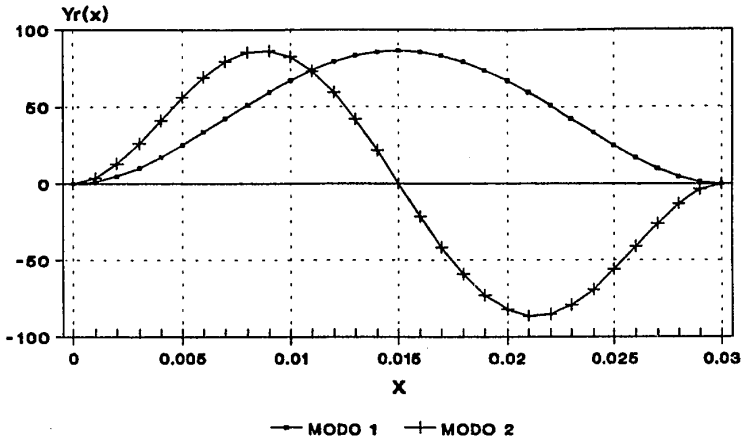


Fig. III.9.

Las frecuencias naturales de vibración de la viga bajo estudio, aumentan considerablemente conforme aumenta el orden del modo de vibración ( $r=1,2,\dots$ ). Para nuestro estudio, consideraremos que la frecuencia natural de la placa microcanal es superior al valor encontrado para la viga de 2,270 Hz. Este resultado se obtiene considerando que la frecuencia debido a la geometría circular de la placa microcanal debe ser mayor que la frecuencia de una placa rectangular de dimensiones similares, como la considerada en la obtención de los resultados presentados. Además de la forma circular, el tipo de apoyo de la placa microcanal (empotrada en toda su periferia) también contribuye a que la frecuencia de ésta sea mayor que la obtenida para la viga empotrada sólo en sus extremos.

Cabe señalar que en esta primera parte del análisis se ha obtenido la forma general de la función  $Y(x)$ , asociada con la solución de la homogénea asociada de la ecuación diferencial de la viga en flexión. La función  $Y(x)$  representa la vibración natural de la placa microcanal, es decir, sin estar sujeta a la acción de fuerzas externas. La solución completa se obtiene en la siguiente parte considerando la excitación aleatoria  $f(t)$ , para lo cual se utilizarán los resultados obtenidos en esta sección.

### III.5.2.El Problema de Vibraciones Mecánicas.

En este apartado se analizarán los efectos que producen las vibraciones mecánicas del cohete sobre la placa microcanal y eventualmente el procedimiento expuesto puede ser aplicado al análisis de cualquier sistema sometido a vibraciones de este tipo.

En el punto anterior se analizó la vibración natural de la viga empotrada, es decir, el comportamiento natural de la viga sin la acción de una fuerza externa. En esta sección se procede a estudiar el sistema sometido a la excitación externa  $f(t)$ , que en este caso está representada por las vibraciones mecánicas del cohete. Las causas que originan vibraciones en el cohete son de diversa índole, siendo las principales el funcionamiento de los motores del cohete, dentro de los cuales se llevan a cabo explosiones, y la interacción de la nave con la atmósfera circundante.

El problema consiste en resolver la ecuación diferencial de la viga sometida a flexión (29), tomando en cuenta el término  $f(t)$ , es decir, obtener la solución particular de la ecuación. Sin embargo, debido al carácter aleatorio de  $f(t)$ , la función de excitación no puede ser expresada en término de funciones conocidas (trigonométricas, exponenciales, etc.), por lo que para su representación matemática se recurre a funciones especiales, asociadas con la energía que se disipa por la acción de dichas fuerzas vibratorias. Debido a esto, la solución particular de la ecuación se obtiene utilizando un método especial basado en teoría de probabilidades.

A continuación se describen las características de las vibraciones involucradas en el problema y el método de análisis de las mismas.

#### *Vibraciones Aleatorias.*

En el estudio de las vibraciones mecánicas es posible distinguir entre tres diferentes tipos de funciones de excitación, las cuales son: armónicas, periódicas y no periódicas. La característica común entre estas funciones, es que sus valores están determinados para cualquier tiempo futuro  $t$ . Este tipo de funciones se conocen como funciones determinísticas. La respuesta de un sistema a una excitación determinística es también determinística.

Sin embargo, existen diferentes fenómenos físicos que no tienen una descripción clara en el tiempo. Ejemplos de estos fenómenos son el ruido producido por el motor de un cohete, la intensidad de un terremoto, la variación de la altura de las olas en un mar agitado, etc. El problema que se tiene al analizar este tipo de fenómenos es que los valores que pueden tomar en un tiempo futuro es impredecible, es decir, si se registra un fenómeno en un momento dado, los valores asociados con éste serán diferentes si se observa de nuevo el fenómeno en un tiempo posterior. Fenómenos cuyos parámetros no pueden ser determinados en un instante futuro se denominan no determinísticos, y en el caso de las vibraciones producidas por éstos se denominan vibraciones aleatorias.

La respuesta de cualquier sistema a una excitación aleatoria es, en su conjunto, un fenómeno aleatorio, y este tipo de respuestas se expresan en forma de funciones de probabilidad.

El presente problema atiende a un fenómeno no determinístico, en donde la excitación a nuestro sistema (placa microcanal) son vibraciones mecánicas aleatorias.

### III.5.2.a. Análisis de Información.

Como se explicó en el punto anterior, el sistema bajo estudio será excitado por las vibraciones mecánicas producidas en el cohete durante el despegue (primeros 20 min. de vuelo).

La información que se tiene disponible para analizar la excitación está dada en términos de una función de probabilidad, asociada con la energía disipada por las vibraciones. Para poder comprender esta información es necesario introducir una serie de conceptos relacionados con el análisis matemático utilizado para describir este tipo de fuerzas, mismos que se presentan a continuación.

#### *Variables Aleatorias.*

Un proceso aleatorio se describe en función de la probabilidad que tienen las variables relacionadas con el mismo de tomar ciertos valores en un instante determinado de tiempo. Existen diferentes tipos de funciones de probabilidad dependiendo del tipo de información que se tiene. Las variables involucradas en funciones de probabilidad se denominan variables aleatorias.

#### *Valor Medio Cuadrático.*

El valor medio cuadrático de una variable aleatoria provee una medida de la energía asociada con la vibración descrita por esa variable.

La definición del valor medio cuadrático de la función  $x(t)$  es:

$$\Phi_x^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x^2(t) dt \quad (63)$$

La raíz cuadrada positiva del valor medio cuadrático se conoce como raíz media cuadrática o *rms*. La raíz media cuadrática se puede visualizar como un promedio de los valores que adquiere la función  $x(t)$ .

La definición (63) puede ser aplicada a cualquier función arbitraria  $x(t)$ , pero para este estudio nos interesa la aplicación a funciones aleatorias. En este sentido, se pueden tener medidas experimentales de energía producida en un fenómeno aleatorio, las cuales se pueden interpretar matemáticamente como el valor medio cuadrático de las fuerzas que originan dicha disipación de energía.

*Función de Autocorrelación.*

La función autocorrelación provee información relacionada con la dependencia del valor de una variable aleatoria para un tiempo  $t$  con el valor de la variable en un tiempo posterior  $t + \tau$ .

La definición de la función autocorrelación de la función  $x(t)$  es la siguiente:

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) x(t + \tau) dt \quad (64)$$

Si evaluamos la función autocorrelación en el tiempo  $\tau=0$  se obtiene el valor máximo de la función. Se puede ver que  $R_x(0)$  es igual al valor medio cuadrático de la variable  $x(t)$ , es decir,

$$R_x(0) = \Phi_x^2 \quad (65)$$

*Funciones de Densidad Espectral.*

La función de autocorrelación definida anteriormente provee información acerca de una variable aleatoria en el dominio del tiempo. Por otro lado, la función de densidad espectral provee información similar en el dominio de la frecuencia. Esencialmente la función de densidad espectral no ofrece mayor información que la que puede dar la función de autocorrelación, pero para aplicaciones específicas puede ser más conveniente utilizar una de las dos funciones.

Sea  $f(t)$  una función que represente un proceso aleatorio cualquiera y escribamos a continuación la función de autocorrelación del proceso en la forma siguiente:

$$R_f(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) f(t + \tau) dt \quad (66)$$

La función de densidad espectral  $S_f(\omega)$  se define como la transformada de Fourier de  $R_f(\tau)$ , es decir,

$$S_f(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (67)$$

Lo anterior implica que la función de autocorrelación puede ser obtenida en términos de la transformada inversa de Fourier de  $S_f(\omega)$ :

$$R_f(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_f(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (68)$$

La función  $S_f(\omega)$  está definida en el dominio de la frecuencia, donde las unidades son Hz; el factor  $1/2\pi$  introducido en la transformada dada por (68) permite convertir Hz, es decir, ciclos por segundo, a radianes por segundo, con lo cual se logra la consistencia en las unidades de  $R_f(\tau)$ .

*Significado Físico de  $S_f(\omega)$ .*

Para entender el significado físico de la función de densidad espectral, evaluemos las ecuaciones (66) y (68) para  $\tau=0$  y escribamos el valor medio cuadrático de  $f(t)$  en las dos formas siguientes:

$$R_f(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_f(\omega) d\omega \quad (69)$$

Si asumimos que  $f(t)$  representa la aceleración de un cuerpo, entonces el valor medio cuadrático de  $f(t)$  representa la energía media asociada al cuerpo debida a la aceleración. En vista de esto, podemos concluir que la integral de  $S_f(\omega)/2\pi$  con respecto a  $\omega$  sobre todo el rango de frecuencias,  $-\infty < \omega < \infty$ , nos da la energía total asociada a  $f(t)$ . En base a lo anterior, se concluye que  $S_f(\omega)/2\pi$  es la "función de densidad de potencia espectral", o el "espectro de densidad de potencia" de  $f(t)$ .

En este caso se ha hecho la interpretación física de la función de densidad espectral considerando a  $f(t)$  como aceleración, sin embargo,  $S_f(\omega)$  puede representar cualquier otra forma de energía, como puede ser la disipación de calor en una resistencia eléctrica, en donde  $f(t)$  representaría el voltaje.

Si para un proceso aleatorio dado, se conoce la función de densidad espectral, probablemente obtenida de mediciones experimentales, entonces la ecuación (69) puede ser utilizada para evaluar el valor medio cuadrático del proceso aleatorio.

A continuación se explica el tipo de información que se tiene sobre de las vibraciones mecánicas producidas en el cohete durante el despegue.

*Vibraciones Mecánicas en el Cohete.*

La información que se tiene para el cohete tipo ariane, el cual se utilizaría para colocar al MEPSICRON en órbita, consiste en gráficas de aceleración longitudinal (la cual ya ha sido estudiada), de vibraciones acústicas y de vibraciones mecánicas.



La información referente a las vibraciones mecánicas del cohete, se presenta como una función de densidad espectral, expresada en  $[g^2/Hz]$ , donde  $g$  representa la aceleración de la gravedad. En la figura III.10. se muestra la gráfica de la función de densidad espectral<sup>5</sup>. Esta curva es esencialmente una medida de la energía disipada (debida a la aceleración de las vibraciones) contra frecuencia de vibración.

Debido a que en la gráfica se tiene energía específica (por unidad de masa), ésta puede asociarse a cualquier objeto que se encuentre dentro del cohete, como puede ser la estructura del MEPSICRON, con lo cual se obtiene energía asociada a la fuerza de vibración.

Utilizando la información presentada en la curva de densidad espectral de la fig. III.10. se analizan los efectos de las vibraciones sobre una placa microcanal.

### III.5.2.b. Respuesta del Sistema a Excitación Aleatoria.

En base a la información que se tiene sobre las vibraciones mecánicas, se analizará el comportamiento mecánico de la placa microcanal, modelada como viga doblemente empotrada. Se busca básicamente encontrar los valores de deflexión que puede adquirir dicha viga sometida a la excitación aleatoria  $f(t)$ .

Los valores de deflexión serán encontrados en base a la curva de densidad espectral, la cual representa energía. Debido a esto, se podrán obtener sólo valores estimados de las deflexiones, es decir, la probabilidad de que dichas deflexiones queden dentro de cierto rango.

Cabe señalar que no es posible obtener un valor único de deflexión de la placa, debido a que la información que se tiene sobre la excitación, se obtuvo experimentalmente de una serie de despegues del cohete. Por lo tanto, el valor de respuesta que se obtenga para el sistema, será un "promedio" de las deflexiones en un número grande de despegues.

A continuación se presenta el procedimiento matemático para obtener la función de autocorrelación de la deflexión en la viga, la cual representa la respuesta del sistema a la excitación aleatoria. En este caso la excitación será la energía obtenida de la gráfica de densidad espectral mostrada en la fig. III.10.

#### *Análisis Modal.*

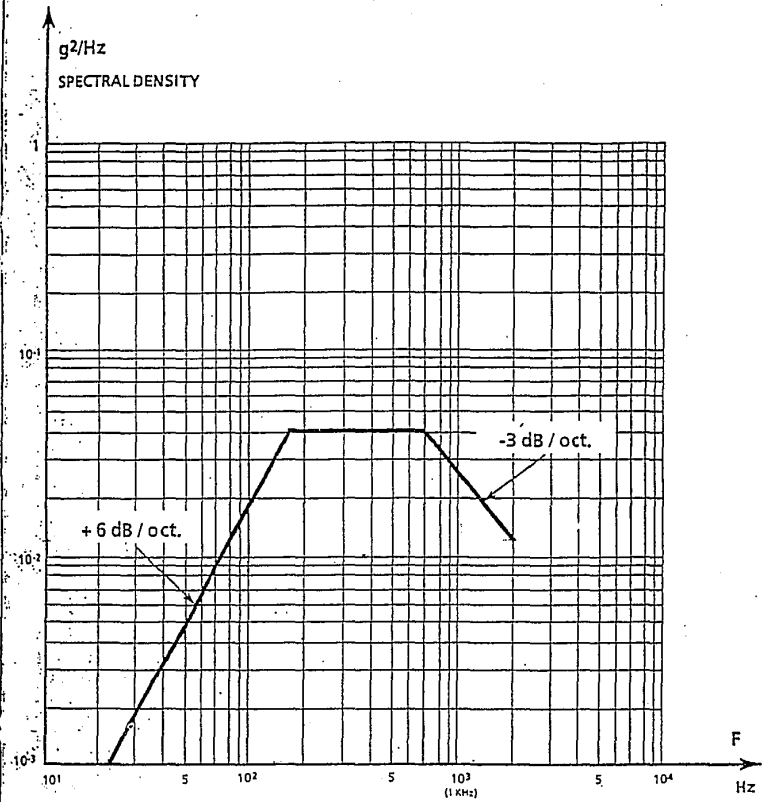
La respuesta de un sistema continuo, como es el caso de la viga empotrada, a una excitación aleatoria, puede ser obtenida por medio de un procedimiento conocido como análisis modal. Dicho procedimiento se explica a continuación.

En nuestro caso se tiene un sistema continuo representado por una viga doblemente empotrada, para la cual se obtuvo en la sección III.5.1. la ecuación diferencial que rige su movimiento:

---

5. Gráfica tomada de "User's Manual", publicado por ARIANE Space.

Fig. III. 10.



r.m.s. acceleration 7.3g

Random vibrations (Flight levels)

$$m_u \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} = f(x,t), \quad 0 < x < L \quad (70)$$

donde  $f(x,t)$  es una fuerza distribuida de excitación aleatoria y  $y(x,t)$  es la respuesta aleatoria, la cual representa la deflexión de la viga. Recordemos que la vibración  $y(x,t)$  está sujeta a cuatro condiciones de contorno, dos en cada uno de los extremos de la viga.

En la sección III.5.1. se obtuvo la solución del problema característico asociado con la ecuación (70), en donde se determinaron los modos naturales  $Y_r(x)$  ( $r=1,2,\dots$ ) así como las frecuencias  $\omega_r$  asociadas a éstos.

Se asume que los modos han sido normalizados, por lo que satisfacen:

$$\int_0^L m_u Y_r(x) Y_s(x) dx = 1, \quad r, s = 1, 2, \dots \quad (71)$$

$$\int_0^L Y_r(x) EI \frac{d^4 Y_r(x)}{dx^4} dx = \omega_r^2, \quad r, s = 1, 2, \dots \quad (72)$$

donde  $Y_s$  y  $Y_r$  son dos modos naturales cualesquiera.

La ecuación (71) expresa la ortogonalidad de los modos naturales con respecto a la masa  $m_u$ , mientras que la ec. (72) expresa la ortogonalidad de dichos modos con respecto a la rigidez  $EI$ .

Los modos naturales  $Y_r(x)$  forman un conjunto de funciones independientes, lo cual implica que cualquier función que represente una configuración arbitraria del sistema, puede ser expresada como una combinación lineal de las funciones  $Y_r(x)$ .

Lo anterior se puede interpretar físicamente por el hecho de que cualquier movimiento del sistema, debido a una excitación arbitraria, puede ser obtenido en un tiempo dado  $t$ , como una superposición de los modos naturales multiplicados por constantes apropiadas, donde dichas constantes son una medida del grado de participación de cada modo. En vista de esto, cualquier solución  $y(x,t)$  de la ecuación (70) puede expresarse como una combinación lineal de los modos naturales  $Y_r(x)$  de la siguiente forma:

$$y(x,t) = \sum_{r=1}^{\infty} Y_r(x) q_r(t) \quad (73)$$

donde las funciones  $q_r(t)$  expresan la dependencia con el tiempo de la respuesta  $y(x,t)$ .

Insertando la ec. (73) en la ec. (70) llegamos a:

$$\sum_{r=1}^n \ddot{q}_r(t) m_r Y_r(x) + \sum_{r=1}^n q_r(t) EI \frac{d^4 Y_r(x)}{dx^4} = f(x,t), \quad 0 < x < L \quad (74)$$

Multiplicando la ec. (74) por  $Y_r(x)$ , integrando sobre el dominio, y considerando las ecs. (71) y (72), se obtiene el siguiente conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias:

$$\ddot{q}_r(t) + \omega_r^2 q_r(t) = \omega_r^2 f_r(t), \quad r = 1, 2, \dots \quad (75)$$

donde

$$f_r(t) = \frac{1}{\omega_r^2} \int_0^L Y_r(x) f(x,t) dx, \quad r = 1, 2, \dots \quad (76)$$

son las fuerzas generalizadas aleatorias asociadas a las funciones  $q_r(t)$ , donde  $f_r(t)$  tiene unidades de  $LM^{1/2}$ .

La ecuación (75) es una ecuación diferencial ordinaria de segundo orden que se ha obtenido a partir de expresar a  $y(x,t)$  como una combinación lineal de funciones  $Y_r(x)$  y  $q_r(t)$ . En base a esta ecuación se obtendrán las expresiones que permiten el cálculo de la respuesta del sistema a una excitación aleatoria.

Obteniendo la transformada de Fourier de la ecuación (75) se llega a la siguiente ecuación:

$$Q_r(\omega) (-\omega^2 + \omega_r^2) = \omega_r^2 F_r(\omega), \quad r = 1, 2, \dots \quad (77)$$

La ec. (77) se puede expresar como:

$$Q_r(\omega) = H_r(\omega) F_r(\omega) \quad (78)$$

donde

$$H_r(\omega) = \frac{\omega_r^2}{\omega_r^2 - \omega^2} \quad (79)$$

$H_r(\omega)$  se conoce como la respuesta de frecuencia compleja<sup>6</sup> asociada al  $r$ -ésimo modo natural de vibración.

En base a la transformación dada por (73) se puede escribir la función de autocorrelación  $R_y(x, \tau)$  de la función  $y(x, t)$  como:

$$\begin{aligned} R_y(x, \tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} y(x, t) y(x, t + \tau) dt = \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \left[ \sum_{r=1}^{\infty} Y_r(x) q_r(t) \right] \left[ \sum_{r=1}^{\infty} Y_r(x) q_r(t + \tau) \right] dt = \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{r=1}^{\infty} Y_r^2(x) R_{qr}(\tau) \end{aligned} \quad (80)$$

donde  $R_{qr}(\tau)$  es la función de autocorrelación de la respuesta  $q_r(t)$  y se define como:

$$R_{qr}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} q_r(t) q_r(t + \tau) dt \quad (81)$$

$R_{qr}(\tau)$  también se puede definir como la transformada inversa de Fourier de la función de densidad espectral  $S_{qr}(\omega)$ , asociada a la función de excitación  $f_r(t)$ , como:

$$R_{qr}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{qr}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (82)$$

Mediante un análisis de sistemas lineales y sus respuestas a excitaciones determinadas<sup>7</sup>, se puede obtener la relación entre  $S_{qr}(\omega)$  y la función  $S_{fr}(\omega)$ , asociadas a las funciones de excitación  $q_r(t)$  y  $f_r(t)$ , respectivamente. Dicha relación está dada en función de la respuesta de frecuencia compleja  $H_r(\omega)$  (ec. (79)) de la siguiente forma:

$$S_{qr}(\omega) = H_r^*(\omega) H_r(\omega) S_{fr}(\omega) \quad (83)$$

6. Ver Sección 2.2., "Elements of Vibration Analysis", Meirovitch L., McGraw-Hill.

7. La deducción de la ec. (83) se puede ver en la sección 11.15., "Elements of Vibration Analysis", Meirovitch L., McGraw Hill (ver bibliografía al final del capítulo).

donde  $H_r^*(\omega)$  es el complejo conjugado de  $H_r(\omega)$ , que en este caso resultan ser iguales.

Insertando la ec. (83) en la ec. (82) y utilizando  $H_r^*(\omega) = H_r(\omega)$  se obtiene:

$$R_{qr}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_r^2(\omega) S_f(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (84)$$

Sustituyendo la ec. (84) en la ec. (80) se obtiene la función autocorrelación  $R_y(x, \tau)$  de la respuesta  $y(x, t)$  en función de la densidad espectral  $S_f(\omega)$ :

$$R_y(x, \tau) = \frac{1}{2\pi} \sum_{r=1}^n Y_r^2(x) \int_{-\infty}^{\infty} H_r^2(\omega) S_f(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (85)$$

Sin embargo, la función de densidad espectral que se tiene para el problema real es  $S_f(x, \omega)$  y no  $S_f(\omega)$ , por lo que para poder utilizar la ec. (85) se deberá encontrar una ecuación que relacione la función  $S_f(x, \omega)$  asociada a la fuerza distribuida de excitación  $f(x, t)$ , con la función de densidad espectral  $S_f(\omega)$ , asociada con la excitación  $f_r(t)$ . De acuerdo con lo anterior se procede de la siguiente forma:

Escribamos la función de autocorrelación de la función  $f_r(t)$ :

$$R_{fr}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f_r(t) f_r(t + \tau) dt \quad (86)$$

Utilizando la ec. (76), que expresa la transformación de  $f(x, t)$  en términos de  $f_r(t)$ , la ecuación (86) se puede desarrollar de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} R_{fr}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \left[ \frac{1}{\omega^2} \int_0^L Y_r(x) f(x, t) dx \right] \left[ \frac{1}{\omega^2} \int_0^L Y_r(x) f(x, t + \tau) dx \right] dt = \\ &= \frac{1}{\omega^4} \int_0^L \int_0^L Y_r^2(x) \left[ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x, t) f(x, t + \tau) dt \right] dx dx = \frac{1}{\omega^4} \int_0^L \int_0^L Y_r^2(x) R_f(x, \tau) dx dx \end{aligned} \quad (87)$$

donde:

$$R_f(x, \tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x, t) f(x, t + \tau) dt \quad (88)$$

Utilizando la definición de densidad espectral dada por ec. (67) se tiene:

$$S_{f_r}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{f_r}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (89)$$

Finalmente sustituyendo la ec. (87) en la ec. (89) se obtiene la función de densidad espectral  $S_{f_r}(\omega)$  en términos de  $S_f(\omega)$ :

$$\begin{aligned} S_{f_r}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{1}{\omega_r^4} \int_0^L \int_0^L Y_r^2(x) R_f(x, \tau) dx dx \right] e^{-i\omega\tau} d\tau = \\ &= \frac{1}{\omega_r^4} \int_0^L \int_0^L Y_r^2(x) \left[ \int_{-\infty}^{\infty} R_f(x, \tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \right] dx dx \end{aligned} \quad (90)$$

La ecuación (90) se puede escribir como:

$$S_{f_r}(\omega) = \frac{1}{\omega_r^4} \int_0^L \int_0^L Y_r^2(x) S_f(x, \omega) dx dx \quad (91)$$

donde:

$$S_f(x, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_f(x, \tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (92)$$

La ec. (91) nos permite encontrar la función de densidad espectral  $S_{f_r}(\omega)$  a partir de la función  $S_f(x, \omega)$ . De esta forma la ec. (85) queda perfectamente definida y por lo tanto también la obtención de la función autocorrelación  $R_y(x, \tau)$ .

Evaluando  $\tau=0$  en la ecuación (85) se obtiene el valor máximo de la función  $R_y(x,\tau)$ , expresada en términos de  $S_f(\omega)$ :

$$R_y(x,0) = \frac{1}{2\pi} \sum_{r=1}^{\infty} Y_r^2(x) \int_{-\infty}^{\infty} H_r^2(\omega) S_f(\omega) d\omega \quad (93)$$

$R_y(x,0)$  coincide con el valor medio cuadrático asociado a la respuesta del sistema  $y(x,t)$ . Por lo tanto, la ecuación (93) se puede utilizar para describir la respuesta de la viga sometida a la acción de la fuerza alatoria  $f(t)$ , expresada como la función de densidad espectral  $S_f(\omega)$ . La raíz de  $R_y(x,0)$  será un promedio de los valores  $y(x,t)$ , es decir, la raíz media cuadrática de la respuesta.

En base a lo anterior, se puede determinar el comportamiento del sistema, donde  $\sqrt{R_y(x,0)}$  representa un promedio de las deflexiones de la viga debidas a la acción de las vibraciones mecánicas del cohete.

Por teoría de probabilidades se puede demostrar que si se considera cero la media del sistema, la raíz media cuadrática  $\sqrt{R_y(x,0)}$  coincide con la desviación estándar, la cual describe plenamente a la función de densidad de probabilidad del sistema.

A continuación se sigue el desarrollo expuesto anteriormente para determinar el valor medio de la deflexión en la placa microcanal, modelada como viga doblemente empotrada, para lo cual se utilizará la función de densidad espectral de la figura III.10., misma que representa la excitación aleatoria del sistema.

#### *Determinación de $R_y(x,\tau)$ para la Viga en Flexión.*

En base al análisis modal expuesto se determinará la función de autocorrelación  $R_y(x,\tau)$  de las deflexiones  $y(x,t)$  de la viga empotrada. Al evaluar  $\tau=0$  en la función  $R_y(x,\tau)$  se obtendrá el valor cuadrático máximo, a partir del cual se puede obtener el promedio del valor máximo de la deflexión en la viga, en base a:

$$y_{máx} = \sqrt{R_y(x,0)} \quad (94)$$

De acuerdo a la ecuación (85) la función de autocorrelación para el primer modo de vibración está definida por:

$$R_y(x,\tau) = \frac{1}{2\pi} Y_1^2(x) \int_{-\infty}^{\infty} H_1^2(\omega) S_f(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (95)$$



donde  $H_f(\omega)$  representa la respuesta de frecuencia compleja, la cual se obtiene sustituyendo  $\omega_r = \omega_f$  en la ecuación (79).

Para poder evaluar la integral de la ecuación (95) es necesario conocer el valor de la función  $S_{ff}(\omega)$ , para lo cual se utiliza la ecuación (91):

$$S_{ff}(\omega) = \frac{1}{\omega^4} \int_0^L \int_0^L Y_1^2(x) S_f(x, \omega) dx dx \quad (96)$$

A partir de la gráfica de densidad espectral de la figura (III.10) se tiene lo siguiente:

La gráfica de densidad espectral se presenta en escala logarítmica en ambos ejes coordenados. En dicha gráfica podemos observar tres zonas bien definidas: La primera consiste en una recta (logarítmica) de pendiente positiva la cual ocupa un rango en el espectro de la frecuencia de 21 Hz a 150 Hz.

La segunda parte de la gráfica se mantiene constante a partir de 150 Hz hasta 700 Hz. En esta parte de la curva se presenta el valor máximo de densidad espectral el cual resulta ser de 0.04 [ $g^2/Hz$ ]. Por último, la tercera parte está definida por una recta (logarítmica) de pendiente negativa cuyo rango va de 700 Hz a 2000 Hz.

Debido a la complejidad matemática que representa resolver la doble integral de la ecuación (96) utilizando los tres rangos de la función de densidad espectral, debido al manejo de las rectas logarítmicas, se considerará que se tiene un valor constante de densidad espectral para los tres rangos del espectro de la frecuencia, el cual será el valor del segundo rango de la gráfica, es decir, 0.04 [ $g^2/Hz$ ]. En este rango se presenta la mayor disipación de energía, asociada al caso más crítico de vibraciones en el cohete, por lo que en este punto se tendrán las mayores deflexiones de la placa microcanal modelada como viga.

Como se puede observar la curva de densidad espectral representa la energía específica disipada debido a la fuerza producida por las vibraciones en el cohete, por lo que es necesario asociarla a la masa  $m_u$  de la viga considerada.

En vista de lo anterior se obtiene el siguiente valor de la función de densidad espectral  $S_{ff}(x, \omega)$ , asociada a la fuerza distribuida de vibración  $f(x, t)$ :

$$\begin{aligned} S_{ff}(x, \omega) &= 1/2 \pi \times 0.04 [g^2/Hz] \times (0.011266 [kg/m])^2 \\ &= 7.7601842 \times 10^{-5} [N^2 s/m^2] \end{aligned}$$

En la gráfica de la fig. III.11. se muestra la curva de densidad espectral  $S_{ff}(x, \omega)$ , obtenida en base a las consideraciones anteriores.

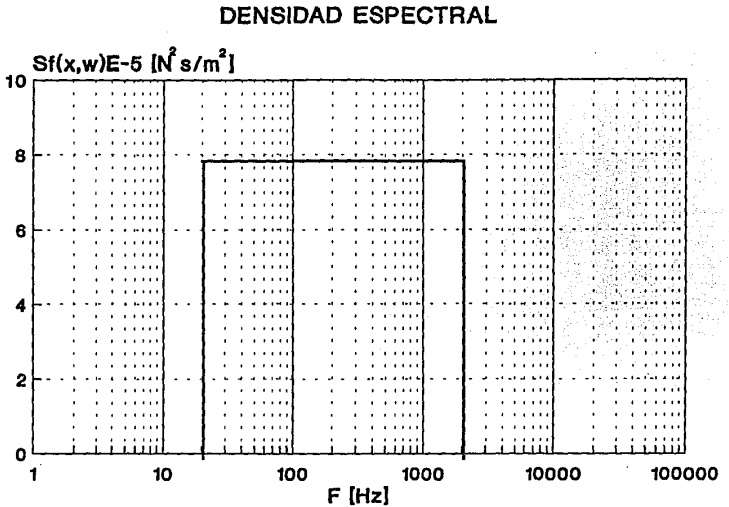


Fig. III.11.

La función  $Y_r$  para el primer modo de vibración ( $r=1$ ) está dada por la ec. (61):

$$Y_1(x) = 53.425 [(sen 157.67x - sinh 157.67x) - 1.01781 (cos 157.67x - cosh 157.67x)]$$

para el cual  $\omega_1 = 18,205.1 \text{ [r/s]}$

Sustituyendo el valor de  $S_f(x,\omega)$ , la función  $Y_1(x)$ , el valor de  $\omega_1$  y resolviendo la doble integral de la ecuación (96) para el largo de la viga  $L=0.03 \text{ m}$ , se obtiene  $S_{fr}(\omega)$ :

$$S_{fr}(\omega) = 1.8812 \times 10^{-21} \text{ [m}^2 \text{ kg s]}$$

A continuación se resuelve la integral de la ec. (95) la cual está definida entre límites infinitos. Debido a que la integral se define sobre la función de densidad espectral, y el valor de ésta es finito en el espectro de las frecuencias, los límites de integración quedarán definidos por el rango establecido, el cual es [20, 2000 Hz]. Debido a que  $S_{fr}(\omega)$  es una función real, en la resolución de la integral se considera sólo la parte real del complejo  $e^{i\omega\tau}$ . De acuerdo con esto, la integral de la ec. (95) toma la siguiente forma:

$$\int_{\omega_a}^{\omega_b} \left[ \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2} \right]^2 S_{fr}(\omega) \cos \omega\tau \, d\omega \quad (97)$$

donde:

$$\omega_b = 2,000 \text{ [Hz]} = 12,566.37 \text{ [r/s]}$$

$$\omega_a = 20 \text{ [Hz]} = 125.66 \text{ [r/s]}$$

La solución de la integral (97) está dada en términos de una serie de funciones de senos y cosenos, la cual, tomando en cuenta sólo los primeros tres términos, está dada por:

$$\int_{\omega_a}^{\omega_b} S_{fr}(\omega) \omega_1^4 \left[ \frac{\sin \omega\tau}{\tau(\omega_1^2 - \omega^2)^2} + \frac{4\omega \cos \omega\tau}{\tau^2(\omega_1^2 - \omega^2)^3} - \frac{4(\omega_1^2 - \omega^2) \sin \omega\tau}{\tau^3(\omega_1^2 - \omega^2)^4} \right]_{\omega_a}^{\omega_b} \quad (98)$$

Sustituyendo el resultado de la integral (98), y evaluando  $x = L/2$  en la ecuación (95) se obtiene la función autocorrelación  $R_y(L/2, \tau)$  para el centro de la viga:

$$R_y(L/2, \tau) = 0.24526 \left[ \frac{3.32155 \times 10^{-17}}{\tau} \sin 12,566.37\tau + \frac{9.62235 \times 10^{-21}}{\tau^2} \cos 12,566.37\tau - \frac{4.94745 \times 10^{-24}}{\tau^3} \sin 12,566.37\tau - \frac{9.10477 \times 10^{-18}}{\tau} \sin 125.66\tau - \frac{1.38089 \times 10^{-23}}{\tau^2} \cos 125.66\tau + \frac{1.09923 \times 10^{-25}}{\tau^3} \sin 125.66\tau \right] \quad (99)$$

La gráfica de la ecuación (99) se muestra en la figura III.12.

## FUNCION DE AUTOCORRELACION $R_y$

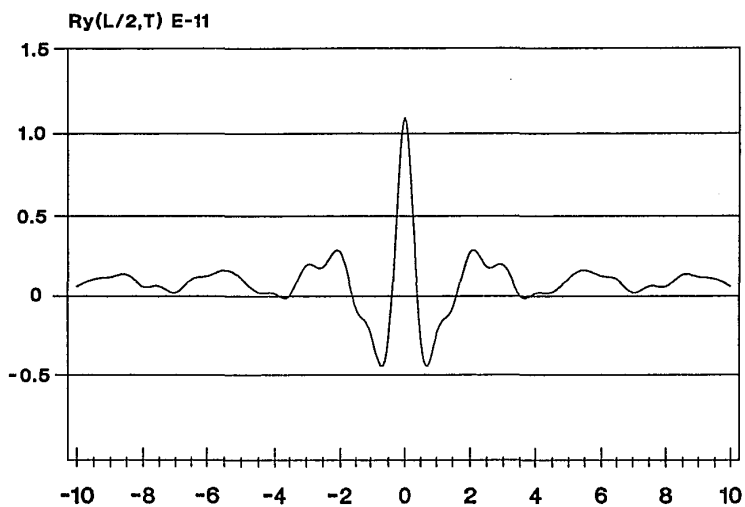


Fig. III.12.

Para obtener el valor del promedio de la deflexión de la viga se evalúa la función de autocorrelación en  $\tau=0$  y se calcula la raíz cuadrada de dicha función, es decir, se obtiene la raíz cuadrática media del valor medio cuadrático  $R_y(x,0)$ .

Evalutando  $\tau=0$  en la ec. (95) se obtiene:

$$R_y(x,0) = \frac{1}{2\pi} Y_1^2(x) \int_{-\infty}^{\infty} H_1^2(\omega) S_f(\omega) d\omega \quad (100)$$

La integral de la ecuación (100) es similar a la integral (97), excepto por la función coseno que en este caso desaparece.

De la manera análoga que en la integral (97), se obtiene para la ec. (100) una serie, en este caso de funciones racionales, para la cual se toman sólo los primeros tres términos en cuenta. De esta forma se obtiene el siguiente resultado para la integral de la ecuación (100):

$$\int_{-\infty}^{\infty} S_f(\omega) \omega^4 \left[ \frac{\omega}{(\omega_1^2 - \omega^2)^2} + \frac{4\omega^3}{(\omega_1^2 - \omega^2)^3} - \frac{4\omega^3(2\omega_1^2 + 4\omega^2)}{(\omega_1^2 - \omega^2)^4} \right]_{-\infty}^{\infty} \quad (101)$$

donde

$$\omega_a = 125.66 \text{ [r/s]}$$

$$\omega_b = 12,566.37 \text{ [r/s]}$$

$$\omega_c = 18,205.10 \text{ [r/s]}$$

Evalutando la integral (101) y sustituyendo  $Y_1(x)$  en la ec. (100) se obtiene la función  $R_y(x,0)$ :

$$R_y(x,0) = 3.3746 \times 10^{-16} [53.4249(\sin 157.67x - \sinh 157.67x) - 54.3764(\cos 157.67x - \cosh 157.67x)]^2 \quad (102)$$

Utilizando la ecuación (102) se puede obtener el valor promedio de la deflexión para cualquier punto  $x$  sobre la viga, en base a:

$$y_{\max}(x,t) = \sqrt{Ry(x,0)} \quad (103)$$

La gráfica de la ecuación (103) se muestra en la fig. III.13, en donde se puede ver que el valor máximo de la deflexión ocurre en el centro de la viga.

Evaluando  $x = L/2$  en la ec. (103) se obtiene el valor promedio máximo de la deflexión de la viga, el cual resulta ser:

$$y_{\max}(L/2,t) = 1.5864 \times 10^{-6} \quad [m] \quad (104)$$

Cabe mencionar que en (104) se tiene un valor promedio máximo de deflexión debido a la acción de una fuerza  $f(t)$  desconocida y de carácter aleatorio, de la cual se conoce sólo su espectro de energía  $S_f(\omega)$ , y en base a éste se desarrolló el procedimiento expuesto con anterioridad para encontrar un valor estimado de la deflexión de la placa microcanal modelada como viga empotrada.

Comparando el valor de deflexión dado en (104) con la deflexión equivalente de la probeta rectangular utilizada en el segundo ensayo (sección III.4.4.), para la cual éste resultó ser:

$$y_{\text{equivalente}} = 1.7157 \times 10^{-4} \quad [m],$$

podemos concluir que la deflexión máxima que sufrirá la placa microcanal modelada como viga sometida a las vibraciones mecánicas del cohete durante el despegue es 108 veces menor que el valor experimental  $y_{\text{equivalente}}$ .

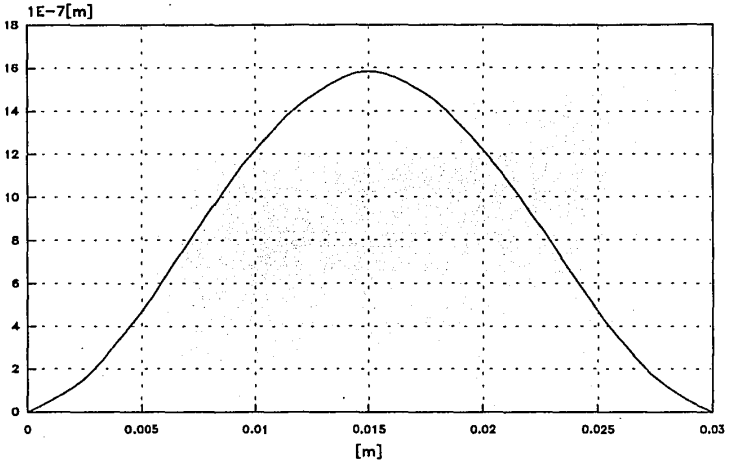
DEFLEXIONES MÁXIMAS  $y(x,t)$ 

Fig. III.13

Considerando el caso más crítico al que podrá estar sujeta la placa microcanal durante el despegue, se puede suponer una superposición de los efectos debidos a la aceleración y de los efectos asociados con las vibraciones. De esta forma se pueden sumar las deflexiones máximas obtenidas en el análisis estático y en el dinámico, en base a la siguiente ecuación para el valor crítico de deflexión:

$$y_{crítica} = y_{máx} |_{estático} + y_{máx} |_{dinámico} \quad (105)$$

Sustituyendo los valores apropiados en la ecuación (105), se obtiene el siguiente valor:

$$y_{crítica} = 2.6226 \times 10^{-6} \quad [m]$$

Este valor de deflexión crítica resulta ser 65 veces menor que la deflexión  $y_{equivalente}$  encontrada experimentalmente.

*Análisis de Frecuencias.*

Uno de los puntos primordiales en el análisis de vibraciones mecánicas es la determinación de las frecuencias naturales de vibración de un sistema, las cuales también se conocen como frecuencias de resonancia del sistema.

En nuestro caso, se tiene el sistema compuesto por la placa microcanal, modelada como viga doblemente empotrada, para el cual se determinaron las frecuencias naturales en el análisis expuesto en la sección III.5.1.

Como ya se mencionó, para el análisis se asume como válido sólo el primer modo natural de vibración, para el cual se determinó una frecuencia natural de:

$$\omega_1 = 18,205.10 \text{ [r/s]},$$

o expresada en hertz:

$$f_{\omega_1} = 2,897 \text{ [Hz]}$$

La frecuencia natural de la placa microcanal dentro del MEPSICRON, debe ser mayor que la encontrada de 2,897 [Hz], debido principalmente al tipo de empotramiento, en el cual se tiene la placa soportada en ambas caras, y a la geometría circular de la misma. Sin embargo, tomaremos este valor para el análisis de frecuencias, lo cual nos da un cierto factor de seguridad.

En base a la frecuencia natural de la placa se determina si ésta puede o no llegar a un estado de resonancia dentro del cohete, en base al siguiente análisis.

Las vibraciones a las que estará sujeto el MEPSICRON durante el despegue del cohete, oscilan entre aproximadamente 20 y 2,000 hertz, como se puede ver en la gráfica de densidad espectral de la fig. III.10. Analizando esta gráfica, vemos que la zona más crítica está comprendida entre 150 y 700 [Hz] aproximadamente. En el análisis expuesto en el punto anterior, se tomó el máximo valor de la densidad espectral y aplicado sobre todo el rango de frecuencias (de 20 a 2000 [Hz]), el cual sería el caso más crítico para el MEPSICRON. La duración de las vibraciones representadas por la curva de densidad espectral, es de aproximadamente los primeros 10 segundos de vuelo.

El objetivo de este análisis de frecuencias es determinar si la frecuencia natural de la placa microcanal puede llegar a ser igual a la frecuencia de vibración del cohete, durante un periodo de tiempo suficiente para lograr que la placa entre en resonancia con las vibraciones mecánicas a las que estará expuesta. Si la placa microcanal entra en resonancia, la amplitud de sus vibraciones empezará a aumentar en forma exponencial, lo cual terminará por romper la placa.



La frecuencia natural de vibración de la placa ( $\approx 3000$  Hz), está fuera del rango de vibraciones del cohete (20-2000 Hz), por lo que la placa no entrará en resonancia durante el tiempo que se encuentre expuesta a las vibraciones mecánicas del cohete.

Por otro lado, es importante analizar cómo se comportan las vibraciones en el tiempo, para lo cual es necesario obtener la curva de autocorrelación para la función de densidad espectral dada por la gráfica de la fig. III.10., con lo cual se obtiene una representación de dichas vibraciones en el espectro del tiempo. Para obtener dicha función de autocorrelación, es necesario obtener la transformada inversa de Fourier de la curva de densidad espectral, con lo cual se obtendría una curva muy similar a la mostrada en la fig. III.12., por lo que para efectos del presente análisis será suficiente con analizar dicha curva.

Observando la gráfica de la fig. III.12., vemos que el valor máximo de la función se presenta en  $\tau=0$ , punto en el cual se presentan las vibraciones más críticas. Para cada frecuencia natural que se analice, es posible obtener una gráfica de la función de autocorrelación, la cual presentará siempre la misma forma. En base a esto podemos ver que el punto máximo de la gráfica se presenta en un intervalo de tiempo menor a 1 segundo.

En base a lo anterior, podemos concluir que las vibraciones con frecuencias cercanas a los 2,000 Hz, que sería el valor máximo al que llegarían las vibraciones del cohete, se presentarán en un intervalo de tiempo suficientemente pequeño ( $\approx 1$  seg.) para que el MEPSICRON y por lo tanto las placas microcanales no entren en resonancia con el cohete. En este sentido se considera que en un caso extremo, la frecuencia de vibración del cohete pudiera llegar a igualar a la frecuencia natural de las placas microcanales, pero debido al tiempo de duración de las vibraciones, éstas serían inocuas para el detector.

### III.6. CONCLUSIONES.

En el presente capítulo se expuso un procedimiento para analizar un sistema sometido a la acción de las fuerzas que se generan en un cohete durante el despegue del mismo. El análisis se dividió en dos partes, en base a los dos tipos de fuerzas consideradas de mayor importancia. En la primera parte se estudió un modelo estático excitado por una fuerza máxima debida a la aceleración longitudinal del cohete. En la segunda parte se analizó el mismo modelo pero excitado por vibraciones mecánicas aleatorias, por lo que en este caso se trató de un análisis dinámico.

En base a los dos análisis realizados, se determinó que la parte más frágil del detector, es decir, las placas microcanales, y por lo tanto el detector en su conjunto, podrá resistir perfectamente la acción de las fuerzas a las que estará sometido dentro del cohete durante la etapa inicial del lanzamiento.

Tanto en el análisis dinámico como en el estático se estableció un modelo de la placa microcanal considerándola como una viga de sección rectangular. La principal razón de utilizar este modelo, además de las simplificaciones matemáticas que trae consigo, está determinada por el

análisis de vibraciones mecánicas expuesto, para el cual se hizo la deducción de la ecuación de la viga rectangular sometida a flexión. Por lo tanto, la superposición de los efectos por acción de la aceleración y los debidos a las vibraciones mecánicas, se debía hacer en base al mismo modelo físico.

Los resultados obtenidos son de suma importancia para establecer que el diseño del MEPSICRON satisface los requerimientos asociados con las aplicaciones del mismo. En este sentido, se tiene un estudio que servirá como base para futuras modificaciones en el diseño del detector. Además, se expuso la teoría necesaria para realizar el estudio, con el objetivo de establecer un método sistemático, a partir del cual es posible analizar un sistema dado sometido a condiciones como las expuestas para el despegue del cohete.

Por último, es importante señalar que el estudio expuesto sobre las vibraciones mecánicas, reviste una gran importancia, debido a que el fenómeno estudiado se comporta de forma estocástica, y su análisis requiere de herramientas matemáticas especiales, las cuales han sido tratadas con especial atención en este estudio, mismo que puede ser aplicado a fenómenos cuya descripción en el tiempo se presente en términos de una función de densidad espectral, es decir, en términos de la energía asociada al fenómeno.

**BIBLIOGRAFIA DEL CAPITULO III.**

1. Meirovitch, Leonard. "Elements of Vibration Analysis", McGraw-Hill, 1975.
2. Popov, Egor P. "Introducción a la Mecánica de Sólidos", 8ª ed. México, Limusa, 1990.
3. Beer, F. P., y Johnston, E. R., Jr. "Mecánica Vectorial para Ingenieros: Estática", México, McGraw-Hill, 1984.
4. Beer, F. P., y Johnston, E. R., Jr. "Mecánica Vectorial para Ingenieros: Dinámica", México, McGraw-Hill, 1984.
5. Anton, H. "Introducción al Álgebra Lineal", 3ª ed. México, Limusa, 1989.
6. Carmona, J. I. "Ecuaciones Diferenciales", 2ª ed. México, Alhambra Mexicana, 1989.
7. Papaulis, A. "The Fourier Integral and its applications", New York, Mc Graw-Hill, 1962.
8. Kanasewich, E. "Time Sequence Analysis in Geophysics", Edmont, University of Alberta Press, 1973.
9. Shand, E. "Glass Engineering Handbook", 2ª ed. New York, Mc Graw-Hill, 1958.
10. Doremus, R. H. "Glass Science", New York, J. Wiley, 1973.
11. Narottam, P. B. and Doremus, R. H. "Handbook of Glass Properties", Materials Engineering Department: Rensselaer Polytechnic Institute, New York, Troy.
12. Leithold "Cálculo Diferencial con Geometría Analítica", 5ª ed. México, Harla, 1980.

## **CAPITULO IV**

### **ENSAMBLE Y PRUEBAS DEL MEPSICRON**

#### **IV.1. INTRODUCCION.**

El presente capítulo está dividido en dos partes. En la primera de ellas se hace una descripción del proceso de ensamble del detector. Este proceso consiste básicamente en el ensamble de la estructura interna del detector así como el encapsulado de la misma. Como etapa final de dicho proceso, el detector se introduce en la cámara de alto vacío para llevar a cabo el sellado final con la ventana de cuarzo.

En la segunda parte del capítulo se presentan las pruebas de funcionamiento más importantes hechas sobre el detector MEPSICRON. Una serie de estas pruebas se realizan durante el proceso de sellado del detector, dentro de la cámara de vacío. Mediante dichas pruebas se obtiene información importante acerca de la construcción del fotocátodo, depositado sobre la ventana de cuarzo, a fin de establecer los parámetros óptimos de evaporación y funcionamiento del mismo. Una vez sellado el detector, se realizan las pruebas necesarias para determinar si el nivel de vacío obtenido es el adecuado. Asimismo, se realizan pruebas de detección de fenómenos luminosos, con el fin de obtener los parámetros de respuesta del detector. Dichas pruebas son: calibración de electrónica, homogeneidad, deformaciones geométricas, etc.

#### **IV.2. ENSAMBLE Y SELLADO DEL DETECTOR.**

El proceso de ensamble y sellado del detector se puede dividir en 4 etapas:

1. Ensamble del contenedor.
2. Ensamble de la estructura interna.
3. Inserción de la estructura interna dentro del contenedor y conexiones eléctricas.
4. Sellado del detector dentro de la cámara de alto vacío.

Tanto el ensamble del contenedor como el de la estructura interna se realizan en paralelo, ya que constituyen entidades independientes, las cuales sólo hasta la tercera etapa (inserción y conexiones) se unen entre sí. Una vez que se tiene la estructura interna dentro del contenedor y que se han realizado las conexiones eléctricas necesarias, el detector se encuentra preparado para su sellado dentro de la cámara de vacío. A continuación se explica cada una de las etapas establecidas.

##### **IV.2.1. Ensamble del Contenedor.**

El ensamble del contenedor consiste en la unión de las diferentes piezas que conforman la pared cilíndrica y la base del contenedor. También se realiza en esta etapa la unión de una de las

piezas de cobre con la pieza superior de la pared cilíndrica, la cual constituye una parte del mecanismo de unión de la ventana de cuarzo con el contenedor (dentro de la cámara de vacío).

Es importante mencionar que en esta etapa se busca obtener sellos perfectos en las diferentes uniones, para garantizar que el contenedor podrá mantener los altos niveles de vacío que se requieren en el interior del detector. Debido a esta razón, se utilizan procesos de soldadura altamente eficientes, los cuales han sido descritos con detalle en el capítulo II.

A continuación se describen los pasos que se siguen en el ensamble del contenedor.

a) *Pared Cilíndrica.*

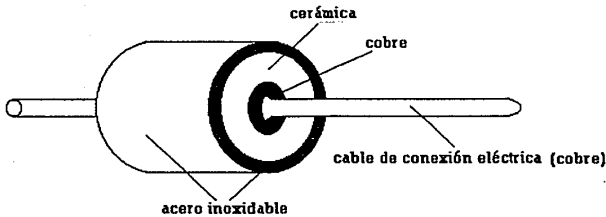
Como se explicó en el capítulo II, la pared cilíndrica del contenedor está formada por dos piezas de acero inoxidable idénticas entre sí. Una de estas piezas será la parte superior del contenedor y la otra formará la parte inferior junto con la pieza de la base (ver plano MEP-1, cap. II). Las dos piezas se sueldan por medio de uno de sus bordes, los cuales ofrecen superficies perfectamente planas para garantizar su correcto sellado.

Antes de efectuar el proceso de unión de estas piezas, se sueldan los traspasadores, a través de los cuales se realizan las conexiones eléctricas del detector (ver plano MEP-1, cap. II). Estos traspasadores se unen a la pared a través de orificios maquinados sobre las dos piezas para tal efecto. La pieza superior cuenta con 5 de estos orificios y la pieza inferior con cuatro. Más adelante se hará una descripción detallada de las conexiones eléctricas.

Los traspasadores están formados por cilindros pequeños, los cuales cuentan con una parte central metálica, por donde pasa el alambre de la conexión eléctrica. La parte central está recubierta con material cerámico, por medio del cual se aísla eléctricamente la conexión de la pared cilíndrica. Por último se tiene una capa exterior de acero inoxidable, mediante la cual se suelda el traspasador (ver fig. IV.1.).

Tanto la unión de las piezas que conforman la pared cilíndrica como la unión de los traspasadores se realiza utilizando un proceso de soldadura TIG, el cual se explica con detalle en el capítulo II. De esta forma se logra un sello hermético entre las diferentes piezas.

Fig. IV.1. Traspasador para Conexión Eléctrica.



*b) Base del Contenedor y Pieza de Cobre.*

Como siguiente paso se une la base del contenedor a la pared cilíndrica (ver plano MEP-1, cap. II.). Esta pieza, de forma circular, ofrece una superficie plana en su parte perimetral, la cual se suelda a la pieza inferior de la pared cilíndrica. Al igual que en las uniones anteriores se utiliza un proceso de soldadura TIG. La pieza que conforma la base será la que directamente soportará a la estructura interna, por medio de la guías cilíndricas maquinadas en su cara interna.

Finalmente se suelda en la parte superior del contenedor una de las dos piezas de cobre. Como se vio en el capítulo II, esta pieza es necesaria para poder llevar a cabo la unión del contenedor con la ventana de cuarzo, debido a la dificultad de soldar directamente vidrio con acero inoxidable. La segunda pieza de cobre se une a la primera por medio de cuatro tornillos. La razón de utilizar dos piezas de cobre y no sólo una, se debe a la dificultad de realizar las conexiones eléctricas de la estructura interna a través del espacio que se tendría si se utilizara sólo una pieza de cobre. De esta forma, al utilizar una primera pieza de cobre, se obtiene el espacio suficiente para maniobrar al momento de puntear las conexiones eléctricas.

La unión de la pieza de cobre constituye el último paso en el ensamble del contenedor, el cual se encuentra listo para colocar en su interior la estructura interna y hacer las conexiones eléctricas correspondientes.

#### IV.2.2. Ensamble de la Estructura Interna.

En esta etapa se realiza el ensamble la parte medular del MEPSICRON, la cual está constituida básicamente por las placas microcanales y el ánodo resistivo. Debido a la fragilidad de las placas microcanales, este proceso es delicado y se debe realizar con precisión a fin de que las diferentes partes queden colocadas en su exacta posición.

Debido a que ya se ha hecho una descripción detallada de las piezas que conforman a la estructura interna en el capítulo II, se mencionarán a continuación sólo los pasos a seguir para armar la estructura, sin mencionar detalles de las piezas involucradas.

*a.* Como primer paso se alinean y juntan las piezas que forman la parte superior de la estructura interna (ver plano MEP-1, cap. II.), atendiendo el siguiente orden: Primero se coloca la pieza superior de acero del soporte de las PMC's junto con las dos placas microcanales del arreglo V. Dichas placas se superponen en base a la dirección de los orificios microcanales, de manera que los microcanales de la primera placa queden en sentido opuesto a los de la segunda.

Después del arreglo V, se coloca el primer anillo metálico, correspondiente a la conexión eléctrica inferior de dicho arreglo. A continuación se tiene el paquete de anillos de poliamida, mediante los cuales se logra separar y aislar a los dos arreglos de PMC's. Posteriormente se coloca el segundo anillo metálico, correspondiente a la conexión eléctrica superior del arreglo Z de PMC's. Enseguida se colocan las tres placas microcanales de este arreglo, superponiéndolas de manera similar que en el arreglo V. Por último se cierra el conjunto mediante la segunda pieza de acero, la cual constituye el soporte inferior de las PMC's.

*b.* Por otro lado, se fijan los 4 tornillos de cerámica a la pieza de acero del soporte del ánodo resistivo. Esta pieza cuenta con 4 barrenos (sin rosca) por los cuales pasan los tornillos. Para fijar la pieza a los tornillos, se utilizan cuatro tuercas superiores y cuatro inferiores. Dichas tuercas se ajustan hasta el final de todo el procedimiento. En esta etapa se deja la pieza del soporte del ánodo resistivo en la parte más baja de los tornillos de cerámica. En el último paso del ensamble se hace el ajuste de las distancias finales.

*c.* Una vez fijados los tornillos de cerámica con la pieza de acero del ánodo resistivo, éstos se ensamblan con el conjunto de PMC's. Esto se logra haciendo pasar los 4 tornillos de cerámica a través de los barrenos de las piezas de acero del soporte de las PMC's. La pieza de acero superior cuenta con rosca en los 4 barrenos, por medio de los cuales se fija esta pieza a los tornillos de cerámica. Los tornillos de cerámica se dejan ligeramente por encima de la superficie de la pieza, con lo cual se logra establecer la distancia de separación entre el fotocátodo y la superficie de la primera placa microcanal. La pieza de acero inferior del soporte de las PMC's, se fija por medio de las 4 tuercas colocadas por encima de la pieza que sostiene al ánodo resistivo (ver plano MEP-1, cap II).

*d.* Posteriormente se fija la distancia que debe existir entre la última placa microcanal del arreglo Z y la superficie del ánodo resistivo. Esta distancia se establece por medio de 4 piezas cuadradas de pìrex, las cuales se colocan entre las tuercas superiores y la pieza de acero que



sostiene al ánodo resistivo. Las piezas de pirex (de tamaño similar a las tuercas) se encuentran abiertas en uno de sus extremos para poder ser insertadas en los tornillos de cerámica (ver plano MEP-1, cap II).

e. Finalmente se ajustan las tuercas y se verifica la correcta posición de todas las piezas. Debido a la utilización de los tornillos de cerámica, se garantiza que al final del ensamble, todas las piezas se encuentren centradas y en posición horizontal.

#### **IV.2.3. Inserción de la Estructura Interna dentro del Contenedor y Conexiones Eléctricas.**

Esta etapa consiste en colocar la estructura interna dentro del contenedor y realizar las conexiones eléctricas, con lo cual se tendrá listo el detector para su sellado dentro de la cámara de vacío.

A continuación se explica el mecanismo por medio del cual se fija la estructura interna dentro del contenedor y posteriormente la forma en que se realizan las conexiones eléctricas.

##### *Mecanismo de Fijación de la Estructura Interna.*

La estructura interna del detector se apoya sobre las cuatro guías cilíndricas de la base del contenedor, por medio del conjunto de resortes y bases metálicas donde quedan colocadas las bases de los tornillos. Este sistema de soporte de los tornillos se explica a continuación (ver plano MEP-1, cap II). El sistema se explicará para un tornillo, entendiéndose que se repite exactamente igual para los demás tornillos.

Alrededor de la guía cilíndrica, maquinada sobre la base, se coloca un resorte de acero (resorte exterior). En el centro de la guía se tiene un orificio pequeño, dentro del cual se coloca un segundo resorte (resorte interior), de mucho menor tamaño que el anterior. Apoyada sobre el conjunto de los dos resortes, se coloca una base metálica cilíndrica, la cual cuenta en el centro con un barreno. Sobre dicha base metálica se apoya la cabeza (base) del tornillo de cerámica, quedando confinada dentro del barreno.

Por medio del mecanismo de soporte descrito anteriormente, se puede llevar a cabo el proceso de sellado dentro de la cámara de vacío, en el cual se apoya la cara interna del cuarzo sobre la parte superior de los tornillos de cerámica. Este procedimiento se explica con detalle en el siguiente punto.

Una vez que se ha fijado la estructura interna mediante el procedimiento descrito anteriormente se procede a puntear los cables de las conexiones eléctricas.

##### *Conexiones Eléctricas.*

Las conexiones eléctricas que se requieren para el funcionamiento del detector son: 5 conexiones para establecer los potenciales desde el fotocátodo hasta el ánodo resistivo y 4

conexiones para extraer los pulsos eléctricos del ánodo resistivo. Los detalles del funcionamiento eléctrico del detector han sido explicados con detalle en el capítulo I.

Una vez que se tiene la estructura interna del detector dentro del contenedor, se procede a conectar los cables que pasan a través de los traspasadores a los diferentes puntos destinados en las piezas para esta función. Todas las conexiones se realizan punteando los cables (por medio de un caufín).

La conexión eléctrica del fotocátodo se logra mediante un cable que se hace pasar a través de la pieza superior del soporte de las PMC's. Para aislar este cable de la pieza de acero, se utiliza un cono de vidrio delgado, el cual alberga en su interior a dicho cable. El cono de vidrio se coloca en un orificio de la pieza de acero maquinado para tal efecto.

El contacto eléctrico superior del arreglo V de PMC's se establece punteando el cable destinado para este fin, a la pieza cilíndrica superior del soporte de las PMC's. El contacto eléctrico inferior del arreglo V se hace conectando el cable a la lengüeta con que cuenta el primer anillo metálico ubicado en esta zona.

Las conexiones eléctricas del arreglo Z se realizan de la misma forma que para el arreglo V. En este caso el contacto superior se tiene en el segundo anillo metálico y el contacto inferior en la pieza cilíndrica del soporte de las PMC's.

Por último, la pieza de acero que contiene al ánodo resistivo se conecta a la tierra de la fuente de poder que se utiliza para suministrar los voltajes requeridos.

Todas las conexiones descritas anteriormente pasan a través de la pieza superior de la pared cilíndrica. Las cuatro conexiones del ánodo resistivo para extraer los pulsos eléctricos, se realizan punteando los cables en las 4 esquinas de la placa que contiene al ánodo, las cuales previamente se han metalizado. Los cables de estas 4 conexiones pasan a través de la pieza inferior de la pared cilíndrica del contenedor.

De esta forma se completan todas las conexiones eléctricas y el detector se encuentra listo para su sellado final dentro de la cámara de vacío.

#### **IV.2.4. Sellado del Detector dentro de la Cámara de Vacío.**

Esta es la última etapa en el proceso de ensamble del detector y debido a las condiciones bajo las cuales se realiza, constituye la parte más delicada del proceso.

Como se ha estudiado en los capítulos anteriores, el detector MEPSICRON funciona a un nivel de vacío interno de aproximadamente  $10^{-10}$  mbar. Asimismo, la construcción del fotocátodo sobre el sustrato de cuarzo, requiere de un proceso realizado a alto vacío y bajo condiciones controladas.

En base a lo anterior se tienen dos procesos dentro de la cámara de vacío para lograr el sellado del detector. El primero de ellos consiste en evaporar todos los elementos que forman el material fotoemisivo sobre el cuarzo. Este procedimiento se explica con detalle en el capítulo I y será retomado en la parte de pruebas al final de este capítulo.

Una vez que se ha construido satisfactoriamente el fotocátodo, el segundo proceso consiste en transportar el vidrio (cuarzo) hasta el detector y depositarlo sobre la parte superior del mismo para lograr de esta forma el sellado.

El proceso de sellado se explica a continuación (ver fig. IV.2.):

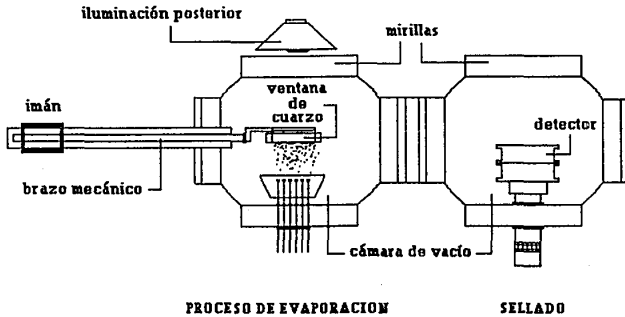
Para poder unir la ventana de cuarzo o simplemente cuarzo al contenedor del detector, se utiliza una soldadura de bajo punto de fusión, la cual se deposita previamente sobre la canaleta que forman las piezas de cobre. Este proceso de soldadura se explica en el capítulo II. El cuarzo, previamente metalizado, se lleva hasta colocarlo exactamente sobre el detector. Para transportar el vidrio se utiliza un brazo mecánico que se encuentra dentro de la cámara de vacío. Para mover dicho brazo, se utiliza un imán de tierras raras, el cual se acciona manualmente desde afuera de la cámara.

El brazo mecánico sostiene en su extremo al vidrio, por medio de un mecanismo diseñado especialmente para esta función. El mecanismo consiste básicamente en una pieza metálica en forma de "U" cuadrada. Por medio de los brazos de la U se sostiene el vidrio durante el proceso de construcción del fotocátodo y posteriormente se transporta hasta el detector, donde se encuentra la soldadura en estado líquido, lista para entrar en contacto con el cuarzo. El proceso se lleva a cabo a 60°C aproximadamente, y después se comienza a descender lentamente la temperatura hasta que la soldadura solidifica y sella al detector.

Para verificar si el nivel de vacío dentro del detector es el adecuado ( $10^{-10}$  mbar), se utiliza un espectrómetro de masas, mediante el cual se mide la presión parcial de los gases dentro de la cámara de vacío así como la presión total. Si el sello del detector presenta fugas, el espectrómetro de masas detectaría un incremento de la presión total dentro de la cámara.

Una vez sellado el detector se realizan pruebas dentro de la cámara de vacío para verificar si el sello se llevó a cabo correctamente y el nivel de vacío es el adecuado. Estas pruebas se explican en la siguiente sección.

Fig. IV.2. PROCESOS DE EVAPORACION Y SELLADO



### IV.3. PRUEBAS DEL MEPSICRON.

En esta segunda parte se exponen una serie de pruebas realizadas con el detector, tanto antes como después de sellado éste. En este sentido, las pruebas se dividen en dos etapas:

1. *Pruebas del fotocátodo.* Estas se realizan durante el proceso de construcción del fotocátodo dentro de la cámara de vacío.
2. *Pruebas de funcionamiento del detector.* Se realizan una vez sellado el detector y mediante estas pruebas se definen los parámetros óptimos de funcionamiento del detector.

#### IV.3.1. Pruebas del fotocátodo.

Estas pruebas se realizan durante el proceso de construcción del fotocátodo sobre el sustrato de cuarzo y tienen un doble objetivo: dar información necesaria para poder llevar a cabo correctamente el proceso de evaporación y controlar la calidad del fotocátodo final. A continuación se explica dicho proceso así como las pruebas realizadas durante el mismo.

La construcción del fotocátodo consiste en la evaporación de los diferentes elementos que forman el material fotoemisivo (Na, K, Sb y Cs), los cuales se depositan sobre la cara interna del cuarzo. La evaporación se realiza por medio de cromatos de los elementos involucrados. Este proceso se explica con detalle en la sección I.2.2.

Los cromatos utilizados en la evaporación se encuentran contenidos dentro de contenedores especiales (evaporadores), los cuales se colocan a su vez sobre soportes, cada uno de los cuales está formado por dos espigas metálicas, a través de las cuales se hace pasar la corriente que calentará al cromato para su evaporación.

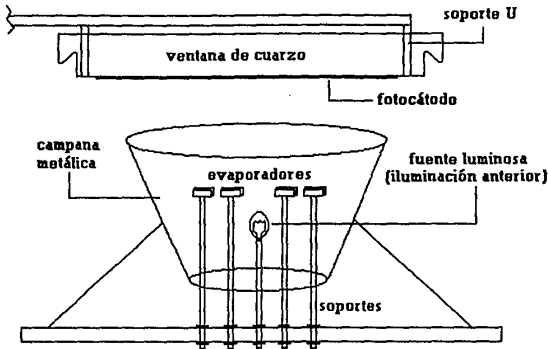
Al momento de evaporar los diferentes elementos, es posible que éstos se depositen en cualquier superficie dentro de la cámara de vacío. Debido a esto, es necesario dirigir los gases, producto de la evaporación, directamente sobre la superficie del cuarzo. Para ello se utiliza una campana metálica en forma de cono truncado, dentro de la cual se encuentran los evaporadores que contienen a los cromatos (ver fig. IV.3.).

Como se explicó en el capítulo I, el material fotoemisivo desprenderá electrones de su superficie cuando sobre éste incidan fotones, los cuales producirán una corriente eléctrica que se propagará a través de dicha superficie. La medición de esta corriente será la respuesta o ganancia del fotocátodo.

Para llevar a cabo el control del proceso de construcción del fotocátodo es necesario medir la respuesta de éste a medida que se evaporan los diferentes elementos. La medición de la corriente se realiza por medio de un electrómetro, el cual se comunica al interior de la cámara de vacío por medio de un cable conectado a un anillo metálico que cubre la parte metalizada del cuarzo. Dicho anillo metálico tiene una doble función: proteger la superficie metalizada de la evaporación y realizar el contacto eléctrico.

Para obtener la respuesta del fotocátodo, es necesario excitarlo por medio de un haz de luz. Para ello se utilizan dos tipos de iluminación: anterior y posterior. A continuación se explica cada una de ellas.

Fig. IV.3



#### *Iluminación Anterior.*

Se utiliza un foco de luz blanca el cual ilumina al fotocátodo directamente sobre su superficie. Este foco se encuentra colocado dentro de la campana metálica junto con los evaporadores (ver fig. IV.3.). Mediante esta prueba se obtiene información acerca del espesor del fotocátodo en construcción, para lo cual se mide la cantidad de luz que pasa a través de la superficie de éste.

Para realizar la medición se utiliza un fotómetro colocado sobre una de las mirillas de la cámara de vacío, la cual se encuentra exactamente sobre el cuarzo. Mediante la medición se obtiene un parámetro conocido como "índice de opacidad" de la superficie, el cual se obtiene a partir de la cantidad de luz que atraviesa dicha superficie en watts por centímetro cuadrado. Aunque no se tiene una medición directa del espesor del material depositado, éste se puede expresar en base al porcentaje de la opacidad de la película depositada, lo cual da información de la cantidad de material que se ha evaporado en el proceso.

#### *Iluminación Posterior.*

En este caso se obtiene la respuesta del fotocátodo iluminándolo desde su parte posterior, mediante una fuente luminosa ubicada en el exterior de la cámara de vacío (sobre la mirilla).

En esta prueba se obtiene información sobre la respuesta del fotocátodo al ser excitado con luz de diferente longitud de onda, para lo cual se ilumina alternadamente con luz roja, luz blanca y luz ultravioleta. A partir de las mediciones realizadas, es posible obtener la curva de respuesta espectral del fotocátodo, en base a la cual se determina el rango de operación del mismo y por lo tanto se obtiene información acerca del tipo de fotocátodo que se está construyendo. Esta prueba se vuelve a realizar con el detector una vez sellado, para obtener la curva definitiva de respuesta espectral (ver "pruebas de funcionamiento del detector").

#### *Estabilidad y Ganancia Máxima.*

Mediante la iluminación anterior y posterior es posible obtener una curva de respuesta del fotocátodo durante todo el proceso de construcción del mismo. Dicha curva ofrece información sobre un parámetro conocido como "estabilidad del fotocátodo". Si un fotocátodo es estable su respuesta se mantendrá constante en el tiempo al ser excitado por luz de una determinada longitud de onda. Por otro lado, la curva de respuesta permite conocer los puntos de ganancia máxima, a partir de los cuales se establecen los criterios de evaporación de los diferentes elementos. La curva es obtenida a través de una graficadora, la cual se encuentra conectada al electrómetro.

### **IV.3.2. Pruebas de funcionamiento del detector.**

Una vez sellado el detector, es necesario realizar una serie de pruebas a partir de las cuales se obtienen las características de funcionamiento del mismo. Una parte de estas pruebas se realizan directamente sobre el detector y otra parte son efectuadas mediante la calibración de la electrónica del sistema dentro del cual trabajará el MEPSICRON. A continuación se describen ambos tipos de pruebas.

#### **A. Caracterización del Detector.**

Las características más importantes que se deben determinar en el detector MEPSICRON son: respuesta espectral, eficiencia cuántica y resolución espacial. Además de estos parámetros, se realiza una prueba de control de calidad del detector conocida como homogeneidad en la respuesta. A continuación se explican cada una de estas pruebas.

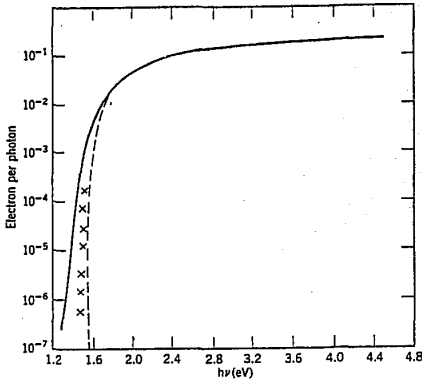
#### *Respuesta Espectral.*

La respuesta espectral del detector es el rango de longitud de onda de la luz que puede detectar. Como se vio en la sección anterior, este parámetro también se midió al momento de construir el fotocátodo, y básicamente deberá ser el mismo que el medido en el detector. Para obtener la respuesta espectral del detector, se utiliza un espectrofotómetro, mediante el cual se ilumina al detector con luz de diferentes longitudes de onda, con una intensidad luminosa conocida. Para cada longitud de onda se obtiene una respuesta del detector, expresada en [Amp/Watts]. De esta forma se construye una gráfica en la cual se tiene el rango de operación del detector. La respuesta espectral depende directamente del tipo de fotocátodo que se tenga. Como

se vio en el capítulo I, el MEPSICRON funciona con un fotocátodo tipo S-25, cuya fórmula es  $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ .

La curva de respuesta espectral del fotocátodo S-25 se muestra en la fig. IV.4. En el eje de las ordenadas se tienen unidades de electrón por fotón, las cuales representan la eficiencia cuántica del detector, misma que se explica a continuación.

Fig. IV.4.



Spectral response of  $(\text{Cs})\text{Na-KSb}$ . Solid line measured at room temperature, crosses measured at  $77^\circ\text{K}$ , dashed line theoretical curve (Spicer [347]).

### Eficiencia Cuántica.

La eficiencia cuántica del detector se define como la cantidad de electrones que son producidos por cada fotón incidente, dependiendo de la longitud de onda de la luz. Este parámetro se obtiene iluminando al detector con una cantidad constante de luz y midiendo la ganancia en las esquinas del ánodo resistivo. Cabe señalar que en este caso se mide la ganancia del detector y no la del fotocátodo explicada anteriormente. La eficiencia cuántica se expresa como electrones por fotón, para cada longitud de onda.



La eficiencia cuántica del MEPSICRON se puede determinar, para cada longitud de onda, a partir de una curva de respuesta espectral similar a la mostrada en la fig. IV.4.

#### *Resolución Espacial.*

La resolución espacial de un detector expresa la capacidad de este instrumento de poder resolver la visualización en pantalla del punto (pixel) del menor tamaño posible. En base a esto, la resolución espacial del detector se puede definir como la menor distancia que éste puede detectar entre dos eventos luminosos sucesivos y cercanos entre sí.

Para obtener la resolución del MEPSICRON, éste se ilumina con un patrón de franjas, de dimensiones específicas. Una vez obtenida la imagen en la pantalla del monitor, se determina el tamaño de ésta en función del número de pixeles que abarca. El tamaño del pixel del detector se encuentra dividiendo la dimensión de la franja original entre el número de pixeles de la imagen obtenida en pantalla. Cabe señalar que el valor del pixel del detector es independiente de la resolución propia del monitor utilizado. La resolución encontrada para el detector MEPSICRON es de  $42\mu$ .

La resolución espacial se mejora mediante la prueba de distribución de altura de pulsos, modificando el voltaje inverso que se tiene entre los dos arreglos de PMC's. Dicha prueba se explica en la sección de pruebas del detector.

#### *Homogeneidad en la Respuesta.*

La calidad del fotocátodo depende de que éste sea homogéneo en cuanto a espesor y composición en toda la superficie del sustrato de cuarzo. Una prueba cualitativa para determinar si el fotocátodo es homogéneo, consiste en iluminar la ventana del detector mediante un haz de luz constante y uniforme. La imagen obtenida en la pantalla del monitor deberá ser homogénea en toda su superficie, es decir, todos los puntos que componen a dicha imagen tendrán la misma intensidad de luz y el mismo color.

Sin embargo, para determinar con exactitud la homogeneidad del fotocátodo, es necesario realizar una prueba de carácter cuantitativo. Para ello, se mide la homogeneidad del fotocátodo en función de la respuesta del detector medida en el ánodo resistivo. Si el fotocátodo es homogéneo también lo será la respuesta.

Para realizar esta prueba se utiliza una fuente luminosa de intensidad conocida, la cual se coloca a una distancia determinada del detector. Previamente se calibra la fuente mediante un fotómetro, el cual se coloca a la misma distancia que el detector, y a partir del cual se obtiene la cantidad de luz por centímetro cuadrado que emite el foco (fuente luminosa).

Una vez calibrada la fuente luminosa, el MEPSICRON se coloca en la misma posición del fotómetro, junto con una pantalla que cubre la ventana del detector, la cual consta de un orificio de un centímetro cuadrado. De esta forma se ilumina al detector y se obtiene la respuesta colocando la pantalla en diferentes puntos de la ventana. La respuesta medida para cada punto

deberá ser aproximadamente la misma, sin embargo, siempre habrá pequeñas diferencias en la medición, asociadas con el proceso de construcción del fotocátodo. En este sentido, el objetivo de la prueba es obtener el "índice de variación" de la respuesta para cada punto del fotocátodo. Este índice estará en función del espesor y composición del fotocátodo para cada punto de su superficie. El índice de variación se obtiene tomando como referencia la respuesta medida en el centro del fotocátodo, donde se considera que se tiene la zona más homogénea del mismo. Este índice se utiliza para corregir las imágenes que se obtengan con el detector en el futuro.

### **B. Calibración de Electrónica del Sistema.**

A continuación se describen las pruebas más importantes que se realizan en el sistema dentro del cual funcionará el detector MEPSICRON. Como se estudió en el capítulo I, este sistema está compuesto principalmente por los preamplificadores y por el analizador de posición de eventos.

#### *Deformaciones Geométricas.*

Esta prueba se realiza calibrando la ganancia de los cuatro preamplificadores, los cuales se encuentran conectados en las esquinas del ánodo resistivo. Para realizar la calibración, se ilumina al detector con un patrón de franjas. Si la imagen obtenida en el monitor presenta deformaciones, significará que uno o más de los preamplificadores tiene mayor ganancia que los otros.

#### *Distribución de Altura de Pulsos.*

Con esta prueba se consigue mejorar la resolución de la respuesta del detector. Esto se logra variando el potencial inverso que existe entre los dos arreglos de PMC's, el cual oscila alrededor de -200 volts. Mediante la variación de este potencial se busca obtener, en la superficie del ánodo resistivo, una distribución de pulsos tipo gaussiana. Como se explicó en el capítulo I, el objetivo del potencial inverso es eliminar los electrones de baja energía, producto del ruido interno del detector.

Cuando se logra una distribución gaussiana en los pulsos que se miden en el ánodo resistivo, significa que se están eliminando la mayor parte de los electrones que no corresponden al fenómeno fotoemisivo, por lo que en este punto se tiene la mejor resolución del detector. Por otro lado, calibrando el analizador de posición de eventos, se eliminan a los electrones de muy alta energía, lo cual ayuda a que el sistema no se sature y su funcionamiento sea más estable.

#### IV.4. AVANCE EN LA CONSTRUCCION DEL MEPSICRON.

Actualmente se tiene completamente ensamblada la estructura interna del detector, así como el contenedor del mismo. Por lo tanto, la construcción del prototipo del detector MEPSICRON se encuentra en la etapa de sellado dentro de la cámara de vacío. Como se mencionó con anterioridad, esta etapa es complicada debido al sello hermético que se debe de lograr en el contenedor del detector. Como se explicó en el capítulo II, se pueden utilizar diferentes procesos de soldadura para lograr el sellado requerido, pero es necesario realizar diferentes experimentos con el fin de determinar el más adecuado.

Durante la realización de las diferentes pruebas de sellado se han construido los fotocátodos correspondientes, por lo que la técnica de construcción de éstos se ha llegado a perfeccionar notablemente.

El sello final del MEPSICRON se realizará una vez determinado el proceso más adecuado de soldadura blanda a emplear dentro de la cámara de vacío.

#### *BIBLIOGRAFIA DEL CAPITULO IV.*

1. Biberman, L. M. "Photoelectronic Imaging Devices, Volume 1: Physical Processes and Methods of Analysis", Plenum Press, New York, 1971.
2. Sommer, A. H. "Photoemissive Materials", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1968.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se expuso el diseño de un prototipo experimental del detector de imágenes MEPSICRON, basado en el detector comercial fabricado por ITT. Para el diseño se tomaron en cuenta principalmente aspectos de funcionamiento del detector, y una de las principales características de dicho diseño es la flexibilidad del prototipo, en base a la cual se pueden determinar los parámetros óptimos de funcionamiento del detector, mediante diferentes configuraciones de los elementos de la estructura interna del detector.

En el análisis de esfuerzos presentado en el capítulo III, se estableció que la parte más crítica del detector, al verse sometido a la acción de fuerzas externas, son las placas microcanales. Mediante dicho análisis, se determinó que las placas microcanales dentro del detector, no sufrirán fracturas si el MEPSICRON se somete a un despegue dentro de un cohete.

El análisis de esfuerzos no formó parte directamente del diseño del detector, pero en base a éste se estableció un método riguroso a partir del cual se obtuvieron parámetros que dieron información acerca del efecto de las vibraciones mecánicas sobre la estructura interna del detector.

En base a lo anterior, se tiene un prototipo experimental, cuyo diseño y análisis de esfuerzos servirán de plataforma para la obtención de un detector comercial, de características diferentes a las del presente diseño, pero las cuales se habrán determinado en base a la experimentación con el presente detector.

Algunas de las características que tendrá el modelo comercial del detector son las siguientes:

- Debido a que en base al modelo experimental se han obtenido los parámetros óptimos de funcionamiento, el modelo comercial no tendrá una estructura flexible.
- La estructura del detector será de diseño más compacto, con la obtención de una mayor resistencia y ahorro de materiales en su fabricación.
- El proceso de ensamble del detector comercial será menos laborioso y más eficaz, por lo que podrá ser automatizado para su fabricación a gran escala.

Por otro lado, la realización de este proyecto, muestra la gran importancia de la ingeniería mecánica, y especialmente el diseño mecánico, en la elaboración de proyectos científicos en áreas diferentes a la ingeniería, como lo es astronomía. En este sentido, esta tesis se presenta como un trabajo interdisciplinario, en donde se tiene estrecha interacción entre las dos áreas mencionadas.

## **APENDICES**

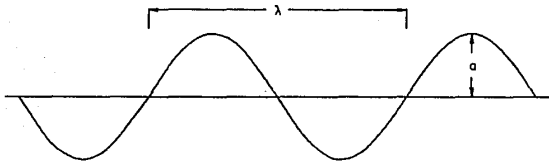
## APENDICE A

### RADIACION ELECTROMAGNETICA

Las ondas de radio, las ondas infrarrojas, la luz visible y los rayos X son tipos de radiación electromagnética. La radiación electromagnética viaja a través del espacio con movimiento ondulatorio (fig.1), por lo que tienen propiedades de ondas:

1. Longitud de onda " $\lambda$ " es la distancia entre dos puntos similares sobre dos ondas sucesivas (tal es la distancia entre dos máximos o dos mínimos).
2. La amplitud de onda " $a$ " es la altura de un máximo (o la profundidad de un mínimo). La intensidad o brillo de la radiación es proporcional al cuadrado de la amplitud.
3. En el vacío, todas las ondas, sin tener en cuenta la longitud de onda, se desplazan a la misma velocidad ( $2.9979 \times 10^8$  m/s). Esta es la velocidad de la luz " $c$ ".
4. La frecuencia de la radiación " $\nu$ " es el número de ondas que pasan por un punto dado en un segundo.

Fig. 1.



El espectro electromagnético conocido varía desde las frecuencias herzianas (ondas de radio), que son las de menor energía, hasta los rayos  $\gamma$ , que son los de mayor (fig.2). Las ondas de radio poseen longitudes de onda muy largas, las ondas infrarrojas (calor radiante) poseen longitudes de onda moderada y los rayos  $\gamma$  (producidos de la descomposición radioactiva) poseen longitudes de onda extremadamente cortas.

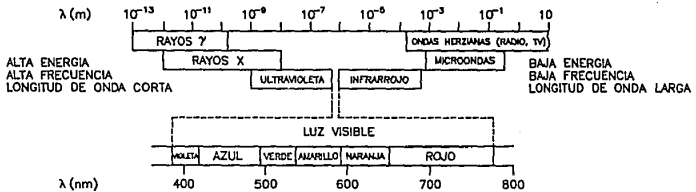
La teoría ondulatoria interpreta con éxito muchas propiedades de la radiación electromagnética, sin embargo, algunas otras propiedades requieren que esa radiación se considere formada por partículas. En 1900, Max Planck propuso la teoría cuántica para la energía radiante, sugiriendo que dicha energía puede ser absorbida o emitida solamente en cantidades definidas llamadas cuantos. La energía de un cuanto  $E$ , es proporcional a la frecuencia de la radiación  $\nu$ :

$$E = h\nu \quad (a.1)$$

en donde la constante de proporcionalidad  $h$  es la constante de Planck ( $6.6262 \times 10^{-34} \text{ J seg}$ ).

Puesto que la energía  $E$  y la frecuencia  $\nu$  son directamente proporcionales, una radiación de alta energía posee una frecuencia alta. Una frecuencia alta significa que un gran número de ondas pasan por un punto en un segundo. La longitud de onda de una radiación de alta energía, debe ser por consiguiente corta. Por otra parte, una radiación de baja energía tiene una frecuencia baja y una longitud de onda larga. En 1905 Albert Einstein propuso que los cuantos de Planck son paquetes discontinuos de energía, y actualmente son llamados fotones.

Fig. 2.



### Espectros Atómicos.

Cuando un rayo de luz atraviesa un prisma, el rayo se desvía o se refracta; el índice de refracción depende de la longitud de onda. Una onda de longitud corta se desvía más que una de longitud larga. Debido a que la luz blanca está formada por ondas con todas las longitudes de onda en el espectro visible, un rayo de luz blanca se esparce en una banda ancha llamada *espectro continuo*. El espectro es un arcoiris de colores sin espacios vacíos.

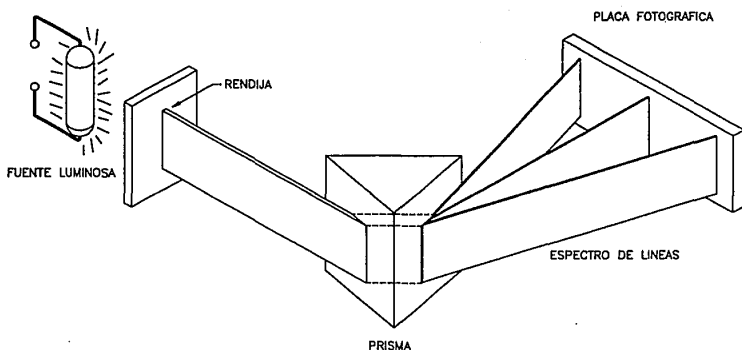
Cuando los gases o vapores de una sustancia química se calientan, se produce luz. Si un rayo de esta luz pasa a través del mismo prisma que en el caso de la luz blanca, se produce un espectro de líneas (fig. 3). Este espectro está formado por un número limitado de líneas coloreadas, cada una de las cuales corresponde a luz de diferente longitud de onda. El espectro de líneas de cada elemento es único.

Las frecuencias que corresponden a las líneas en la región visible del espectro de hidrógeno se representa por la siguiente ecuación:

$$v = \frac{c}{\lambda} = (3.289 \times 10^{15} \text{ [1/s]}) \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad (\text{a.2})$$

Esta relación conocida como serie de Balmer, propuesta por J.J. Balmer en 1885, fue derivada de observaciones experimentales y no se basó sobre ninguna teoría de la estructura atómica.

Fig. 3.





En 1913, Niels Bohr propuso una teoría para la estructura electrónica del átomo de hidrógeno en donde explicaba el espectro de líneas de este elemento. El átomo de hidrógeno contiene un electrón y un núcleo que está formado por un sólo protón. La teoría de Bohr incluye los siguientes puntos:

1. El electrón del átomo de hidrógeno puede existir solamente en ciertas órbitas esféricas (las cuales se llaman niveles de energía o capas de energía). Estos niveles se hallan dispuestos concéntricamente alrededor del núcleo y están designados por una letra ( $K, L, M, N, O, \dots$ ) o un valor de  $n$  ( $1, 2, 3, 4, 5, \dots$ ).

2. El electrón posee una energía definida y característica de la órbita en la cual se mueve. El nivel  $K$  ( $n=1$ ), es el nivel más cercano al núcleo y tiene el radio más pequeño. Un electrón en el nivel  $K$  tiene la menor energía posible. Con el aumento de la distancia del núcleo ( $K, L, M, N, O$ ;  $n=1, 2, 3, 4, 5$ ), el radio del nivel y la energía de un electrón en el nivel aumenta. El electrón no puede tener una energía que lo coloque entre los niveles permitidos.

3. Cuando los electrones de un átomo están lo más cerca posible del núcleo (para el hidrógeno, un electrón en el nivel  $K$ ), éstos se hallan en la condición de la energía más baja posible, llamado "estado fundamental o basal". Cuando los átomos se calientan, en un arco eléctrico por ejemplo, los electrones absorben energía y pasan a niveles exteriores, los que son estados energéticos superiores. Se dice entonces que los átomos están en "estado de excitación".

4. Cuando un electrón vuelve a un nivel inferior, emite una cantidad definida de energía. La diferencia de energía entre el estado de energía superior y el estado de energía inferior es emitida en la forma de un cuanto de luz. El cuanto de luz tiene una frecuencia y longitud de onda características y produce una línea espectral característica. En estudios espectrales, muchos átomos absorben energía al mismo tiempo que otros la emiten. Cada línea espectral corresponde a una transición electrónica diferente. Bohr derivó una ecuación para la energía que tendría un electrón en cada órbita, esta ecuación es:

$$E_{\text{orbit}} = -\frac{(2.179 \times 10^{-18} \text{ J})}{n^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{a.3})$$

Indicaremos la energía de un electrón en un nivel exterior ( $n_o$ ) con  $E_o$  y la energía de un electrón en un nivel interno ( $n_i$ ) con  $E_i$ . Cuando un electrón pasa de un nivel exterior a uno interior ( $E_o - E_i$ ), se desprende como un fotón de luz. De acuerdo a la ecuación de Planck, la energía del fotón es igual a  $h\nu$ , por consiguiente:

$$h\nu = E_o - E_i \quad (E_o \rightarrow E_i) \quad (\text{a.4})$$

$$h\nu = \frac{(-2.179 \times 10^{-18} \text{ J})}{n_o^2} - \frac{(-2.179 \times 10^{-18} \text{ J})}{n_i^2}$$

$$h\nu = (2.179 \times 10^{-18} \text{ J}) \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_o^2} \right) \quad (\text{a.5})$$

puesto que  $h = 6.626 \times 10^{-34}$

$$\nu = (3.289 \times 10^{15} \text{ } 1/\text{s}) \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_o^2} \right) \quad (\text{a.6})$$

Las líneas producidas por transiciones electrónicas al nivel  $n=2$  de estados superiores están descritas por la ecuación:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = (3.289 \times 10^{15} \text{ } [1/\text{s}]) \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad (\text{a.7})$$

donde se puede observar que es la ecuación (a.7) es la misma que la ecuación derivada por Balmer (a.2), a partir de datos experimentales.

## APENDICE B

### PROCESOS Y TEORIA DE SOLDADURA

#### *B.1. Teoría General de Soldadura.*

La soldadura es un proceso de unión de metales mediante la aplicación de calor y/o presión, el proceso puede ser complementado por la adición de un metal de relleno (aporte). El metal de relleno debe ser afin estructuralmente con los metales base para lograr que la unión sea satisfactoria. Es muy importante que al efectuar alguna unión por soldadura tanto los metales a unir como los metales de relleno estén libres de suciedad, polvo, grasas y aceites.

En teoría, en un buen trabajo de soldadura las propiedades mecánicas en la unión deberán ser las mismas que las del material base. Sin embargo, al soldar se tiene un efecto de calentamiento en la zona cercana al cordón de metal fundido la cual es nociva para la pieza. Esta región se conoce como "zona afectada por el calor" (heat affected zone).

La forja es uno de los procesos de soldadura más antiguos que existe. Consiste en calentar dos metales al rojo vivo, se les aplica un fundente y la unión es complementada al martillar las piezas de trabajo sobre un yunque lográndose la soldadura por la presión de los golpes.

Se tiene un gran número de procesos de soldadura, los cuales pueden clasificarse de acuerdo a la temperatura alcanzada en el proceso:

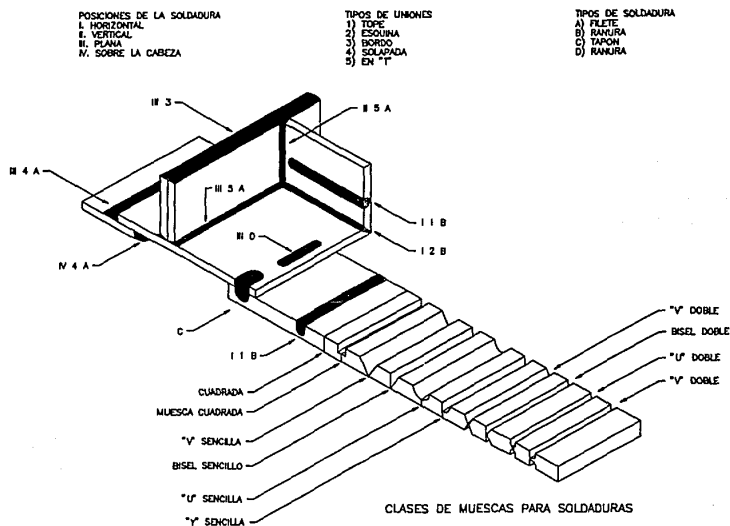
*a.* Aquellos procesos en los cuales para lograr la unión es necesario la fusión de los metales base, y en caso de existir metal de relleno este fundirá a una temperatura muy semejante que la del metal base. Entre este grupo se encuentran la soldadura por arco eléctrico, la soldadura por gas y la soldadura por rayo energético.

*b.* Aquellos procesos de soldadura en los cuales la unión se logra en condiciones plásticas del metal base y no se usan metales de relleno. Generalmente los metales base están sometidos a presión. Tal es el caso de la soldadura por resistencia y soldadura en estado sólido.

*c.* Aquellos procesos en los cuales nunca se alcanza la temperatura de fusión de los metales base, pero la unión la realiza un metal de relleno con temperatura de fusión inferior a la de los metales base, el cual es depositado en una muesca o ranura maquinada en los metales base. Entre este tipo de procesos se encuentran la soldadura al latón, la soldadura fuerte o dura y la soldadura blanda.

Los tipos principales de muescas, uniones y cordones que son comúnmente usados en soldadura se muestran en la figura 1. El tipo de muesca determina el tipo de unión y el tipo de cordón entre las piezas.

Fig. 1.



### B.2. Diseño de Soldaduras en Función a la Resistencia Mecánica Requerida.

Las propiedades mecánicas que se requieren en la zona del cordón de soldadura deberán ser casi las mismas que las del metal base, a excepción de aquellas piezas que estarán sometidas a fatiga, en este caso la unión debe tener una mayor resistencia que el metal base. Esto se logra añadiendo metal de aporte con propiedades mecánicas superiores a las del metal base.

Lo anterior no es regla para los procesos de soldadura con latón, soldadura dura y soldadura blanda, ya que los metales de aporte usados para estos tipos de soldadura son de baja resistencia mecánica, por lo que cualquier pieza que contenga alguna soldadura de este tipo no debe ser sometida a esfuerzos muy grandes y/o temperaturas elevadas por el bajo punto de fusión del metal de aporte.

### B.3. Metalurgia de la Soldadura.

El calor empleado para soldar afecta a la microestructura y a la composición del metal base tanto en la zona del cordón como en las zonas cercanas a éste. Al haber expansiones y contracciones en el metal base, producto de la transferencia de calor, se crean esfuerzos residuales en el metal.

En cualquier soldadura se observan tres regiones completamente bien definidas:

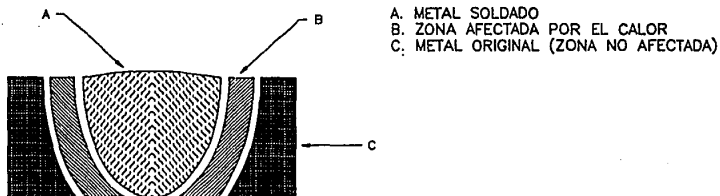
i. La masa central representa al metal que ha sido fundido, la cual tiene la estructura típica de una pieza fundida, lo que es en esencia. Al solidificarse, el metal se enfría de afuera hacia dentro, por lo que los cristales crecen hacia dentro. En el caso de la soldadura de una aleación, o bien al usar metal de aporte, puede ocurrir la segregación de los constituyentes. El enfriamiento lento o el recocido subsecuente mejoran la homogeneidad y la resistencia.

ii. La segunda zona la constituye el metal base adyacente al metal fundido. Al efectuarse la soldadura, esta zona se calienta por encima de la temperatura crítica. Debido al calentamiento se forma una estructura granular más gruesa, lo cual es indeseable (la estructura granular fina tiene mayor tenacidad que la gruesa, ya que los granos finos ofrecen un mayor número de puntos de resistencia al resbalamiento).

iii. En la tercera zona se encuentra el metal base original sin haber sufrido alteración alguna.

Mientras más endurecible sea un metal, mayor cuidado debe tenerse al enfriar. El endurecimiento provocado por un enfriamiento repentino puede causar fracturas en la zona del cordón (ver fig.2.).

Fig. 2.



#### *B.4. Tipos de Procesos de Soldadura.*

Como ya se indicó, existen varios tipos de procesos de soldadura, los cuales difieren entre sí en la forma de lograr la temperatura necesaria y otros parámetros relacionados a la forma de lograr la unión. A continuación se dará una breve explicación de cada uno de ellos.

##### *B.4.1. Soldadura con Arco Eléctrico.*

La soldadura con arco eléctrico se obtiene al aplicar calor al metal de trabajo por medio de un arco eléctrico, este arco es formado por un electrodo y el metal de trabajo, o bien, por dos electrodos cuyas terminales forman un circuito eléctrico. En el proceso se puede tener aplicación de presión y metal de aporte.

Aparte del arco eléctrico, se tiene una mezcla de gas ionizado, el cual se conoce como plasma. La función del plasma es el proteger al metal fundido y al electrodo de la contaminación de los gases atmosféricos a la vez que contribuye con la transferencia de calor entre el arco eléctrico y el metal de trabajo. El gas protector puede ser inyectado alrededor del arco eléctrico, o bien el electrodo puede contar con un revestimiento el cual al reaccionar libera a este gas protector. Otro tipo de protección consiste en verter un fundente formador de escoria la cual también protege al metal fundido.

##### *B.4.1.1. Corriente Eléctrica para Soldar.*

Es muy común el empleo de la corriente directa para realizar trabajos de soldadura porque esta puede hacer frente a todas situaciones y trabajos, la corriente directa suministra un arco estable por lo que es preferida para ejecutar trabajos difíciles. Existen dos tipos de corriente directa para efectuar un trabajo los cuales son:

*i. Corriente directa con polaridad directa.*

*ii. Corriente directa con polaridad inversa.*

En el tipo de corriente directa con polaridad directa el electrodo es conectado al polo negativo (cátodo) de la fuente de poder y el metal de trabajo es conectado al polo positivo (ánodo), de modo que los electrones fluyen del electrodo hacia el metal de trabajo.

Debido a que un 70% del total de calor es generado en el polo positivo (ánodo), existe una mayor transferencia de calor hacia el metal base que usando polaridad inversa. La soldadura obtenida mediante este tipo de corriente es de penetración profunda, buena calidad y un cordón angosto de soldadura, por lo que normalmente es utilizada para soldar piezas de grueso espesor.

En la corriente directa con polaridad inversa el electrodo es conectado al polo positivo de la fuente de poder y el metal de trabajo al polo negativo, así el flujo de electrones será de el metal

de trabajo hacia el electrodo, generándose mayor cantidad de calor en el electrodo que en el metal de trabajo, esto da lugar a que con el mismo nivel de corriente se tenga que emplear un electrodo de mayor calibre cuando se usa polaridad inversa que cuando se usa polaridad directa. Con este tipo de corriente se obtienen soldaduras de no muy buena calidad, poca profundidad y de ancho cordón, siendo por este motivo y por generar temperaturas de trabajo inferiores a las de corriente alterna y corriente directa con polaridad directa la menos usada. Aunque tiene como propiedad la de remover óxidos incrustados en la superficie de los metales de trabajo. La capacidad de remover óxidos radica en lo siguiente:

Debido al campo eléctrico generado por el arco, las moléculas del gas protector son ionizadas, dichas moléculas cargadas positivamente al tener cierta masa y por la acción del campo eléctrico son aceleradas hacia el polo negativo (adquieren energía cinética). Al chocar las moléculas con el polo negativo (que en caso de usar polaridad inversa es el metal de trabajo) desprenden los óxidos incrustados en la superficie de trabajo.

Las moléculas cargadas producen poco calor en comparación al producido por los electrones que son acelerados hacia el polo positivo (el electrodo al usar polaridad inversa), por esta razón al usar polaridad directa se tiene un calentamiento mayor en el metal de trabajo.

El tercer tipo de corriente utilizada para soldar con arco es la corriente alterna, la cual es menos empleada, aunque se ha visto incrementado su uso debido a que el equipo requerido es más sencillo que el usado para corriente directa; la principal desventaja del equipo de corriente alterna es la inaccesibilidad para efectuar trabajos en cualquier lugar.

La corriente alterna puede ser representada por una serie de pulsos alternantes de corriente directa con polaridad directa y corriente directa con polaridad inversa. Al emplear corriente alterna se tiene buena penetración y tiene la propiedad de reducir óxidos, aunque en menor escala que la corriente directa con polaridad inversa. Puede decirse que la corriente alterna es un punto intermedio entre los dos tipos de corrientes anteriormente descritos.

#### *B.4.1.2. Máquinas para Soldar con Arco Eléctrico.*

Los generadores eléctricos fueron durante mucho tiempo la única fuente y siguen siendo un medio importante de producir corriente directa para efectuar soldaduras. El generador puede accionarse con un motor eléctrico o con uno de combustión interna.

Otro medio para producir corriente directa consiste en convertir la corriente alterna y reducir su voltaje por conducto de un rectificador de selenio o de silicio.

La corriente alterna para ser usada en equipo de soldar emplea únicamente un transformador.

### *B.4.1.3. Tipos de Procesos de Soldadura por Arco Eléctrico.*

Existen varios tipos de soldadura por arco eléctrico, aunque el principio de operación es el mismo. Las principales diferencias entre los tipos de soldadura por arco eléctrico radican en el tipo de protección para evitar la contaminación y el tipo de electrodo usado. Los principales procesos de soldadura por arco eléctrico son:

- i. Soldadura con arco eléctrico sin inyección de gas roductor.
- ii. Soldadura con arco eléctrico con inyección de gas protector. Entre este grupo se encuentran los procesos TIG y MIG.

#### *B.4.1.3.1. Soldadura con Arco Eléctrico sin Inyección de Gas Protector.*

Este tipo de soldadura por arco eléctrico emplea electrodos revestidos y puede ser aplicado con corriente directa o corriente alterna. Se emplea para soldar aceros aleados, aceros inoxidables y en menor grado metales no ferrosos. El electrodo tiene forma de alambón y es sujetado en uno de sus extremos por una pinza que es una de las terminales de la fuente de poder, la otra terminal es conectada a la pieza de trabajo por otra pinza igual a la que sujeta al electrodo. El arco eléctrico es iniciado al tocar la parte del electrodo con la pieza de trabajo.

La protección contra la contaminación ambiental es dada por el revestimiento del electrodo, el cual tiene las siguientes aplicaciones:

1. facilitar el establecimiento y mantenimiento del arco eléctrico
2. proteger al material fundido del gas atmosférico
3. proveer al material fundido elementos aleantes no contenidos en el electrodo, los cuales benefician la soldadura
4. aportar elementos que ayudan al incremento de la fluidez del metal fundido y,
5. aislar al electrodo eléctricamente

El revestimiento contiene los siguientes compuestos:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Existen varios tipos de electrodos de acuerdo a su composición:

1. Electrodos revestidos de acero suave (mild steel).
2. Electrodos revestidos de acero de baja aleación.
3. Electrodos revestidos de acero aleado con cromo y acero aleado con cromo y níquel.



4. Electrodo revestidos de cobre y aleaciones de cobre.
5. Electrodo revestidos de níquel y aleaciones.
6. Electrodo de aluminio y aleaciones.

*B.4.1.3.2. Soldadura con Arco Eléctrico Electrodo de Tungsteno y Cubierta Protectora de Gas (TIG, gas-tungsten-arc welding).*

En el proceso de soldadura por arco eléctrico TIG, el arco es generado por un electrodo de tungsteno no consumible y la pieza de trabajo, los cuales son protegidos de la contaminación por un gas inerte.

Se puede usar material de aporte y es introducido en forma de varilla, alambre y/o pastilla. Los electrodos de tungsteno también varían de acuerdo a los elementos aleantes que se tengan. Se tienen tres grupos de electrodos de tungsteno, el primer grupo son los electrodos de tungsteno puro, el segundo grupo son los electrodos de tungsteno aleados con torio y el tercer grupo son los electrodos de tungsteno aleados con zirconio.

Los electrodos de tungsteno toriados tienen la propiedad de no fundirse al pasar una alta corriente, esto evita la contaminación de las piezas a soldar por inclusiones del electrodo. Cuando se excede el nivel de corriente límite el electrodo toriado se fractura pero no se funde. También el torio contribuye a que este tipo de electrodos soporte una mayor cantidad de corriente que un electrodo de tungsteno puro, y quizá la mayor ventaja es que en algún contacto accidental entre el electrodo y el metal base fundido, ninguno de los dos se contamina, siempre y cuando sea un contacto breve.

Los electrodos de tungsteno aleados con zirconio tienen propiedades similares a los electrodos toriados, aunque se emplean únicamente con corriente alterna.

Entre los gases protectores usados para soldar con TIG se tienen el argón, helio, nitrógeno y mezclas de estos con hidrógeno. El arco obtenido bajo una atmósfera de argón es más suave y estable que el obtenido por otro gas, aunque es el tipo de arco con menor transferencia de calor. A un mismo nivel de corriente el arco con helio emite una tercera parte más de calor que el total que emite el arco con argón. Se suelen hacer mezclas de argón con helio para combinar propiedades.

Es común combinar argón con hidrógeno para soldaduras muy específicas, sobre todo en aquellos metales en los que se tiene el problema de generar poros al soldarse, además de que aumenta el calor suministrado por el arco eléctrico.

El nitrógeno es usado para soldar cobre y sus aleaciones para lo que se necesita una gran cantidad de calor. Dicho gas aumenta el voltaje del arco y por ende, la cantidad de calor suministrada. La transferencia de calor es mucho mayor que al emplear helio o argón.

El gas protector en cualquier proceso de soldadura por arco debe de tener el mínimo posible de humedad, ya que la humedad es causante de formación de masas de óxido en el metal fundido, las cuales impiden la visibilidad y al solidificarse, la soldadura tendrá una apariencia rugosa e irregular.

Con el proceso de soldadura eléctrica TIG se obtienen uniones de magnífica calidad y es muy usado, gracias a su confiabilidad, para soldar piezas de aparatos aeroespaciales. Además este tipo de soldadura TIG es excelente para unir metales no ferrosos.

Es muy importante que cualquier proceso de soldadura por arco eléctrico sea realizado en lugares cerrados, libres de cualquier ráfaga de viento, ya que estas podrían remover al gas protector de la zona del cordón, contaminando así el metal fundido.

#### *B.4.1.3.3. Soldadura con Arco Eléctrico con Electrodo Metálico y Protección Gaseosa (MIG, gas-metal-arc welding).*

En la soldadura con arco eléctrico MIG el electrodo tiene doble función: establece el arco eléctrico y es también el metal de aporte. El proceso incluye la protección de la zona del metal fundido por medio de inyección de un gas que puede ser argón, helio, bióxido de carbono o una mezcla de estos, y también como el proceso TIG es preferible realizarlo en un lugar cerrado.

Al igual que en los otros procesos de soldadura por arco eléctrico, para el proceso de soldadura MIG se cuenta con una gran diversidad de electrodos que serán usados según los metales a unir y los requerimientos de la unión:

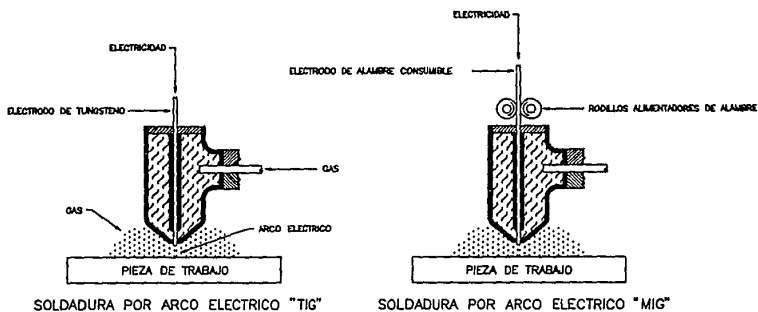
- Electrodos de acero suave
- Electrodos de acero de baja aleación
- Electrodos de cromo, níquel, molibdeno y vanadio.

Con este proceso es posible soldar: aluminio, magnesio, acero inoxidable, cobre y níquel (ver fig. 3.).

#### *B.4.2. Soldadura con Gas.*

La soldadura con gas se efectúa quemando un gas combustible con aire u oxígeno puro en una flama concentrada que genera altas temperaturas. La flama caliente y funde tanto al metal base como al metal de aporte teniendo así la unión. Con este proceso pueden soldarse la mayoría de los metales y se logran soldaduras de muy buena calidad.

Fig. 3.



El acetileno es el gas hidrocarburo más usado, aunque se está empezando a usar algunas mezclas de gas metilacetileno y propadieno (MAPP), hidrógeno, propano, butano y gas de iluminación natural.

El acetileno es el gas que genera mayores temperaturas, debido a que este gas contiene una mayor cantidad de carbono disponible para la combustión que otros.

La principal desventaja del acetileno es su explosividad. No puede ser almacenado a presiones mayores a  $1.0545 \text{ Kg/cm}^2$  (15 psi), aunque disuelto en acetona soporta presiones mayores a  $14.05 \text{ Kg/cm}^2$  (200 psi).

El metilacetileno y propadieno es comparable al acetileno por su desempeño, pero es menos peligroso que el acetileno, pudiéndose almacenar sin correr riesgos a presiones superiores que 200 psi en tanques sencillos y usarse en chorros de alta presión.

De acuerdo a la relación de combustión (combustible-comburente) se pueden tener tres diferentes tipos de flama:

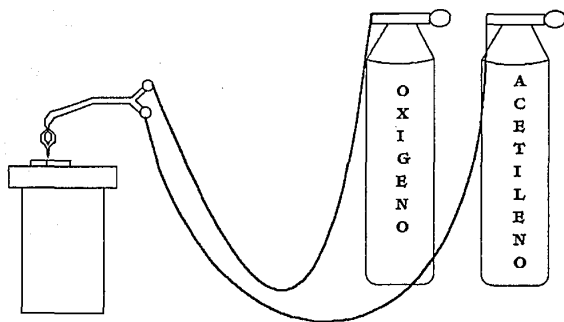
a. *Flama neutra.* Es aquella en que el oxígeno y el gas combustible se mezclan y consumen completamente, por lo que se tiene una reacción estequiométrica. Este tipo de flama no tiene tendencia a reaccionar con los metales que se sueldan.

*b. Flama carburante.* Se caracteriza por la carencia de oxígeno en la reacción, por lo que cierta cantidad de gas combustible no es quemado. Este tipo de flama es reductora.

*c. Flama oxidante.* En este tipo de flama se asegura una combustión completa y temperaturas más altas, pero tiende fuertemente a oxidar los metales base, por lo que es muy usada para el proceso de corte de metales con flama.

El equipo de soldadura con gas consiste en dos tanques, uno que contiene al gas combustible y otro al oxígeno, un soplete donde se realiza la mezcla de los dos gases y en la punta del soplete se tiene la flama, mangueras que comunican a los tanques con el soplete y además se cuenta con dos válvulas para regular el flujo de los gases (ver fig. 4.).

**Fig. 4. Equipo para Soldadura con Gas.**



### B.4.3. Soldadura a Resistencia.

En los procesos de soldadura por resistencia la unión es producida por el calentamiento de las piezas a soldar al actuar como resistencias al flujo de una alta corriente. Las piezas a soldar son sometidas a presión por dos electrodos que además son las terminales eléctricas.

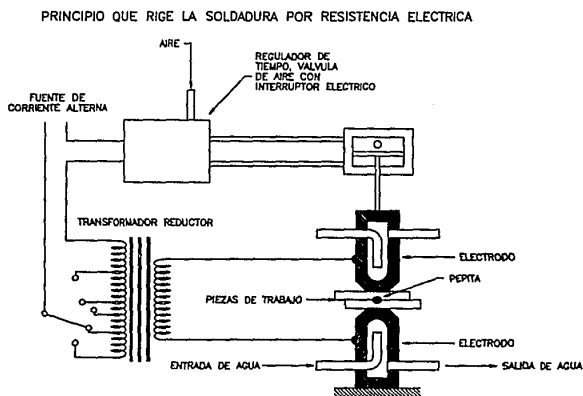
Las piezas se funden en la superficie de contacto debido a que en este sitio existe mayor resistencia al flujo de corriente a consecuencia de la interfaz entre las dos caras, por lo que en esta zona es donde se genera mayor calor. Este proceso no necesita el empleo de material de aporte y se pueden soldar materiales iguales y desiguales.

La soldadura con resistencia se efectúa con corriente alterna procedente de la línea, reducida a través de transformadores y aplicada durante un cierto tiempo por un dispositivo regulador de tiempo.

Los electrodos empleados para este tipo de soldadura deben tener una alta conductividad eléctrica y térmica. Los cuales pueden ser de cobre aleados con tungsteno o molibdeno.

Como el calor es generado en aquellos sitios de mayor resistencia, debe tenerse un especial cuidado en la interfaz existente entre el electrodo y el metal a soldar. Las superficies de contacto deben estar perfectamente limpias para tener la menor resistencia posible, ya que esta interfaz constituye un punto desfavorable para el proceso, generándose una zona calor no deseada. Además, una buena limpieza ayuda a conservar en buen estado los electrodos (ver fig.5.).

Fig. 5.



#### ***B.4.3.1. Tipos de Soldadura a Resistencia.***

Existen varios tipos de soldadura a resistencia, entre los que se encuentran: soldadura por puntos, soldadura por proyección, soldadura por costura, soldadura a recalado, soldadura a tope, soldadura con destello y soldadura a percusión.

##### ***B.4.3.1.1. Soldadura a Resistencia por Puntos.***

En este tipo de soldadura, los metales de trabajo son oprimidos por dos electrodos con extremos reducidos, la corriente fluye de manera intermitente a través de los electrodos, mientras que la presión para forjar es mantenida durante el proceso. Esta operación se repite en una serie de puntos a lo largo de un empalme.

Al estudiar la zona de soldadura, se puede observar una masa o pepita metálica incrustada uniendo las dos láminas.

##### ***B.4.3.1.2. Soldadura a Resistencia por Proyecciones.***

Se realiza de la misma manera que la soldadura por puntos pero la corriente se concentra en los puntos de unión por medio de proyecciones preformadas en la pieza de trabajo. Los electrodos son relativamente grandes, por lo que estarán sometidos a bajas densidades de corriente prolongando así su vida útil.

##### ***B.4.3.1.3. Soldadura a Resistencia por Costura.***

La soldadura a resistencia por costura está formada por una serie de soldaduras por puntos que se sobreponen, o quedan empalmados a espacios cortos. La soldadura a resistencia por costura se realiza pasando los metales a soldar entre electrodos, los cuales tienen forma cilíndrica. Se aplica un refrigerante para conservar los electrodos y enfriar los metales de trabajo.

#### ***B.4.4. Soldadura con Latón, Soldadura Dura y Soldadura Blanda.***

Estos tres tipos de soldadura son muy parecidas entre sí, la ligadura se logra mediante la deposición de metal de aporte en una muesca o ranura hecha en las piezas a soldar y no es necesaria la fusión de los metales base. Existen varias formas de generar el calor necesario para fundir el metal de aporte:

- a. mediante un horno de gas o eléctrico
- b. mediante un soplete, análogo al proceso de soldadura con gas
- c. mediante un inductor de corriente

d. mediante un proceso similar al de soldadura por resistencia.

e. y mediante un proceso de inmersión de las piezas a unir en un recipiente que contiene al metal de aporte fundido.

#### *B.4.4.1. Soldadura con Latón.*

Conocida también como soldadura al bronce, consiste en la fusión y deposición de un metal de aporte en una ranura, filete, tapón, muesca, existente entre dos piezas para formar la unión. El metal de relleno es una aleación de cobre con un punto de fusión más bajo que el del metal de trabajo. El metal de relleno se deposita en la junta y no se distribuye por capilaridad como sucede en el caso de la soldadura dura. Los metales de alto punto de fusión como el acero, hierro colado y cobre se pueden soldar mediante este proceso.

La fusión del metal de relleno puede ser a través de una flama oxiacetilénica o con un arco eléctrico, y es aplicado por medio de una varilla o un electrodo en combinación de un fundente apropiado. Las principales ventajas de la soldadura con latón se basan en la baja temperatura en que se efectúa la operación, es decir, se necesita poco calor y la unión puede hacerse más rápida que muchos procesos de soldadura por fusión. El metal de relleno cede sustancialmente al enfriarse y los esfuerzos residuales son poco intensos. Por este método es muy usual soldar metales disimilares.

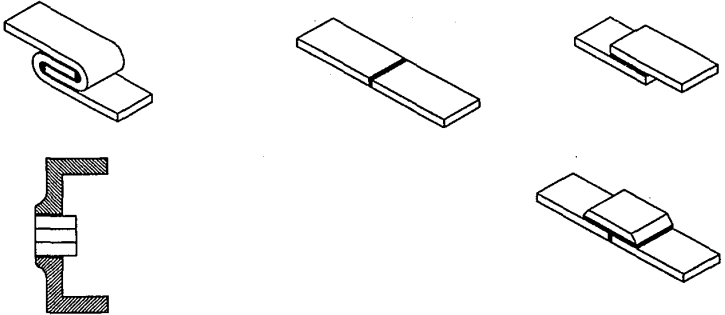
Debido al bajo punto de fusión y baja resistencia mecánica del metal de aporte, las uniones soldadas por este método no rinden un servicio satisfactorio a temperaturas superiores a 260°C, ni al estar expuestas a cargas dinámicas mayores a 1,054.5 Kg/cm<sup>2</sup> (15,000 psi).

#### *B.4.4.2. Soldadura Fuerte o Dura.*

Se da este nombre a un grupo de operaciones de soldadura, en que un metal de relleno no ferroso se funde a una temperatura inferior a la de fusión del metal base, pero existe un calentamiento por encima de 427°C. El metal de relleno es fundido y fluye por capilaridad entre las superficies de contacto de las piezas que se van a unir. (ver fig. 6).

Las aleaciones de cobre y las de plata son dos clases de metales de relleno para ejecutar la mayoría de los trabajos de soldadura fuerte. Una excepción es el aluminio, el cual se suelda mediante aleaciones de aluminio que funden a temperaturas inferiores a las del metal base. Entre las aleaciones de cobre más usadas se encuentran las de cinc, estaño, níquel, fósforo y plata, y entre las aleaciones de plata se encuentran las de cobre, cinc, cadmio, estaño, manganeso, níquel y fósforo.

**Fig. 6.**



UNIONES TÍPICAS HECHAS CON SOLDADURA FUERTE

El calentamiento requerido para efectuar una soldadura fuerte puede ser suministrado mediante un soplete o por un horno, ya sea de resistencias eléctricas o bien de inducción. El acero, cobre, latón, bronce y el aluminio se sueldan por este método, pero no es posible utilizar este método con buenos resultados al acero endurecido ni a algunas aleaciones de aluminio.

#### *B.4.4.3. Soldadura Blanda.*

Este proceso de soldadura es utilizado para unir metales por medio de aleaciones que funden entre  $177^{\circ}\text{C}$  y  $371^{\circ}\text{C}$ , generalmente se usan aleaciones base plomo y estaño. Este método es frecuentemente utilizado para soldar hierro, cobre, níquel, plomo, estaño, cinc y muchas de sus aleaciones. El aluminio puede soldarse con cuidados especiales.

La soldadura blanda es de baja resistencia, y está limitada a temperaturas de servicio inferiores a  $150^{\circ}\text{C}$ . Para realizar alguna soldadura de este tipo se necesita un fundente, el cual tiene la finalidad de despojar los óxidos existentes en la superficie de trabajo, con esto se promueve humectación y se obtiene un contacto estrecho entre el metal de aporte y el metal base. Por lo general se aplica primero el fundente, a continuación se calientan los metales a unir a una temperatura apenas por encima del punto de fusión del metal de aporte y por último se acerca el metal de relleno al punto de unión, fundiéndose y fluyendo en la unión. Se puede utilizar cualquier



fuentes limpias de calor ya sea un caudín, un soplete de alcohol o gasolina, hornos a resistencias o inducción y la inmersión de los metales a soldar a un baño de soldadura fundida.

#### *B.4.5.1. Soldadura por Rayo Energético.*

En el proceso de soldadura por rayo energético se encuentra la soldadura con haz de electrones y la soldadura con rayo láser.

##### *B.4.5.1.1. Soldadura con Haz de Electrones.*

La soldadura con haz de electrones se basa en dirigir un haz de electrones concentrado hacia la pieza de trabajo. El haz de electrones es formado por el calentamiento de un filamento de tungsteno o de tantalio al pasar una corriente eléctrica en un ambiente de alto vacío. El propósito del alto vacío es proteger al filamento de la oxidación y evitar la dispersión del rayo electrónico. Los electrones suministran la energía necesaria para lograr la unión, la cual es cincuenta veces más poderosa que la introducida por medio de un proceso por arco eléctrico. Esto último da la propiedad a la soldadura con haz de electrones de soldar con relativa facilidad metales de alto punto de fusión. Las soldaduras realizadas por este método pueden confinarse a sitios poco profundos o prolongarse hasta profundidades de seis pulgadas, con una relación ancho-profundidad de veinticinco a uno, en comparación con la relación de uno a uno logrado por otras técnicas de fusión, esto significa que es posible confinar la licuación del metal a límites bastante angostos, y como el proceso es tan rápido la zona afectada por el calor es mínima. La tasa de aplicación de soldadura es elevada y el tamaño de grano permanece pequeño. Además se logran soldaduras de mayor resistencia comparada con otros procesos de soldadura.

Las desventajas de este proceso radican en la sofisticación del equipo que permite mantener al haz de electrones perfectamente alineado y la dificultad que representa el mantener el nivel de vacío requerido en los casos que la pieza de trabajo se introduce en una cámara de vacío para efectuar la soldadura. En el caso de efectuar el proceso fuera de la cámara de vacío se tienen como principales inconvenientes la dispersión del haz de electrones al interactuar con el gas atmosférico, esto contribuye de manera amplia a la necesidad de incrementar la energía del haz de electrones, además que las piezas de trabajo pueden contaminarse por el gas atmosférico.

##### *B.4.5.1.2. Soldadura con Rayo Láser.*

El segundo proceso de soldadura por rayo energético consiste en el uso de un rayo láser (acrónimo de light amplification by stimulated emission of radiation).

Existen dos técnicas para soldar con láser. La primera consiste en hacer avanzar la pieza de trabajo tan rápido, que un empalme completo pasa y es soldado por medio de un sólo estallido. El segundo método consiste en fundir una serie de puntos por sobrelapado.

Las ventajas de la soldadura con rayo láser estriban en la precisión de control que se tiene en la energía del rayo. Una pulsación puede tener tan alta energía (1500 joules) que sería suficiente para evaporar casi cualquier metal, por ende no es necesario un medio de alto vacío para efectuar el proceso como sucede en el proceso de soldadura por haz de electrones.

El tiempo en el cual se efectúa el proceso es tan corto que no hay necesidad de tener protección alguna contra la contaminación atmosférica. Se logran soldaduras muy angostas y se tiene la ventaja de que el láser puede viajar a través de grandes longitudes sin sufrir dispersión, lo cual hace posible uniones en aquellos lugares que son inaccesibles por otros medios. La principal desventaja de este método estriba en la ineficiencia del láser por lo que las uniones a realizar quedan confinadas a espesores no mayores de 1/4 pulg.

### *B.5.2. Soldaduras en Estado Sólido.*

En los procesos de soldadura en estado sólido, conocidos también como soldaduras a presión, la unión es lograda al aplicar a las piezas de trabajo la presión suficiente para remover óxidos, y por lo tanto lograr un contacto íntimo entre las superficies de contacto, consiguiendo así que los átomos se difundan. Si aunado a esto las piezas a soldar son calentadas, la unión se facilita de manera considerable. La forja cae dentro de esta clasificación.

Este principio es usado para procesos modernos de soldadura tales como la soldadura por fricción, soldadura por ultrasonido, soldadura por explosión y soldadura por difusión.

#### *B.5.2.1. Soldadura por Fricción.*

En la soldadura por fricción se presionan los extremos de los metales a unir, uno de los cuales se mantiene inmóvil y el otro se hace rotar mediante un volante de inercia. La presión y la fuerza de fricción presentes en las superficies de trabajo generan el calor suficiente para efectuar la unión.

Este tipo de soldadura es aplicable a una gran cantidad de metales y metaloides presentes en pares similares o bien para soldar dos metales de diferente composición. Se debe trabajar en secciones esencialmente redondas (3/16 hasta 4 pulg). El tiempo de operación es tan corto que la zona afectada por el calor es casi nula, por lo que la unión resultante es limpia, muy fuerte y tan uniforme que parecería que se trata de un sola pieza.

#### *B.5.2.2. Soldadura por Ultrasonido.*

Es posible unir dos piezas si se oprimen una contra la otra y se hacen vibrar a frecuencias ultrasónicas, en dirección paralela a la superficie de contacto. Las vibraciones desencajan de las superficies de contacto películas de suciedad y recubrimientos superficiales, para establecer la unión íntima de los metales en contacto las superficies se calientan, produciéndose así la ligadura. El proceso es muy ventajoso para unir alambres delgados y láminas delgadas de metales blandos,

ya que no existe fusión, no existe zona afectada por el calor y es fácil soldar metales disimilares.

#### *B.5.2.3. Soldadura por Explosión.*

La soldadura por explosión consiste en unir dos piezas impulsándolas una contra la otra mediante una explosión. Las piezas se colocan a poca distancia entre sí formando un ángulo, de manera que choquen a lo largo de una línea de avance al golpearse por la explosión. Las altas presiones generadas por la explosión, obligan a que se aproximen rápidamente las superficies que establecen el contacto, adelantándose al punto donde ocurre la colisión y se mezclan estrechamente para formar una ligadura uniforme. Se genera calor sólo incidentalmente y no existe fusión. De esta forma es posible unir metales bastante diferentes, sin que haya alguna interacción térmica.

#### *B.5.2.4. Soldadura por Difusión.*

La unión por difusión se lleva a cabo comprimiendo las piezas a unir, al mismo tiempo se calientan a una temperatura por debajo de la de fusión e incluso por debajo de la de recristalización, en un medio de vacío o de gas inerte. La formación de las ligaduras se efectúa al cabo de cierto tiempo mientras ocurre la difusión interatómica. Las superficies a unirse tienen que estar perfectamente maquinadas y limpias para asegurar que el contacto sea estrecho sobre toda la superficie. En ocasiones se agregan capas metálicas intermedias como catalizador para acelerar la difusión y fortalecer la ligadura.

Este proceso es aplicable a metales reactivos y refractarios, para unir metales parecidos y diferentes, así como para ligar piezas gruesas y muy delgadas.

## APENDICE C

### FUNDAMENTOS DE MECANICA DE SOLIDOS

La mecánica de sólidos se encarga del estudio de la resistencia interna y la deformación de un cuerpo sólido sometido a la acción de cargas externas.

El comportamiento de un cuerpo o elemento en el cual actúan fuerzas depende no sólo de las leyes fundamentales de la mecánica de Newton que rigen el equilibrio de fuerzas, sino también de las características mecánicas del material con que esté hecho el sólido a estudiar. La información necesaria relativa a esto último proviene del laboratorio, donde los materiales se someten a la acción de fuerzas conocidas con exactitud y se observa su comportamiento. Cualquier experimento de este tipo debe ser hecho con probetas de ensaye perfectamente estandarizadas y se pone gran atención a fenómenos tales como la aparición de rupturas, deformaciones, etc. Para este fin es necesario estudiar la naturaleza de las fuerzas que se originan dentro del sólido para equilibrar los efectos de las fuerzas aplicadas exteriormente.

Cualquier elemento estructural estará sometido a fuerzas externas las cuales generan fuerzas reaccionantes. Ambas se pueden agrupar básicamente en dos:

#### *a. fuerzas axiales:*

Son aquellas que actúan en dirección del eje longitudinal del sólido.

#### *b. fuerzas cortantes:*

Son aquellas que actúan perpendicularmente al eje longitudinal del sólido.

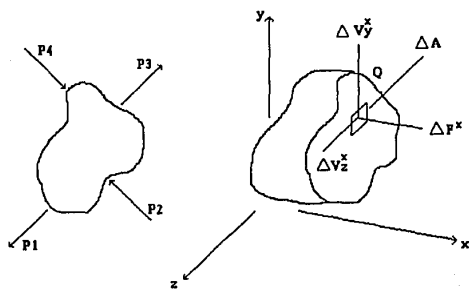
Las fuerzas reaccionantes del sólido conforman el estado de esfuerzos del objeto, el cual es producto de las fuerzas aplicadas exteriormente.

#### *C.1. Estado de Esfuerzos.*

Consideremos un cuerpo sujeto a varias cargas, para entender el estado de esfuerzos creado por éstas sobre el cuerpo, supongamos un punto  $Q$  cualquiera contenido en el cuerpo y tomemos la sección transversal que cruce  $Q$  y sea paralela al plano  $yz$  (ver fig. 1).

En el área infinitesimal  $\Delta A$  que rodea al punto  $Q$  actúan  $\Delta F^x$  y  $\Delta V^x$  que son la fuerza normal y cortante respectivamente. Dividiendo la magnitud de cada fuerza por el área  $\Delta A$  y haciendo que dicha área tienda a cero, se definen tres componentes de esfuerzo (ver fig. 2):

Fig. 1.

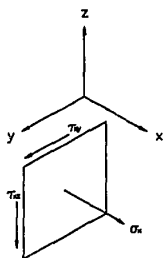


$$\sigma_x = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F^x}{\Delta A} \quad (\text{c.1})$$

$$\tau_{xy} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta V_y^x}{\Delta A} \quad (\text{c.2})$$

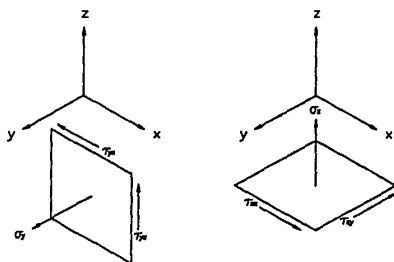
$$\tau_{xz} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta V_z^x}{\Delta A} \quad (\text{c.3})$$

figura 2



Análogamente tomando las diferenciales de áreas que crucen al mismo punto  $Q$ , pero que sean paralelas a los planos  $zx$  y  $yx$ , podemos encontrar el estado de esfuerzos para las áreas paralelas a los planos ortogonales mencionados (ver fig. 3)

figura 3



Diferencial de área  $\Delta A$  paralela al plano  $zx$ :

$$\sigma_y = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_y}{\Delta A} \quad (c.4)$$

$$\tau_{yx} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta V_x}{\Delta A} \quad (c.5)$$

$$\tau_{yz} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta V_z}{\Delta A} \quad (c.6)$$

Diferencial de área  $\Delta A$  paralela al plano  $xy$ :

$$\sigma_z = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta A} \quad (c.7)$$

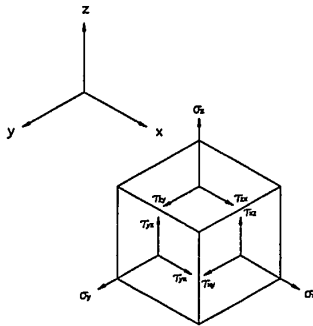
$$\tau_{zx} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta V_x^z}{\Delta A} \quad (c.8)$$

$$\tau_{zy} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta V_y^z}{\Delta A} \quad (c.9)$$

### C.2. Tensor de Esfuerzos.

El análisis anterior puede generalizarse a volúmenes donde la diferencial de volumen  $\Delta V$  del punto  $Q$ , que será considerada como un pequeño cubo, estará sometida a un estado de esfuerzos tridimensional, el cual será la superposición de los estados de esfuerzos de las áreas  $\Delta DA_x$ ,  $\Delta DA_y$  y  $\Delta DA_z$  ya estudiadas (ver fig. 4).

figura 4



El estado de esfuerzos para un volumen se puede representar por medio de una matriz conocida como *tensor de esfuerzos*, de la siguiente forma:

$$T = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (c.10)$$

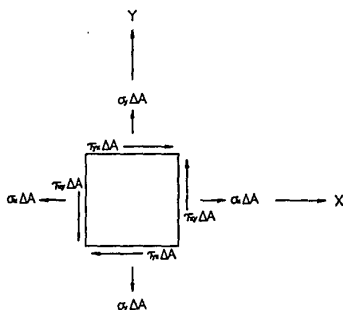
Para cumplir con las ecuaciones de equilibrio en el punto  $Q$ , las caras opuestas del cubo estarán sometidas a esfuerzos de igual magnitud pero sentido contrario.

$$\sum F_x = 0, \quad \sum F_y = 0, \quad \sum F_z = 0 \quad (c.11)$$

$$\sum M_x = 0, \quad \sum M_y = 0, \quad \sum M_z = 0 \quad (c.12)$$

De la ecuación de momentos en el eje  $z$  tenemos (ver fig. 5):

figura 5



$$\sum M_z = 0 = 2\alpha\tau_{xy}\Delta A - 2\alpha\tau_{yx}\Delta A \quad (c.13)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad (c.14)$$



Utilizando el mismo procedimiento para  $\Sigma M_x = 0$  y  $\Sigma M_y = 0$  podemos concluir que  $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ , y  $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ , lo cual quiere decir que el tensor de esfuerzos es simétrico:

$$T = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (\text{c.15})$$

### C.3. Teoría de la Deformación.

Debido a que ningún elemento es completamente rígido, al someter a cualquier cuerpo a una serie de fuerzas externas, este sufrirá deformaciones. El tipo de la deformación depende de la fuerza aplicada al cuerpo que puede ser axial, cortante o ambas.

Las deformaciones pueden ser de dos tipos:

a. *deformación lineal*: debida a una fuerza axial.

b. *deformación angular*: debida a una fuerza cortante.

La deformación, en términos de fuerza axial, es la razón de alargamiento que sufre una barra al aplicarle una fuerza axial:

$$\epsilon = \int_{l_0}^{l_t} \frac{dL}{l_0} = \frac{\Delta L}{l_0} \quad (\text{c.16})$$

La deformación lineal puede ocurrir en las tres direcciones ortogonales.

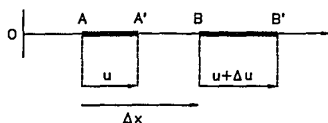
La deformación angular es causada por una fuerza cortante y es la razón de variación de el ángulo de una sección transversal de un cuerpo con respecto a otra sección del mismo cuerpo.

### C.4. Teoría Matemática de la Deformación.

a. *Deformación lineal*.

Puesto que por lo general las deformaciones varían de un punto a otro, las definiciones de deformación deben relacionarse a un elemento infinitesimal que ocurre en cierta dirección (ver fig. 6).

figura 6



Los puntos  $A$  y  $B$  del elemento a deformarse se mueven a las posiciones  $A'$  y  $B'$  experimentando un desplazamiento  $u$  y  $u + \Delta u$  respectivamente, puesto que además del desplazamiento del cuerpo rígido  $u$  común a todo el elemento  $\Delta x$ , se produce un alargamiento  $\Delta u$  dentro del elemento. Con base en la definición de deformación lineal tenemos:

$$\epsilon = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{du}{dx} \quad (c.17)$$

Si un cuerpo se deforma en direcciones perpendiculares, obtendremos tres componentes de deformación lineal (una para cada dirección), consideremos  $u, v$  y  $w$  las tres componentes de desplazamiento para las direcciones  $x, y$  y  $z$  de los ejes coordenados respectivamente. Las tres componentes básicas de deformación serán:

$$\epsilon_x = \frac{du}{dx}, \quad \epsilon_y = \frac{dv}{dy}, \quad \epsilon_z = \frac{dw}{dz} \quad (c.18)$$

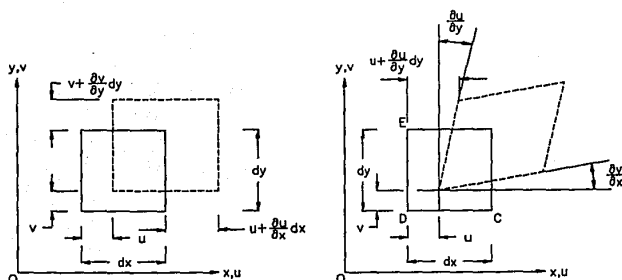
#### b. Deformación angular

Además de las deformaciones lineales, un cuerpo también puede experimentar deformaciones angulares (ver fig. 7). Tales deformaciones inclinarán los lados ortogonales del cuerpo con respecto a los ejes coordenados  $x, y$ , y  $z$ .

Puesto que  $v$  es el desplazamiento en la dirección  $y$ , a medida que se avanza en la dirección  $x$ ,  $du/dx$  es la pendiente del lado inicialmente horizontal del elemento infinitesimal. De igual manera el lado vertical se inclina un ángulo  $dv/dy$ . Con base en ello, el ángulo  $CDE$ , inicialmente recto, se reduce en la cantidad  $(dv/dx) + (du/dy)$ . Por consiguiente, para cambios de ángulo pequeños la definición de deformación angular relacionada con las coordenadas  $x$  y  $y$  es:

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (c.19)$$

figura 7



Para llegar a esta expresión se supone que las tangentes de ángulos pequeños son iguales a los propios ángulos. Las definiciones para las deformaciones angulares correspondientes a los planos  $zx$  y  $yz$  son respectivamente:

$$\gamma_{yz} = \gamma_{zy} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \quad (\text{c.20})$$

$$\gamma_{xz} = \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \quad (\text{c.21})$$

### C.5. Tensor de Deformación.

Las deformaciones lineales y angulares, definidas anteriormente, expresan conjuntamente al tensor de deformación que guarda completa analogía con el tensor de esfuerzos (ver sección C.2.). Sin embargo, es necesario modificar las relaciones para las deformaciones angulares (por cortantes) a fin de obtener el tensor, por lo que, la definición de deformación  $\gamma$  no es aceptable cuando esta es una componente del tensor. De manera heurística se divide la deformación  $\gamma$  por dos y esta cantidad es la que se toma en el tensor de deformación:

$$\epsilon_{xy} = \epsilon_{yx} = \frac{\gamma_{xy}}{2} = \frac{\gamma_{yx}}{2} \quad (\text{c.22})$$

$$\epsilon_{yz} = \epsilon_{zy} = \frac{\gamma_{yz}}{2} = \frac{\gamma_{zy}}{2} \quad (\text{c.23})$$

$$\varepsilon_{xz} = \varepsilon_{zx} = \frac{\gamma_{xz}}{2} = \frac{\gamma_{zx}}{2} \quad (c.24)$$

donde el tensor de deformación es:

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{yx}}{2} & \varepsilon_y & \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{\gamma_{zx}}{2} & \frac{\gamma_{zy}}{2} & \varepsilon_z \end{pmatrix} \quad (c.25)$$

Como se puede observar el tensor de deformación es también simétrico y es aceptable a cualquier comportamiento mecánico del material en el rango elástico.

### C.6. Diagrama Esfuerzo-Deformación.

El diagrama esfuerzo-deformación representa una característica importante del material, para obtenerlo se realiza una prueba de tracción en una probeta de ensaye del material, la cual estará perfectamente estandarizada de acuerdo a normas establecidas.

Los diagramas esfuerzo-deformación de materiales diversos varían ampliamente, sin embargo, es posible distinguir algunas características comunes a los diagramas de varios grupos de materiales y dividir los materiales en dos categorías: materiales dúctiles y materiales frágiles.

#### *Materiales dúctiles.*

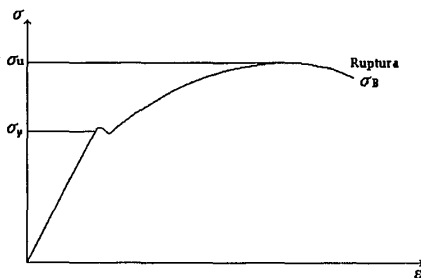
Los materiales dúctiles se caracterizan por fluir, al aplicárseles alguna fuerza, a temperatura ambiente. Un diagrama esfuerzo-deformación es el que se muestra en la fig. 8.

Cuando la probeta es sometida a carga traccionante creciente, su longitud varía en un principio linealmente con la carga y con muy poca rapidez, por lo que la porción inicial del diagrama es una línea recta de pendiente considerable hasta alcanzar un valor de esfuerzo crítico  $\sigma_y$ , conocido como límite de proporcionalidad, esta etapa corresponde a la deformación elástica del material, en donde, al dejar de aplicar la fuerza a la probeta, ésta volverá a su forma original. A partir del límite de proporcionalidad la probeta experimenta una gran deformación con un pequeño incremento en la carga. Esta deformación es ocasionada por un deslizamiento del material a lo largo de superficies oblicuas y se debe principalmente a esfuerzos cortantes. Después de alcanzar cierto valor máximo de carga  $\sigma_u$ , el diámetro de una parte de la probeta comienza a disminuir por

inestabilidad local (se forma un cuello de botella) en donde la resistencia de la probeta disminuye hasta llegar al valor del esfuerzo de fractura o de resistencia final  $\sigma_B$ . La zona comprendida desde el límite de proporcionalidad hasta la fractura corresponde a la etapa plástica del material, en donde cualquier deformación será permanente.

La fractura en un material dúctil ocurre en una superficie casi cónica que forma un ángulo de  $45^\circ$  con respecto a la superficie original de la probeta. Esto último nos indica que los esfuerzos cortantes son principalmente los causantes de la falla de los materiales dúctiles y confirman el hecho de que bajo carga axial los esfuerzos cortantes máximos ocurren en superficies oblicuas a  $45^\circ$  de la carga.

Fig. 8.

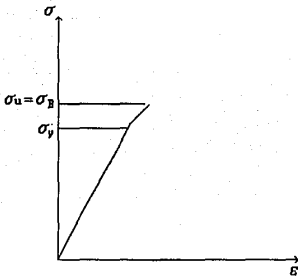


Gráfica Típica Esfuerzo-Deformación para un Material Dúctil.

### *Materiales frágiles.*

Los materiales frágiles se caracterizan por no presentar la etapa de fluencia o deformación permanente como en el caso de los materiales dúctiles, por lo que, la fractura se presenta sin cambio apreciable en la razón de alargamiento (ver fig. 9). De esta forma se puede ver que no hay diferencia entre el esfuerzo máximo  $\sigma_u$  y el esfuerzo final  $\sigma_B$ . Debido a la ausencia de estricción (cuello de botella) en los materiales frágiles, se concluye que los esfuerzos axiales son los principales causantes de la falla de la probeta.

Fig. 9.



Gráfica Típica Esfuerzo-Deformación para un Material Frágil

### C.7. Esfuerzo - Deformación.

Es muy importante para el estudio de los sólidos el establecer alguna relación entre el esfuerzo y la deformación, pero como podemos observar es muy difícil de establecer debido a que los diagramas esfuerzo-deformación varían con respecto al material, sin embargo, cualquier diagrama exhibe en el rango elástico el mismo comportamiento lineal hasta el límite de proporcionalidad y lo único que difiere es la pendiente de la recta, la cual es una característica intrínseca del material.

La ley de Hooke relaciona los esfuerzos con las deformaciones en el rango elástico donde son directamente proporcionales.

Para esfuerzos axiales la relación de proporcionalidad es la siguiente:

$$\sigma \propto \epsilon, \quad \sigma = E\epsilon \quad (c.26)$$

donde  $E$  es el módulo de elasticidad o de Young, el cual tiene las mismas unidades que el esfuerzo " $\sigma$ " [ $N/m^2$ ] y es una propiedad del material. Como se vio con anterioridad, el máximo valor de esfuerzo para el cual puede utilizarse la ley de Hooke es el límite de proporcionalidad del material empleado.

De la misma forma que en la deformación lineal, la deformación angular cumple con un patrón lineal en el rango elástico por lo que el esfuerzo tangencial aplicado es directamente proporcional al ángulo de deformación, existiendo una constante de proporcionalidad:

$$\tau \propto \gamma, \quad \gamma = \frac{\tau}{G} \quad (c.27)$$

donde  $G$  es la constante de proporcionalidad conocida como módulo de elasticidad al corte, que como se verá posteriormente está relacionada con el módulo de Young.

Una vez obtenida la relación entre esfuerzos y deformaciones generalicemos para los tensores de esfuerzo (ec. c.10) y deformación (ec. c.25) obtenidos anteriormente.

Supongamos a un material anisotrópico pero homogéneo, es decir, un material con diferentes propiedades para diferentes direcciones, podemos proponer que la deformación está directamente y linealmente relacionada con el esfuerzo que la origina. Con base en ello, relacionando cada una de las seis componentes de esfuerzo, las relaciones lineales entre esfuerzo y deformación se convierten en:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \varepsilon_x = A_{11}\sigma_x + A_{12}\sigma_y + A_{13}\sigma_z + A_{14}\tau_{xy} + A_{15}\tau_{yz} + A_{16}\tau_{zx} \\ \varepsilon_{yy} &= \varepsilon_y = A_{21}\sigma_x + A_{22}\sigma_y + A_{23}\sigma_z + A_{24}\tau_{xy} + A_{25}\tau_{yz} + A_{26}\tau_{zx} \\ \varepsilon_{zz} &= \varepsilon_z = A_{31}\sigma_x + A_{32}\sigma_y + A_{33}\sigma_z + A_{34}\tau_{xy} + A_{35}\tau_{yz} + A_{36}\tau_{zx} \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{\gamma_{xy}}{2} = A_{41}\sigma_x + A_{42}\sigma_y + A_{43}\sigma_z + A_{44}\tau_{xy} + A_{45}\tau_{yz} + A_{46}\tau_{zx} \\ \varepsilon_{yz} &= \frac{\gamma_{yz}}{2} = A_{51}\sigma_x + A_{52}\sigma_y + A_{53}\sigma_z + A_{54}\tau_{xy} + A_{55}\tau_{yz} + A_{56}\tau_{zx} \\ \varepsilon_{zx} &= \frac{\gamma_{zx}}{2} = A_{61}\sigma_x + A_{62}\sigma_y + A_{63}\sigma_z + A_{64}\tau_{xy} + A_{65}\tau_{yz} + A_{66}\tau_{zx} \end{aligned} \quad (c.28)$$

Al ser el material homogéneo la matriz de constantes  $A_{11}, A_{12}, \dots, A_{66}$  es simétrica, por lo que:

$$A_{ij} = A_{ji}, \text{ para } i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (c.29)$$

Para materiales isotrópicos homogéneos, es decir, materiales con las mismas propiedades en todas direcciones, las ecuaciones pasadas pueden simplificarse como sigue:

$$\begin{aligned}
A_{11} &= A_{22} = A_{33}, \\
A_{44} &= A_{55} = A_{66} \\
A_{12} &= A_{13} = A_{23} \\
A_{12} &= A_{21} \\
A_{13} &= A_{31} \\
A_{23} &= A_{32}
\end{aligned}
\tag{c.30}$$

y todas las demás constantes valen cero.

De acuerdo con las relaciones hechas para esfuerzo y deformación tenemos:

$$A_{11} = \frac{1}{E}, \quad A_{12} = -\frac{\nu}{E} \quad \text{y} \quad A_{44} = \frac{1}{2G}
\tag{c.31}$$

sustituyendo en las ecuaciones de deformación (c.28):

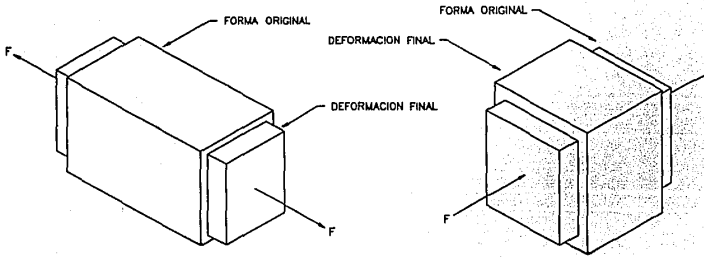
$$\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \\
\varepsilon_y &= -\nu \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \\
\varepsilon_z &= -\nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E} \\
\gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}, \quad \text{y} \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}
\end{aligned}
\tag{c.32}$$

Donde  $\nu$  es la razón de Poisson y su significado es el siguiente:

Por experimentos efectuados se sabe que además de la deformación de los materiales en la dirección del esfuerzo normal aplicado, se puede observar que perpendicularmente al esfuerzo ocurre cierta expansión o contracción lateral (transversal) (ver fig. 10).



Fig. 10.



Si se somete un cuerpo sólido a tensión axial el cuerpo se contrae lateralmente, por otra parte, si se comprime el material se ensancha lateralmente. Es necesario considerar estas deformaciones laterales con base en la deformación por unidad de longitud de la dimensión transversal, es decir, en base a las deformaciones lineales laterales. La razón del valor de la deformación lineal en la dirección lateral a la deformación lineal en dirección axial es la relación de Poisson:

$$\nu = - \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = - \frac{\epsilon_z}{\epsilon_x} = \frac{\text{deformación lateral}}{\text{deformación axial}} \quad (\text{c.33})$$

## **APENDICE D**

### **NORMAS ASTM**



## Standard Methods of FLEXURAL TESTING OF GLASS (DETERMINATION OF MODULUS OF RUPTURE)<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation C 158; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last revision of a superscripted epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

### 1. Scope

1.1 These methods cover the determination of the modulus of rupture in bending of glass and glass-ceramics.

1.2 These methods are applicable to annealed and prestressed glasses and glass-ceramics available in varied forms. Alternative test methods are described; the method used shall be determined by the purpose of the test and geometric characteristics of specimens representative of the material.

1.2.1 Method A is a test for modulus of rupture of flat glass.

1.2.2 Method B is a comparative test for modulus of rupture of glass and glass-ceramics.

1.3 The methods appear in the following order

	Sections
Method A	6 to 9
Method B	10 to 14

1.4 *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety problems associated with its use. It is the responsibility of whoever uses this standard to consult and establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.* Specific precaution statements are given in Section 15.

### 2. Applicable Documents

- 2.1 *ASTM Standards*  
 C 148 Method for Polaroscopic Examination of Glass Containers<sup>2</sup>  
 E 4 Practice for Load Verification of Testing Machines<sup>3</sup>  
 E 180 Metric Practice<sup>4</sup>

### 3. Terminology

#### 3.1 Definitions

3.1.1 *glass-ceramics*—solid materials, predominantly crystalline in nature, formed by the controlled crystallization of glasses.

3.1.2 *modulus of rupture in bending*—the value of maximum tensile or compressive stress (whichever causes failure) in the extreme fiber of a beam loaded to failure in bending computed from the flexure formula:

$$S_x = \frac{Ml}{I}$$

where:

$M$  = maximum bending moment, computed from the maximum load and the original moment arm,

$c$  = initial distance from the neutral axis to the extreme fiber where failure occurs, and

$I$  = initial moment of inertia of the cross section about the neutral axis.

3.1.3 *prestressed*—material in which a significant and controlled degree of compressive stress has been deliberately produced in the surfaces.

3.1.4 *standard laboratory atmosphere*—an atmosphere having a temperature of  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  and a relative humidity of  $40 \pm 10\%$ .

3.2 *Descriptions of Terms Specific to This Standard.*

<sup>1</sup> These methods are under the jurisdiction of ASTM Committee C-14 on Glass and Glass Products and are the direct responsibility of Subcommittee C 14.04 on Physical and Mechanical Properties.

Current edition approved Dec. 28, 1984. Published February 1985. Originally published as C 158-40-1. Last previous edition C 158-80.

<sup>2</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 15.02.

<sup>3</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vols. 04.02, 07.01, and 08.01.

<sup>4</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 14.02.

3.2.1 *abraded*—describes a test specimen that has at least a portion of the area of maximum surface tensile stress subjected to an operationally defined procedure for mechanical abrasion. The severity and uniformity of abrasion should be sufficient to ensure origin of failure substantially in the region of maximum stress.

3.2.2 *annealed glass*—describes a specimen that shall not have a temper or degree of residual stress resulting from prior thermal treatment in excess of the following limits when measured polarimetrically (see Annex A1):

3.2.2.1 Specimens of rectangular section shall not have a tensile stress at the midplane of more than 200-psi (1.38-MPa) nor more than 400-psi (2.76-MPa) compression at the surface.

3.2.2.2 Specimens in rod form may be examined by viewing through a diameter at least four diameters from an end. The *apparent* central axial tension shall not exceed 133 psi (0.92 MPa). Surface compression, if measured on sections cut from the rods, shall not exceed 400 psi (2.76 MPa) when viewed axially.

#### 4. Significance and Use

4.1 For the purpose of this test, glasses and glass-ceramics are considered brittle (perfectly elastic) and to have the property that fracture normally occurs at the surface of the test specimen from the principal tensile stress. The modulus of rupture is considered a valid measure of the tensile strength subject to the considerations discussed below.

4.2 It is recognized that the modulus of rupture for a group of test specimens is influenced by variables associated with the test procedure. These include the rate of stressing, test environment, and the area of the specimen subjected to stress. Such factors are specified in the test procedure or required to be stated in the report.

4.3 It is also recognized that the variables having the greatest effect on the modulus of rupture value for a group of test specimens are the condition of the surfaces and glass quality near the surfaces in regard to the number and severity of stress-concentrating discontinuities or flaws, and the degree of prestress existing in the specimens. Each of these can represent an inherent part of the strength characteristic being determined or can be a random interfering factor in the measurement.

4.4 Method A is designed to include the con-

dition of the surface of the specimen as a factor in the measured strength. It is, therefore, desirable to subject a fixed and significant area of the surface to the maximum tensile stress. Since the number and severity of surface flaws in glass are primarily determined by manufacturing and handling processes, this method is limited to products from which specimens of suitable size can be obtained with minimal dependence of measured strength upon specimen preparation techniques. This method is therefore designated as a test for modulus of rupture of flat glass.

4.5 Method B describes a general procedure for test, applicable to specimens of rectangular or elliptical cross section. This method is based on the assumption that a comparative measurement of strength on groups of specimens is of significance for many purposes, such as determining the effect of environment or stress duration, or the effectiveness of varied prestressing techniques or strengths characteristic of glass-ceramics of differing composition or heat treatment. In this method the surfaces of the specimens are not assumed to be characteristic of a product or material, but are considered to be determined by the procedures used to prepare the specimens. Though the stated procedure permits a wide variation in both specimen size and test geometry, it is necessary to use identical test conditions and equivalent procedures for specimen preparation to obtain comparable strength values. The use of a controlled abrasion of the specimen as a final normalizing procedure is recommended for such comparative tests.

4.6 A comparative abraded strength, determined as suggested in Method B, is not to be considered as a minimum value characteristic of the material tested nor as directly related to a maximum attainable strength value through test of specimens with identical flaws. The operationally defined abrasion procedure undoubtedly produces flaws of differing severity when applied to varied materials, and the measured comparative strengths describe the relative ability to withstand externally induced stress as affected by the specific abrasion procedure.

#### 5. Apparatus

5.1 *Testing Machine*—The loading mechanism shall be sufficiently adjustable to give the required uniform rate of increase of stress. The load-measuring system shall be essentially free of

inertial lag at the loading rates used and shall be equipped with means for retaining indication of the maximum load applied to the specimen. The accuracy of the testing machine shall conform to the requirements of Practice E 4.

5.2 *Bearing Edges*—Cylindrical bearing edges of approximately  $\frac{1}{8}$ -in. (3-mm) radius shall be used for the support of the test specimen and the application of the load. The bearing edges shall be of steel and sufficiently hardened to prevent excessive deformation under load. Two-point loading tests shall be performed with the loading member pivoted about a central transverse axis to ensure equal distribution of load between the two bearing edges. For the testing of specimens of rectangular section, both loading bearing edges and one support bearing edge also shall be provided laterally to compensate for irregularities of the test specimen. Figure 1 shows a suitable arrangement using pinned bearing edges. In test of specimens of a circular or elliptical section, the fixed cylindrical support edges may have a curvature of approximately 3 in. (76 mm) in the plane of the bearing edge to stabilize the alignment of the specimens. Such support edges are shown in Fig. 2.

#### METHOD A—TEST FOR MODULUS OF RUPTURE OF FLAT GLASS

##### 5. Test Specimens

6.1 *Preparation of Specimens*—Test specimens shall be cut from the sheet stock with a diamond or a cutting wheel. Both longitudinal cuts shall be on the same original surface and none of the original edge of the sheet shall be used as a longitudinal side of the specimen. End cuts may be on either surface. The direction of cutting of half of the total number of specimens shall be perpendicular to the direction of cutting of the remainder. Specimens that must be cut from sheet stock prior to the use of a prestressing treatment shall have the corners of the longitudinal edges rounded to minimize damage to the edges in the prestressing process. All operations shall be performed with the direction of grind or polish parallel to the longitudinal axis. The radius of the corner shall not exceed  $\frac{1}{16}$  in. (1.6 mm).

6.2 *Size of Specimens*—The specimens shall be approximately 10 in. (250 mm) in length and  $1\frac{1}{2} \pm \frac{1}{8}$  in. (38.1  $\pm$  3.2 mm) in width. The variation in width or thickness shall not exceed 5% from one end to the other.

6.3 *Number of Specimens*—At least 30 speci-

mens shall be used for one test and shall preferably be taken from several sheets, or regions of a single sheet.

6.4 *Examination of Specimens*—Any specimen may be rejected prior to test for observable defects considered likely to affect the modulus of rupture. To be considered representative of annealed glass the specimens must meet the requirement of 3.2.1. At least 30% of the specimens shall be examined for residual stress. If any of these fail to meet the requirement, the remainder of the specimens shall be examined and those exceeding the stated limit shall be rejected.

#### 7. Procedure

7.1 Space the supporting edges of the test fixture 8.00 in. (200 mm) apart and centrally position the loading edges with a separation of 4.00 in. (100 mm). Break specimens having cut edges with the cutter marks on the face under compression. Carefully place each specimen in the test fixture to minimize possible damage and to ensure alignment of specimen in the fixture. The permissible maximum fiber stress due to initial load on the specimen shall not exceed 25% of the mean modulus of rupture. Load the specimen at a constant rate to failure. For annealed glass the rate of loading shall correspond to a rate of increase of maximum stress of  $10\,000 \pm 2000$  psi/min (1.1  $\pm$  0.2 MPa/s). Test prestressed glasses with the increase of maximum stress per minute between 80 and 120% of the modulus of rupture. The first six specimens of the group may be tested at a loading rate based on an estimate of the modulus of rupture and the average value for these specimens used to correct this estimate. If range of width and thickness variation in the specimens is less than 5%, the mean values may be used to represent all specimens for the purpose of calculation of rate of loading.

7.2 Determine the thickness and width of each specimen to  $\pm 1\%$ . To avoid damage from gaging in the critical area, take measurements prior to testing near each end with a separation equal to the support span, and average the values. Measurements following test shall be in the uniformly stressed region of the specimen.

7.3 Determine the location of point of failure and note it as edge or face origin. Plastic or other tape of low elastic modulus<sup>1</sup> may be used on the

<sup>1</sup> Scotch Brand plastic tape (Catalog No. 191-A) has been found suitable for this purpose.

compressive surface to contain the fragmentation and allow observation of point of failure for highly prestressed specimens. Report all values, although segregation of edge break values is permitted.

## 8. Calculation

8.1 Calculate the modulus of rupture, initial maximum fiber stress, and rate of increase of stress as follows:

### 8.1.1 Modulus of rupture:

$$S = \frac{3L_0a}{bd^2}$$

8.1.2 Maximum stress due to initial load if present:

$$S_0 = \frac{3L_0a}{bd^2}$$

8.1.3 Rate of increase of maximum stress:

$$R = \frac{3a}{bd^2} \times \frac{\Delta L}{\Delta t}$$

$$R = S - \frac{S_0}{t}$$

where:

- $S$  = modulus of rupture,
- $S_0$  = maximum fiber stress due to initial load if present,
- $R$  = rate of increase of maximum fiber stress,
- $L$  = breaking load including initial load,
- $L_0$  = initial load,
- $a$  = moment arm or distance between adjacent support and loading edges,
- $b$  = width of specimen,
- $d$  = thickness of specimen,
- $t$  = time from start of continuous loading to rupture, and
- $\Delta L/\Delta t$  = rate of increase of load.

## 9. Report

9.1 Report the following:

- 9.1.1 Method of test used.
- 9.1.2 Identification of the glass tested, including any special treatment (for specimens derived from manufacturing processes that are asymmetric in nature (for example, the float process), the side of the sheet placed in tension during test shall be identified, if possible).
- 9.1.3 Classification as annealed or prestressed glass.
- 9.1.4 Test environment if other than standard laboratory atmosphere.
- 9.1.5 Rate of increase of maximum stress,

9.1.6 Value of modulus of rupture for each specimen and designation of point of failure as edge or face, and

9.1.7 Average value of the modulus of rupture for the group and the standard deviation estimate of the mean. Separate values may be determined for edge and face origins.

NOTE 1—See Annex A3 for conversion from inch-pound units and other non-SI units to SI units.

## METHOD B—COMPARATIVE TEST FOR MODULUS OF RUPTURE OF GLASS AND GLASS-CERAMICS

### 10. Test Specimens

#### 10.1 Preparation of Specimens:

10.1.1 Specimens of rectangular cross section may be prepared by any sequence of conventional operations such as cutting, sawing, grinding, or polishing. Longitudinal edges on the face to be placed in tension should be chamfered or rounded. The corner radius shall be a minimum value sufficient to eliminate edge breaks and shall not exceed one tenth the thickness in specimens approaching a square cross section. Specimens shall have equivalent size and manufacturing procedures in groups to be compared. The specimen length shall be at least  $\frac{1}{2}$  in. (12.7 mm) greater in length than the support span used in test. The width to thickness ratio is recommended to be between 2:1 and 10:1. The minimum width shall be  $\frac{1}{8}$  in. (9.5 mm), although specimens of greater width are desirable. The variation in width or thickness shall not exceed 3% over the length of the specimen equal to the support span.

10.1.2 Specimens in rod form may be prepared as drawn cane or by procedures such as core drilling and centerless grinding. Equivalent sizes and manufacturing procedures shall be used on specimens for comparison. The specimen length shall be at least  $\frac{1}{2}$  in. (12.7 mm) greater than the support span used in the test. The diameter shall be optional, with a minimum value of  $\frac{1}{16}$  in. (4.76 mm). The variation in a measured diameter shall not exceed 3% over the length of the specimen equal to the support span. The length-to-diameter ratio shall be greater than 10:1. Specimens may be elliptical in section, but the minor diameter shall not be less than 80% of the major diameter. The specimen shall be straight within  $\frac{1}{8}$  in. in 4 in. (or 3 mm in 100 mm). The curvature shall be limited to a single plane containing the major or minor diameter of any ellipticity, if this ellipticity exceeds 5%.

### 10.2 Number of Specimens:

10.2.1 It is recommended that at least 30 specimens shall be available for one test if a controlled abrasion procedure is not used as a normalizing procedure. Utilization of fewer specimens is permissible if conclusions of satisfactory statistical validity are possible, though a minimum of ten specimens is required.

10.2.2 At least 10 specimens shall be used for one test if a controlled abrasion is used to normalize the surface condition of the specimens.

#### 10.3 Examination of Specimens:

10.3.1 Any specimens may be rejected prior to testing for defects considered likely to affect the modulus of rupture.

10.3.2 Specimens of glass described as annealed must meet the requirements of 3.2. At least 30% of the specimens shall be examined for residual stress. If any of these are not within the requirements, the remainder of the specimens shall be examined and those exceeding the stated limit shall be rejected.

## 11. Test Conditions

11.1 *Specimens of Rectangular Section*—The moment arm or separation of adjacent support and loading edges shall be greater than the width of the specimen and at least four times the thickness of the specimen. The separation of the loading edges shall be not less than  $\frac{1}{4}$  in. (19 mm) and at least three times the thickness of the specimen. Within these limitations the test geometry may be adjusted to accommodate the loading range of the testing machine. It should be noted that for highly prestressed materials the possibility of excessive flexure (greater than approximately one half the specimen thickness) and end slope may exist at large span-to-thickness ratios.

11.2 *Specimens of Round or Elliptical Section*—The moment arm or separation of support and loading edges shall be at least four times the vertical diameter of the specimen. The separation of the loading edges shall be not less than  $\frac{1}{4}$  in. (19 mm) and at least three times the vertical diameter. Within these limitations the test geometry may be adjusted to accommodate the loading range of the testing machine. It should be noted that low moment arm-to-diameter ratios may result in undesirable high contact stresses from the bearing edges.

11.3 *Single Point Loading*—Although not generally recommended, single-point loading is

acceptable under the following circumstances:

- 11.3.1 For establishing experimental correlation with existing single-point loading data, and
- 11.3.2 When the distribution of glass defects or flaws (see 4.3) is such that their presence is unavoidable within the minimum distance between the loading points as specified in 11.1 and 11.2. Such defects or flaws must be noncharacteristic to the glass composition and of no primary interest to the strength study.
- 11.3.3 For single-point loading, make the separation of the loading edges zero while maintaining all other requirements in 11.1 and 11.2.

## 12. Procedure

### 12.1 Measurement of Specimens:

12.1.1 Individually measure specimens of rectangular section for width and thickness to 0.001 in. (0.02 mm). If a controlled abrasion is not utilized, limit measurements prior to the test to regions near the ends, separated by a distance equal to the support span, and record the average value.

12.1.2 Place specimens of elliptical or round section on a set of support edges of appropriate span, and note a normal equilibrium position. Mark the vertical axis, and measure the vertical and horizontal diameters to 0.001 in. (0.02 mm). If a controlled abrasion is not utilized, limit the measurements prior to testing to regions near the ends at a separation equal to the support span, and record the average values.

12.2 *Loading to Failure*—Carefully locate the specimens in the test fixture to minimize damage to the specimen and to ensure alignment with axis of the fixture. Specimens in rod form shall have the indicated vertical axis so located during test. For specimens of rectangular section, place the abraded face in tension. Do not allow the initial load on the specimen to produce a maximum fiber stress in excess of 25% of the mean modulus of rupture. Uniformly apply the load until failure occurs. For annealed glass, the rate of loading shall correspond to a rate of increase of maximum stress of 10 000  $\pm$  2000 psi/min (1.1  $\pm$  0.2 MPa/s). For prestressed glasses and glass-ceramics, the increase of maximum stress per minute shall be between 80 and 120% of the modulus of rupture. The first 20% of the group may be tested at a loading rate based on an estimate of the modulus of rupture and the average value for these specimens used to correct this estimate. For specimens of rectangular sec-

tion, determine and record the point of failure as edge or face origin for specimens without abrasion, and record it as to occurrence in abraded area for specimens having such abrasion. The use of plastic or other low-modulus tape<sup>3</sup> is permitted on the compressive surface to contain the fragmentation and permit observation of point of failure. Report all values, although segregation into appropriate classification is permitted.

### 13. Calculation

13.1 Calculate the modulus of rupture, initial maximum fiber stress, and rate of increase of stress as follows:

13.1.1 Modulus of rupture for specimens of rectangular section:

$$S = \frac{3La}{bd^2}$$

For specimens of elliptical section:

$$S = \frac{5.09 La}{bd^2}$$

13.1.2 Stress due to initial load if present for specimens of rectangular section:

$$S_0 = \frac{3La_0}{bd^2}$$

For specimens of elliptical section:

$$S_0 = \frac{5.90 La_0}{bd^2}$$

13.1.3 Rate of increase of maximum stress for specimens of rectangular section:

$$R = \frac{3a}{bd^2} \times \frac{\Delta L}{\Delta t}$$

For specimens of elliptical section:

$$R = \frac{5.09 a}{bd^2} \times \frac{\Delta L}{\Delta t}$$

For specimens of any section:

$$R = \frac{S - S_0}{t}$$

where:

- $S$  = modulus of rupture,
- $S_0$  = maximum fiber stress due to initial load, if present,
- $R$  = rate of increase of maximum fiber stress,
- $L$  = breaking load,
- $L_0$  = initial load,
- $a$  = moment arm or separation of adjacent loading and support edges,
- $b$  = width of specimen or horizontal diameter,

$d$  = thickness of specimen or vertical diameter,

$t$  = time from start of continuous loading to rupture, min, and

$\Delta L/\Delta t$  = rate of loading.

### 14. Report

14.1 Report the following:

14.1.1 Method of test used,

14.1.2 Identification of the material tested, including any special treatment,

14.1.3 Classification as annealed or pre-stressed material,

14.1.4 Form and size of specimens,

14.1.5 Method of preparation of specimens and abrasion procedure used, if any,

14.1.6 Test environment if other than standard laboratory atmosphere,

14.1.7 Test geometry and conditions of loading (single-point or two-point),

14.1.8 Rate of increase of maximum stress,

14.1.9 Value of the modulus of rupture for each specimen (the point of failure for specimens of rectangular section shall be indicated with regard to face or edge origin for specimens not subjected to abrasion, and with regard to occurrence in the abraded area for specimens subjected to a controlled abrasion), and

14.1.10 Average value of the modulus of rupture for the group and the standard deviation estimate for the mean. Separate values may be determined for the specimens segregated by point of origin.

### 15. Precautions

15.1 Care should be exercised in all handling of specimens to avoid the introduction of random and severe flaws.

15.2 Abrasion of specimens of rectangular section should be performed so that corners are not subjected to abrasion. Abrasion should be limited to the region of uniform tensile stress between the loading edges, and it should cover a significant fraction of this area.

15.3 Following an abrasion procedure, a minimum time of 1 h must elapse before tapping or testing of specimens (see Annex A2.2).

15.4 Deflectometers, if used during testing, should not contact the tension face of the specimen.

15.5 If tests are performed at temperatures deviating from ambient, it is necessary to allow the specimen to reach thermal equilibrium to

eliminate the presence of thermally induced stresses in the specimen. The report should indicate the thermal history prior to testing.

### 16. Precision and Bias

16.1 Precision—The precision of these methods is a function of the testing machine (see Practice E 4), the test fixtures (1)<sup>4</sup>, and the normalizing procedures (see Annex A2). Some of

these aspects are discussed in Sections 4 and 15. Typical coefficients of variation for homogeneous materials range from 3 to 10 %.

16.2 Bias—No statement is made about the bias of these methods for determining the modulus of rupture since there is no standard reference material (SRM) available.

<sup>4</sup>The boldface numbers in parentheses refer to a list of references located at the end of this standard.

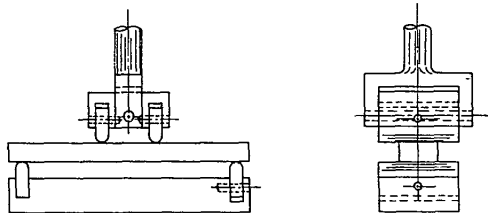


FIG. 1 Planed Bearing Edges

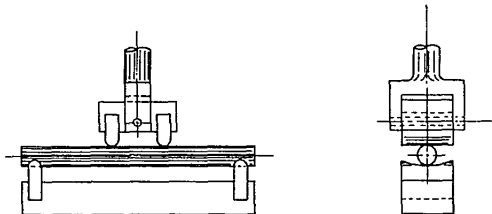


FIG. 2 Filed Cylindrical Support Edges



## Standard Test Method for YOUNG'S MODULUS, SHEAR MODULUS, AND POISSON'S RATIO FOR GLASS AND GLASS-CERAMIC BY RESONANCE<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation C 623, the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

### 1. Scope

1.1 This method covers the determination of the elastic properties of glass and glass-ceramic materials. Specimens of these materials possess specific mechanical resonance frequencies which are defined by the elastic moduli, density, and geometry of the test specimen. Therefore the elastic properties of a material can be computed if the geometry, density, and mechanical resonance frequencies of a suitable test specimen of that material can be measured. Young's modulus is determined using the resonance frequency in the flexural mode of vibration. The shear modulus, or modulus of rigidity, is found using torsional resonance vibrations. Young's modulus and shear modulus are used to compute Poisson's ratio, the factor of lateral contraction.

1.2 All glass and glass-ceramic materials that are elastic, homogeneous, and isotropic may be tested by this method.<sup>2</sup> The method is not satisfactory for specimens that have cracks or voids that represent inhomogeneities in the material; neither is it satisfactory when these materials cannot be prepared in a suitable geometry.

NOTE 1—Elastic here means that an application of stress within the elastic limit of that material making up the body being stressed will cause an instantaneous and uniform deformation, which will cease upon removal of the stress, with the body returning instantly to its original size and shape without an energy loss. Glass and glass-ceramic materials conform to this definition well enough that this test is meaningful.

NOTE 2—Isotropic means that the elastic properties are the same in all directions in the material. Glass is isotropic and glass-ceramics are usually so

on a macroscopic scale, because of random distribution and orientation of crystallites.

1.3 A cryogenic cabinet and high-temperature furnace are described for measuring the elastic moduli as a function of temperature from -195 C to 1200 C.

1.4 Modification of the test for use in quality control is possible. A range of acceptable resonance frequencies is determined for a piece with a particular geometry and density. Any specimen with a frequency response falling outside this frequency range is rejected. The actual modulus of each piece need not be determined as long as the limits of the selected frequency range are known to include the resonance frequency that the piece must possess if its geometry and density are within specified tolerances.

### 2. Summary of Method

2.1 This method measures the resonance frequencies of test bars of suitable geometry by exciting them at continuously variable frequencies. Mechanical excitation of the specimen is provided through use of a transducer that transforms an initial electrical signal into a mechanical vibration. Another transducer senses the resulting mechanical vibrations of the specimen and transforms them into an

<sup>1</sup> This method is under the jurisdiction of ASTM Committee C-14 on Glass and Glass Products. Current edition effective Dec. 20, 1971. Originally issued 1969. Replaces C 623 - 69 T.

<sup>2</sup> Spinner, S. and Tefft, W. E.: "A Method for Determining Mechanical Resonance Frequencies and for Calculating Elastic Moduli from These Frequencies," *Proceedings, Am. Soc. Testing Mats., ANTEA*, 1961, pp. 1221-1236.



electrical signal that can be displayed on the screen of an oscilloscope to detect resonance. The resonance frequencies, the dimensions, and the mass of the specimen are used to calculate Young's modulus and the shear modulus.

### 3. Significance

3.1 This test system has advantages in certain respects over the use of static loading systems in the measurement of glass and glass-ceramics:

3.1.1 Only minute stresses are applied to the specimen, thus minimizing the possibility of fracture.

3.1.2 The period of time during which stress is applied and removed is of the order of hundreds of microseconds, making it feasible to perform measurements at temperatures where delayed elastic and creep effects proceed on a much-shortened time scale, as in the transformation range of glass, for instance.

3.2 The test is suitable for detecting whether a material meets specifications, if cognizance is given to one important fact: glass and glass-ceramic materials are sensitive to thermal history. Therefore the thermal history of a test specimen must be known before the moduli can be considered in terms of specified values. Material specifications should include a specific thermal treatment for all test specimens.

### 4. Apparatus

4.1 The test apparatus is shown in Fig. 1. It consists of a variable-frequency audio oscillator, used to generate a sinusoidal voltage, and a power amplifier and suitable transducer to convert the electrical signal to a mechanical driving vibration. A frequency meter monitors the audio oscillator output to provide an accurate frequency determination. A suitable suspension-coupling system cradles the test specimen, and another transducer acts to detect mechanical resonance in the specimen and to convert it into an electrical signal which is passed through an amplifier and displayed on the vertical plates of an oscilloscope. If a Lissajous figure is desired, the output of the oscillator is also coupled to the horizontal plates of the oscilloscope. If temperature-dependent data are desired, a suitable furnace or cryogenic chamber is used. Details of the equipment are as follows:

4.2 **Audio Oscillator**, having a continuously variable frequency output from about 100 Hz to at least 20 kHz. Frequency drift shall not exceed 1 Hz/min for any given setting.

4.3 **Audio Amplifier**, having a power output sufficient to ensure that the type of transducer used can excite any specimen the mass of which falls within a specified range.

4.4 **Transducers**—Two are required: one used as a driver may be a speaker of the tweeter type or a magnetic cutting head or other similar device, depending on the type of coupling chosen for use between the transducer and the specimen. The other transducer, used as a detector, may be a crystal or magnetic reluctance type of phonograph cartridge. A capacitive pickup may be used if desired. The frequency response of the transducer shall be as good as possible with at least a 6.5-kHz bandwidth before 3-dB power loss occurs.

4.5 **Power Amplifier**, in the detector circuit shall be impedance matched with the type of detector transducer selected and shall serve as a prescope amplifier.

4.6 **Cathode-Ray Oscilloscope**, shall be any model suitable for general laboratory work.

4.7 **Frequency Counter**, shall be able to measure frequencies to within  $\pm 1$  Hz.

4.8 If data at elevated temperatures are desired, a furnace shall be used that is capable of controlled heating and cooling. It shall have a specimen zone 180 mm in length, which will be uniform in temperature within  $\pm 5$  C throughout the range of temperatures encountered in testing.

4.9 For data at cryogenic temperatures, any chamber shall suffice that shall be capable of controlled heating, frost-free, and uniform in temperature within  $\pm 5$  C over the length of the specimen at any selected temperature. A suitable cryogenic chamber<sup>1</sup> is shown in Fig. 2.

4.10 Any method of specimen suspension shall be used that shall be adequate for the temperatures encountered in testing and that shall allow the specimen to vibrate without significant restriction. Common cotton thread, silica glass fiber thread, Nichrome, or platinum wire may be used. If metal wire suspension is used in the furnace, coupling character-

<sup>1</sup>Smith, R. F. and Hays, H. E., "A Low Temperature Sonic Resonance Apparatus for Determining Elastic Properties of Solids," Internal Report 2195, Corning Glass Works, April, 1961.



istics will be improved if, outside the temperature zone, the wire is coupled to cotton thread and the thread is coupled to the transducer. If specimen supports of other than the suspension type are used, they shall meet the same general specifications.

### 5. Test Specimens

5.1 The specimens shall be prepared so that they are either rectangular or circular in cross section. Either geometry can be used to measure both Young's modulus and shear modulus. However, great experimental difficulties in obtaining torsional resonance frequencies for a cylindrical specimen usually preclude its use in determining shear modulus, although the equations for computing shear modulus with a cylindrical specimen are both simpler and more accurate than those used with a prismatic bar.

5.2 Resonance frequencies for a given specimen are functions of the bar dimensions as well as its density and modulus; therefore, dimensions should be selected with this relationship in mind. Selection of size shall be made so that, for an estimated modulus, the resonance frequencies measured will fall within the range of frequency response of the transducers used. Representative values of Young's modulus are  $70 \times 10^4$  kgf/cm<sup>2</sup> (69 GPa) for glass and  $100 \times 10^4$  kgf/cm<sup>2</sup> (98 GPa) for glass-ceramics. Recommended specimen sizes are 120 by 25 by 3 mm for bars of rectangular cross section, and 120 by 4 mm for those of circular cross section. These specimen sizes should produce a fundamental flexural resonance frequency in the range from 1000 to 2000 Hz. Specimens shall have a minimum mass of 5 g to avoid coupling effects; any size of specimen that has a suitable length-to-cross-section ratio in terms of frequency response and meets the mass minimum may be used. Maximum specimen size and mass are determined primarily by the test system's energy and space capabilities.

5.3 Specimens shall be finished using a fine grind 400-grit or smaller. All surfaces shall be flat and opposite surfaces shall be parallel within 0.02 mm.

### 6. Procedure

#### 6.1 Procedure A—Room Temperature Testing—Position the specimen properly (See

Figs. 3 and 4). Activate the equipment so that power adequate to excite the specimen is delivered to the driving transducer. Set the gain of the detector circuit high enough to detect vibration in the specimen and to display it on the oscilloscope screen with sufficient amplitude to measure accurately the frequency at which the signal amplitude is maximized. Adjust the oscilloscope so that a sharply defined horizontal baseline exists when the specimen is not excited. Scan frequencies with the audio oscillator until specimen resonance is indicated by a sinusoidal pattern of maximum amplitude on the oscilloscope. Find the fundamental mode of vibration in flexure, then find the first overtone in flexure (Note 3). Establish definitely the fundamental flexural mode by positioning the detector at the appropriate nodal position of the specimen (see Fig. 5). At this point the amplitude of the resonance signal will decrease to zero. The ratio of the first overtone frequency to the fundamental frequency will be approximately 2.70 to 2.75. If a determination of the shear modulus is to be made, offset the coupling to the transducers so that the torsional mode of vibration may be detected (see Fig. 3). Find the fundamental resonance vibration in this mode. Identify the torsional mode by centering the detector with respect to the width of the specimen and observing that the amplitude of the resonance signal decreases to zero, if it does not, the signal is an overtone of flexure or a spurious frequency generated elsewhere in the system. Dimensions and weight of the specimen may be measured before or after the test. Measure the dimensions with a micrometer caliper capable of an accuracy of  $\pm 0.01$  mm, measure the weight with a balance capable of  $\pm 10$  mg accuracy.

NOTE 3—It is recommended that the first overtone in flexure be determined for both rectangular and cylindrical specimens. This is useful in establishing the proper identification of the fundamental particularly when spurious frequencies inherent in the system interfere. For example, when greater excitation power and detection sensitivities are required for work with a specimen that has a poor response, the fundamental and overtone are properly identified by showing them to be in the correct numerical ratio and by demonstrating the proper locations of the nodes for each. Spinner and Lott recommend using only the fundamental in flexure when computing Young's modulus for a rectangular bar because of the anisotropic nature of Polkett's





theory. However, for the nominal size of bar specified, the values of Young's modulus computed using Eqs 1 and 2 will agree within 1%. When the correction factor,  $T_1$ , is greater than 2%, Eq 2 should not be used.

**6.2 Procedure B—Elevated Temperature Testing**—Determine the mass, dimensions, and frequencies at room temperature in air as outlined in 6.1. Place the specimen in the furnace and adjust the driver-detector system so that all the frequencies to be measured can be detected without further adjustment. Determine the resonant frequencies at room temperature in the furnace cavity with the furnace doors closed, etc., as will be the case at elevated temperatures. Heat the furnace at a controlled rate that does not exceed 150 C/h. Take data at 25-deg intervals or at 15-min intervals as dictated by heating rate and specimen composition. Follow the change in resonance frequencies with time closely to avoid losing the identity of each frequency. (The overtone in flexure and the fundamental in torsion may be difficult to differentiate if not followed closely; spurious frequencies inherent in the system may also appear at temperatures above 600 C using certain types of suspensions, particularly wire.) If desired, data may also be taken on cooling; it must be remembered, however, that high temperatures may damage the specimen, by serious warping for example, making subsequent determinations of doubtful value.

**6.3 Procedure C—Cryogenic Temperature Testing**—Determine the weight, dimensions, weight, and resonance frequencies in air at room temperature. Measure the resonance frequencies at room temperature in the cryogenic chamber. Take the chamber to the minimum temperature desired (Note 4), monitoring frequencies as the chamber is cooled. Allow the specimen to stabilize at minimum temperature for at least 15 min. Take data on heating. Heating rate should not exceed 50 C/h and data may be taken at intervals of 10 min or 15 C or as desired.

**NOTE 4**—Precautions should be taken to remove water vapor from the chamber by flushing the dry nitrogen gas prior to chilling so that frost deposits on the specimen do not cause anomalous results.

## 7. Calculations

### 7.1 Young's Modulus:

7.1.1 For the fundamental in flexure of a rectangular bar (Note 5):

$$E = 96.517 (L^3/bt^3) T_1 w f^2 \times 10^{-4} \quad (1)$$

where:

$E$  = Young's modulus, kgf/cm<sup>2</sup>,

$L$  = length of the bar, cm,

$b$  = width of the bar, cm,

$t$  = thickness of the bar, cm,

$w$  = weight of the bar, g,

$f$  = resonance frequency of bar, Hz, and

$T_1$  = correction factor for fundamental flexural mode to account for finite thickness of bar, Poisson's ratio, etc. (See Table 1 for a plot of  $T_1$  as a function of bar dimensions and Poisson's ratio.)

**NOTE 5**—Pickett and Goens have analyzed the relationship of the general equation for modulus of elasticity:

$$M = Kw/f^2$$

where:

$M$  = elastic modulus,

$K$  = factor whose value depends on the dimensions of the bar and the particular characteristic vibration being investigated,

$w$  = weight of the bar, and

$f$  = frequency, Hz, of the characteristic vibration.

From this equation they have developed specific equations for use in the flexural and torsional modes of vibration (Eqs 1 to 6). Their work was presented in the following journals:

Pickett, G. "Equations for Computing Elastic Constants from Flexural and Torsional Resonant Frequencies of Vibration of Prisms and Cylinders," *Proceedings, Am. Soc. Testing Mats., ASTM A*, Vol. 45, 1945, pp. 846-865.

Goens, E. "Über die Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Stäben mit Hilfe von Biegeschwingungen," *Annalen der Physik, B. Folge*, Band 11, 1931, pp. 649-678.

7.1.2 For the first overtone in flexure of a rectangular bar (Note 5):

$$E = 12.703 (L^3/bt^3) T_2 w f^2 \times 10^{-4} \quad (2)$$

where:

$T_2$  = correction factor for first overtone in flexure. (See Table 2 for a plot of  $T_2$  as a function of bar dimensions and Poisson's ratio.)

7.1.3 For the fundamental in flexure of a rod of circular cross section (Note 5):

$$E = 1.6408 (L^3/D^3) T_1 w f^2 \times 10^{-4} \quad (3)$$

where:

$D$  = diameter of rod, cm,

7.1.4 For the first overtone in flexure of a rod of circular cross section (Note 5):

$$E = 21.567 (L^3/D^3) T_2 w f^2 \times 10^{-4} \quad (4)$$

### 7.2 Shear Modulus:

7.2.1 For the fundamental torsion of a rectangular bar (Note 5):\*

$$G = (10.197 B w f^2 \times 10^{-7}) / (1 + A) \quad (5)$$

where:

$G$  = shear modulus, kgf/cm<sup>2</sup>,

$$B = \frac{4L}{\pi} \left[ \frac{b/t + t/b}{4(t/b) - 2.52(t/b)^2 + 0.21(t/b)^4} \right]$$

and

$A$  = correction factor dependent on the width-to-thickness ratio of the test specimen. (See Fig. 6 for a plot of  $A$  as a function of the width to thickness ratio.)

7.2.2 For the fundamental torsion of a cylindrical rod:

$$G = (2 L w f^2 \times 10^{-7}) / \pi r^2 \quad (6)$$

where:

$G$  = shear modulus, kgf/cm<sup>2</sup>, and

$r$  = radius of rod, cm.

### 7.3 Poisson's Ratio:

$$\mu = (E/2G) - 1 \quad (7)$$

where:

$\mu$  = Poisson's ratio,

$E$  = Young's modulus, and

$G$  = shear modulus.

7.4 Calculation of moduli at elevated and cryogenic temperatures:

$$M_T = M_0 [r/(1 + \alpha \Delta T)] \quad (8)$$

where:

$M_T$  = modulus at temperature  $T$ ,

$M_0$  = modulus at room temperature,

$f_T$  = resonance frequency in furnace or cryogenic chamber at temperature  $T$ ,

$f_0$  = resonance frequency at room temperature in furnace or cryogenic chamber,



$\alpha$  = average linear thermal expansion coefficient of specimen from room temperature to test temperature, cm/cm-deg C, and  
 $\Delta T$  = temperature differential, test temperature from room temperature.

## 8. Report

8.1 The report shall include the following:  
8.1.1 Identification of specific tests performed and apparatus used.

8.1.2 Complete description of material(s) tested stating its composition, melt number, annealing schedule or ceramming schedule, and any other treatment such as chemical strengthening, etc., to which it has been subjected. Comments on surface finish, edge conditions, etc. shall be included where pertinent.

8.1.3 Name of person requesting test.

8.1.4 Laboratory notebook number and page on which test data is recorded; file number if used, and

8.1.5 Numerical values obtained for Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio.

## 9. Precision and Accuracy

9.1 Precision and accuracy on the order of 1% for moduli and 10% for Poisson's ratio is possible if all tolerances on dimensions are observed, resonance frequencies are measured with a frequency counter, and the weight of the specimen is measured within 10 my

\*Shear modulus correction taken from Spinner, S., and Valore, R. C. "Comparison of Theoretical and Empirical Relations Between the Shear Modulus and Torsional Resonance Frequencies for Bars and Rectangular Cross Sections," *Journal of Research Nat. Bureau Standards, JNBA A*, Vol. 60, 1958, RP2761, p. 459.

TABLE 1 Correction Factor,  $T_1$ , for the Fundamental Mode of Flexural Vibration

$K(l/L)^2$	Poisson's Ratio			
	0.15	0.20	0.25	0.30
0.000	1.009000	1.009000	1.009000	1.009000
0.005	1.002029	1.002053	1.002077	1.002100
0.010	1.008102	1.008199	1.008295	1.008388
0.015	1.018186	1.018405	1.018619	1.018826
0.020	1.032233	1.032618	1.032994	1.033360
0.025	1.050174	1.050765	1.051344	1.051916
0.030	1.071920	1.072753	1.073577	1.074393
0.035	1.097378	1.098495	1.099599	1.100694
0.040	1.126452	1.127684	1.129102	1.130711
0.045	1.159039	1.160817	1.162582	1.164337
0.050	1.195038	1.197191	1.199332	1.201464
0.055	1.234351	1.236986	1.239648	1.242336
0.060	1.276886	1.279865	1.282836	1.285807
0.065	1.322555	1.325980	1.329401	1.332822
0.070	1.371276	1.375167	1.379065	1.382977
0.075	1.422574	1.427352	1.432127	1.436899
0.080	1.475564	1.482465	1.489380	1.496307
0.085	1.530343	1.540446	1.545901	1.551420
0.090	1.585298	1.601240	1.607259	1.613367
0.095	1.658300	1.664800	1.671405	1.678129
0.100	1.724807	1.731082	1.738298	1.745669
0.105	1.793292	1.800052	1.807994	1.815954
0.110	1.863393	1.871677	1.880193	1.888956
0.115	1.935012	1.945932	1.955140	1.964653
0.120	2.011216	2.022795	2.032727	2.041930
0.125	2.091985	2.102247	2.111937	2.121075
0.130	2.173303	2.184276	2.194562	2.203781
0.135	2.257157	2.268871	2.281194	2.294446
0.140	2.343539	2.356026	2.369231	2.383174
0.145	2.432439	2.445736	2.459873	2.474869
0.150	2.523855	2.538002	2.553126	2.569244

\* For cylindrical rods  $K = \frac{1}{2}$ , and  
For rectangular bars  $K = 1/3.4641$ .

TABLE 2 Correction Factor,  $T_1$ , for the First Overtone of Flexural Vibration

$K(l/L)^2$	Poisson's Ratio			
	0.15	0.20	0.25	0.30
0.000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
0.025	1.901422	1.901445	1.901467	1.901489
0.050	1.005681	1.005724	1.005763	1.005802
0.075	1.012770	1.012973	1.013174	1.013373
0.100	1.022660	1.023019	1.023376	1.023732
0.125	1.035326	1.035885	1.036440	1.036987
0.150	1.050734	1.051537	1.052327	1.053108
0.175	1.068884	1.069926	1.070995	1.072054
0.200	1.089613	1.091015	1.092401	1.093775
0.225	1.112996	1.114756	1.116497	1.118223
0.250	1.138949	1.141103	1.143235	1.145352
0.275	1.167429	1.170012	1.172573	1.175115
0.300	1.198394	1.201441	1.204465	1.207470
0.325	1.231807	1.235353	1.238874	1.242376
0.350	1.267633	1.271711	1.275764	1.279800
0.375	1.305864	1.310487	1.315106	1.319710
0.400	1.346414	1.351656	1.356876	1.362084
0.425	1.389225	1.395199	1.401055	1.406905
0.450	1.434563	1.441104	1.447633	1.454162
0.475	1.482122	1.489364	1.496602	1.503850
0.500	1.532000	1.539980	1.547966	1.555973
0.525	1.584202	1.592896	1.601673	1.610540
0.550	1.638741	1.648312	1.657917	1.667572
0.575	1.695636	1.706063	1.716543	1.727092
0.600	1.754912	1.766240	1.777642	1.789116
0.625	1.816603	1.828880	1.841254	1.853748
0.650	1.880724	1.894022	1.907428	1.920979
0.675	1.947405	1.961734	1.976222	1.990892
0.700	2.016625	2.032066	2.047703	2.063560
0.725	2.088477	2.105995	2.121950	2.139068
0.750	2.163081	2.180696	2.199055	2.217513
0.775	2.240405	2.259595	2.279119	2.299006
0.800	2.320672	2.341270	2.362262	2.383673
0.825	2.403955	2.426056	2.448613	2.471654
0.850	2.490383	2.514090	2.538324	2.563111
0.875	2.580008	2.605327	2.631359	2.658220
0.900	2.673262	2.700540	2.728506	2.757184

\* For cylindrical rods  $K = \frac{1}{2}$ , and  
For rectangular bars  $K = 1/3.4641$ .

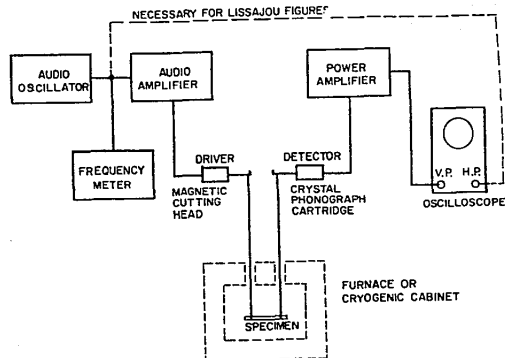
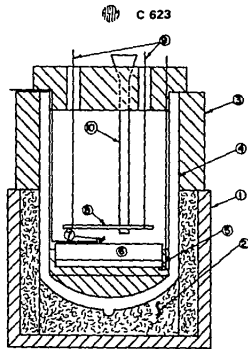


FIG. 1 Block Diagram of Apparatus.



- 1—Cylindrical glass jar
- 2—Glass wool
- 3—Plastic foam
- 4—Vacuum jar
- 5—Heater disk
- 6—Copper plate
- 7—Thermocouple
- 8—Sample
- 9—Suspension wires
- 10—Fill port for liquid

FIG. 2 Detail Drawing of Suitable Cryogenic Chamber.

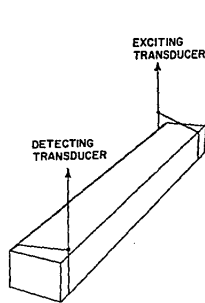


FIG. 3 Specimen Positioned for Measurement of Flexural and Torsional Resonance Frequencies Using Thread or Wire Suspension.

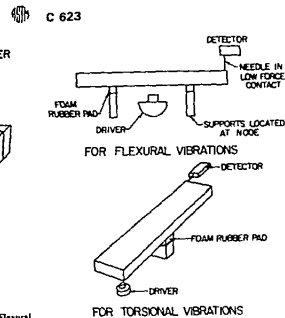
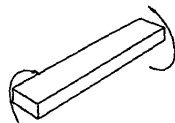


FIG. 4 Specimen Positioned for Measurement of Flexural and Torsional Resonance Frequencies Using "Twister" Exciter.



FUNDAMENTAL IN FLEXURE



FUNDAMENTAL IN TORSION

FIG. 5 Some Modes of Mechanical Vibration in a Bar.

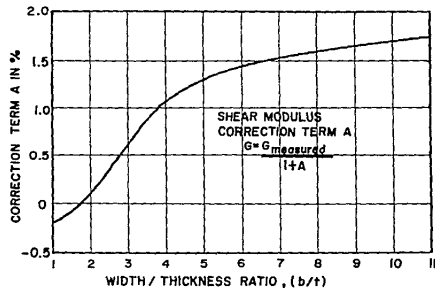


FIG. 6 Plot of the Shear Modulus Correction Term A.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, Pa. 19101.

## APENDICE E

### FUNDAMENTOS DE VIBRACIONES MECANICAS

Una vibración mecánica es el movimiento de una partícula o de un cuerpo que oscila alrededor de una posición de equilibrio. La mayor parte de las vibraciones mecánicas son indeseables porque aumentan los esfuerzos en los cuerpos que están sujetos a éstas, además que en la mayoría de los casos las vibraciones mecánicas significan pérdida de energía en el sistema. El análisis de vibraciones se ha vuelto cada vez más importante en virtud de emplear sistemas (máquinas) más eficientes, más veloces y menos pesados.

Una vibración mecánica se produce casi siempre cuando un sistema es desplazado desde una posición de equilibrio estable. El sistema tiende a regresar a esa posición bajo la acción de fuerzas de restitución (ya sean fuerzas elásticas como en el caso de un sistema masa-resorte, o bien fuerzas gravitatorias como en el caso de un péndulo). Pero el sistema alcanza generalmente su posición inicial con cierta velocidad adquirida que lo lleva más allá de esa posición. Como el proceso puede repetirse indefinidamente, el sistema permanece moviéndose de un lado a otro pasando por su posición de equilibrio. El intervalo de tiempo necesario para que el sistema efectúe el ciclo completo de movimiento se conoce como "periodo de vibración". El número de ciclos por unidad de tiempo define la "frecuencia de vibración" y el desplazamiento máximo del sistema de su posición de equilibrio se llama "amplitud de vibración".

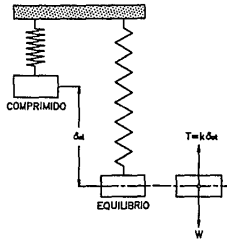
Cuando el movimiento es mantenido únicamente por las fuerzas de restitución se dice que la vibración es libre. Cuando se aplica una fuerza al sistema, el movimiento resultante se describe como una vibración forzada. En el caso de que los efectos de rozamiento puedan despreciarse y no existan elementos disipadores de energía, se dice que la vibración es no amortiguada, pero en realidad cualquier vibración es amortiguada en cierto grado. Si una vibración libre es sólo ligeramente amortiguada, su amplitud decrece lentamente hasta que después de cierto tiempo el movimiento se detiene. Pero el amortiguamiento puede ser lo bastante grande para impedir cualquier vibración real; el sistema regresa entonces lentamente a su posición inicial. Una vibración forzada amortiguada dura tanto como el tiempo de aplicación de la fuerza periódica que produce la vibración, pero la amplitud de vibración se modifica por la magnitud de las fuerzas de amortiguamiento.

#### *E.1. Movimiento armónico simple.*

Como ejemplo demostrativo se resolverá el sistema vibratorio más sencillo, el cual es el sistema masa-resorte, con el fin de introducir, de manera matemática, los conceptos de vibraciones mecánicas más simples utilizados en el capítulo III.

Considérese un cuerpo de masa  $m$  unido a un resorte de constante  $k$  (ver fig. 1).

Fig.1.



Debido a que sólo importa el movimiento de la masa, podemos referir a ésta como si fuera una partícula. Cuando la partícula se encuentra en equilibrio estático, las fuerzas que actúan sobre ella son su peso  $W$  y la fuerza ejercida por el resorte  $T$ , de magnitud  $T = k\delta_{est}$ , donde  $\delta_{est}$  representa la elongación del resorte debido al peso de la masa, tenemos, por consiguiente:

$$W = k\delta_{est} \quad (e.1)$$

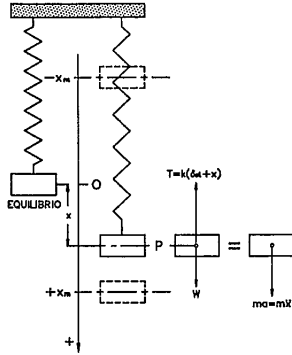
Supóngase que ahora la partícula es desplazada una distancia  $x_m$  desde su posición de equilibrio y se suelta sin velocidad inicial. Si  $x_m$  se ha escogido más pequeña que  $\delta_{est}$ , la partícula se moverá hacia atrás, esto es cuando se comprime el resorte, al soltar la partícula se produce una vibración con amplitud  $x_m$ . Nótese que la vibración puede también producirse dándole cierta velocidad inicial a la partícula cuando está en su posición de equilibrio  $x=0$ , o en forma más general, cuando se suelta la partícula desde una posición  $x=x_0$  con una velocidad inicial  $v_0$ .

Para analizar la vibración consideraremos a la partícula en una posición  $P$  en cierto tiempo  $t$  (ver fig.2).

Representando por  $x$  el desplazamiento  $OP$  medido desde la posición de equilibrio  $O$  (positivo hacia abajo), notamos que las fuerzas que actúan sobre la partícula son su peso  $W$  y la fuerza  $T$  ejercida por el resorte, que en esta posición tiene una magnitud  $T = k(\delta_{est} + x)$  y de la ecuación (e.1), encontramos que la magnitud de la fuerza  $F$ , dirigida hacia abajo es:

$$F = W - k(\delta_{est} + x) = -kx \quad (e.2)$$

Fig. 2.



En esta forma la resultante de las fuerzas ejercidas sobre la partícula es proporcional al desplazamiento  $OP$  (medido desde el punto de equilibrio). Recordando la convención de signos, notamos que  $F$  está siempre dirigida hacia la posición de equilibrio  $O$  y aplicando la segunda ley de Newton tenemos, en la cual  $F=ma$  tenemos:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (e.3)$$

La ecuación (e.3) es una ecuación diferencial lineal de segundo orden. Escogiendo:

$$p^2 = \frac{k}{m} \quad (e.4)$$

por lo que la ecuación (e.3) puede escribirse de la siguiente forma:

$$m\ddot{x} + p^2x = 0 \quad (e.5)$$

El movimiento definido por la ecuación (e.5) se denomina "movimiento armónico simple", y es la forma más sencilla de vibración. Se caracteriza por el hecho de que la aceleración es proporcional al desplazamiento pero en sentido opuesto. La solución general a la ecuación diferencial (e.5) es:

$$x = Ax_1 + Bx_2 = A \operatorname{sen} pt + B \cos pt \quad (\text{e.6})$$

Al derivar dos veces la ecuación (e.6), la posición con respecto al tiempo obtenemos la velocidad y la aceleración respectivamente:

$$v = \dot{x} = Ap \cos pt - Bp \operatorname{sen} pt \quad (\text{e.7})$$

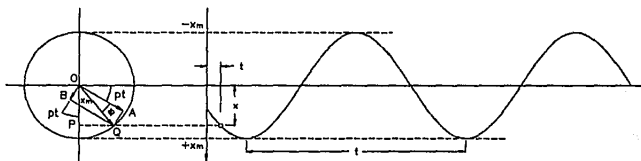
$$a = \ddot{x} = -Ap^2 \operatorname{sen} pt - Bp^2 \cos pt \quad (\text{e.8})$$

Como la solución obtenida contiene dos constantes arbitrarias  $A$  y  $B$ , la ecuación obtenida es la solución de la ecuación diferencial. El valor de las constantes  $A$  y  $B$  depende de las condiciones iniciales del movimiento. Por ejemplo, tenemos  $A=0$  si la partícula es desplazada desde su posición de equilibrio y se suelta en  $t=0$  sin imprimirle velocidad inicial, y tenemos  $B=0$  si la partícula se encuentra en  $t=0$  en  $x_0=0$  pero se le imprime una velocidad inicial. En general, sustituyendo para  $t=0$  y los valores iniciales del desplazamiento y la velocidad  $x_0$  y  $v_0$  del desplazamiento, encontramos:

$$A = \frac{v_0}{p}, \quad B = x_0 \quad (\text{e.9})$$

Las expresiones obtenidas para el desplazamiento, la velocidad y la aceleración de la partícula, pueden escribirse de forma más compacta si observamos que la ecuación (e.8) expresa que el desplazamiento  $x=OP$  es la suma de los componentes  $x$  de los dos vectores  $A$  y  $B$  (ver fig. 3).

Fig. 3.





Conforme  $t$  varía, ambos vectores giran en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj; notamos también que la magnitud de su resultante  $OP$  es igual al desplazamiento máximo  $x_m$ . El movimiento armónico simple de  $P$  a lo largo del eje  $x$  puede obtenerse entonces proyectando sobre este eje el movimiento de un punto  $Q$  que describe un círculo de radio  $x_m$  con una velocidad angular constante  $p$ .

Representando por  $\phi$  el ángulo formado por los vectores  $OQ$  y  $A$ , escribimos:

$$OP = OQ \operatorname{sen}(pt + \phi) \quad (\text{e.10})$$

La ecuación (e.10) conduce a nuevas expresiones de desplazamiento, velocidad y aceleración de  $P$ :

$$x = x_m \operatorname{sen}(pt + \phi) \quad (\text{e.11})$$

$$v = x_m p \cos(pt + \phi) \quad (\text{e.11})$$

$$a = -x_m p^2 \operatorname{sen}(pt + \phi) \quad (\text{e.12})$$

La curva de desplazamiento-tiempo se representa por una curva senoidal (ver fig. 3) y el máximo valor  $x_m$  se conoce como la amplitud de vibración. La velocidad angular  $p$  del punto  $Q$  que describe el círculo se conoce como la frecuencia natural de vibración expresada en  $[\text{rad/s}]$ , mientras que el ángulo  $\phi$  que define la posición inicial de  $Q$  sobre el círculo se define como el ángulo de fase. El tiempo (en segundos) necesario para que  $Q$  recorra un ciclo se conoce como el periodo de vibración:

$$\text{Periodo} = \tau = \frac{2\pi}{p} \quad (\text{e.13})$$

y el número de ciclos que se efectúan por unidad de tiempo es la frecuencia de vibración, la cual se expresa en *ciclos por segundo* o *hertz*:

$$\text{Frecuencia} = f = \frac{1}{\tau} = \frac{p}{2\pi} \quad (\text{e.14})$$