

29
53

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

MEJORAS EN LA EFICIENCIA DE
UN CONCENTRADOR SOLAR POR
MEDIO DE VACIO

Tesis Profesional
Para obtener el título de Físico

PRESENTA

CARLOS RAUL SANDOVAL ALVARADO

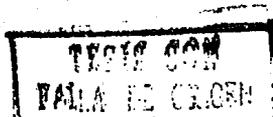
DIRECTOR DE TESIS

DR. RAFAEL ALMANZA SALGADO

ASESOR DE TESIS

DR. MARCOS MAZARI MENZER

Abril de 1989





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.

INDICE

-- RESUMEN	1
-- INTRODUCCION	2
1. CONSIDERACIONES TEORICAS SOBRE LA ELASTICIDAD Y PLASTICIDAD DE DOS CUERPOS EN CONTACTO (PLACA METALICA Y CILINDRO DE DISTINTOS MATERIALES).	
1.1) Propiedades elásticas en materiales sólidos cohesivos sometidos a esfuerzos de compresión.	6
1.2) Falla progresiva de un cuerpo sometido a una carga creciente.	9
1.3) Cálculo de esfuerzos de compresión y áreas de contacto para diversos materiales.	11
2. FUNDAMENTOS Y TECNICAS DE ALTO VACIO.	
2.1) Características de los metales para cámaras de alto vacío.	
a) Permeabilidad en metales.	14
b) Presión de vapor y desgasificación en metales.	16
c) Sellos metálicos.	17
2.2) Descripción del sistema de vacío empleado.	
a) Velocidad de bombeo y conductancia.	19
b) Bomba mecánica.	20
c) Bomba de difusión.	22
d) Medidores de vacío.	
α) De termopar.	24
β) De ionización.	25
2.3) Funcionamiento del sistema.	27
2.4) Detección de fugas.	27
2.5) Cuidados en su funcionamiento y normas de seguridad.	27

3. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA CAMARA DE ALTO VACIO PARA PROBAR SELLOS METALICOS.	
3.1) Partes que la constituyen.	28
3.2) Pruebas preliminares para la caracterización de las cámaras de vacío.	
a) Máximos vacíos logrados en el sistema de ensayo y pérdida de éstos en el tiempo.	30
3.3) Construcción y prueba de anillos de estaño-plomo y cobre para ser usados como sellos para alto vacío.	
a) Elaboración de los anillos metálicos.	32
b) Medición de las fuerzas aplicadas sobre las bridas de la zona de pruebas.	33
c) Pruebas con los sellos construidos.	34
4. DISEÑO DE UN TUBO ABSORBEDOR EVACUADO.	42
5. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS.	46
-- Referencias.	48
-- Agradecimientos.	50

RESUMEN

Se desarrolla una tecnología para la producción y conservación de altos vacíos (10^{-4} a 10^{-6} Torr), fabricando una cámara desarmable, empleando anillos metálicos de cobre o estaño-plomo como sellos, colocados entre bridas de acero inoxidable y un tubo que puede ser de cerámica supercompacta o de vidrio Pyrex. Los sellos son comprimidos por medio de resortes colocados en los tornillos que comprimen a las bridas contra los tubos mencionados anteriormente. Para producir el sellado por deformación plástica, con los resortes se mantiene sobre el sello el esfuerzo compresivo necesario para que el material del sello pase del estado elástico al estado elasto-plástico sin pérdida de rigidez en la unión sello-brida.

Con las cámaras construidas, los máximos vacíos obtenidos fueron de 1.8×10^{-5} Torr para la cámara con tubo de vidrio y de 7.8×10^{-7} Torr para la cámara con tubo de cerámica, conservándose vacíos entre 10^{-4} y 10^{-3} Torr durante dos días. Al ser sometidas las cámaras evacuadas a cambios de temperatura entre los 20°C y los 270°C , se observó que la rigidez de la unión sello-brida no se perdió, debido a la acción de los resortes, manteniéndose el vacío.

En las pruebas realizadas con sellos de estaño-plomo, los esfuerzos compresivos, necesarios para el sellado, fueron seis veces menores a los valores dados por la teoría; con los sellos de cobre la discrepancia entre los valores obtenidos en las pruebas y los dados por la teoría son del 75%. Esto se debe a que la caracterización de los materiales no fue suficientemente obtenida por la diversidad de los tipos de cobre, y a que el estaño-plomo tuvo un núcleo de resina.

INTRODUCCION

Un concentrador solar cilíndrico-parabólico consiste en una superficie reflectora, de forma canal parabólica, que tiene en su línea focal un tubo absorbedor de la radiación solar reflejada por los espejos, el cual es concéntrico con un tubo de vidrio que le sirve de cubierta protectora. El tubo absorbedor transforma la radiación solar en calor, que se transmite a un fluido de trabajo que circula en su interior. (Ver figura 1).

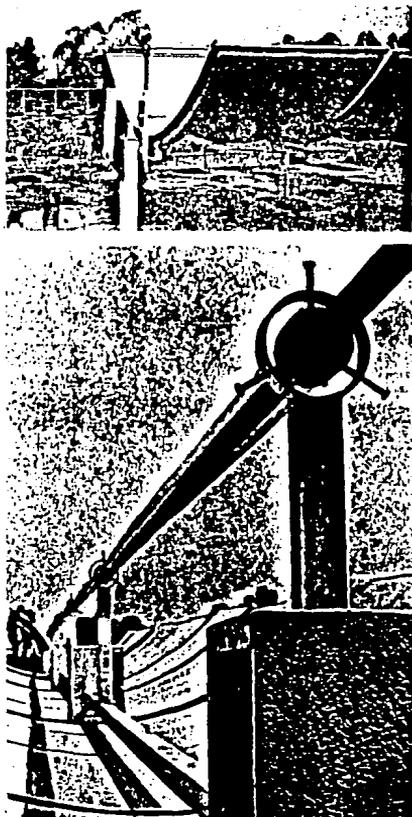


Fig. 1 Concentrador solar de tipo canal-parabólico

Los problemas que se presentan en el funcionamiento de los receptores de radiación solar en los concentradores solares cilíndrico-parabólicos, actualmente en operación (Ref 2) son:

- La cubierta selectiva de cromo negro, que recubre al absorbedor, se degrada fácilmente a las temperaturas de trabajo (300°C) con las condiciones ambientales como son la contaminación atmosférica y la humedad del aire.
- La evacuación del espacio entre el tubo absorbedor y su cubierta de vidrio es difícil de obtener y mantener sin bombeo continuo.
- Los canales de filtración que se producen en el sellado vidrio-metal de los receptores, una vez instalados, no pueden repararse, pues la unión vidrio-metal es permanente.

Se desea un concentrador solar de tipo cilíndrico-parabólico con las siguientes características (Ref 1):

- Un receptor de radiación solar constituido por un tubo absorbedor y su cubierta protectora de vidrio, evacuado a presiones de 10^{-4} Torr o menores y que mantenga este vacío, sin bombeo continuo, para reducir las pérdidas de calor por convección y conducción (figura 2).
- Los tubos absorbedores, bridas metálicas y fuelles deben ser de un material con poca permeabilidad y baja desgasificación, por ejemplo el acero inoxidable 304.
- Un sellado vidrio-metal que no origine vías de admisión de aire, provocadas por la diferencia de dilatación debida a cambios térmicos entre el tubo absorbedor (de metal) y la cubierta protectora (tubo de vidrio).
- El receptor debe ser fácilmente desmontable (receptores modulares).

Los receptores evacuados proporcionan una mejora en su funcionamiento al eliminar las pérdidas por convección y conducción asociadas con la transferencia de calor entre el tubo absorbedor recubierto con cromo negro y el tubo de vidrio que lo rodea (figura 2). Las pérdidas de energía, debidas a la convección del aire, entre los tubos absorbedor y de vidrio, son casi cero a presiones menores de 10^{-4} Torr como se muestra en la figura 3.

La puesta en operación, con cambios térmicos considerables, de un receptor solar a alto vacío, por un periodo largo de tiempo, presenta dificultades como son: creación posible de fugas microscópicas, (vías de admisión de aire) desgasificación de la superficie del tubo absorbedor y la permeabilidad y desgasificación del tubo de vidrio del mismo tubo absorbedor. Por esto, los problemas asociados con los sellos para vacío utilizados en el receptor son críticos para que el receptor funcione con una eficiencia mayor a la obtenida en receptores sin evacuación.

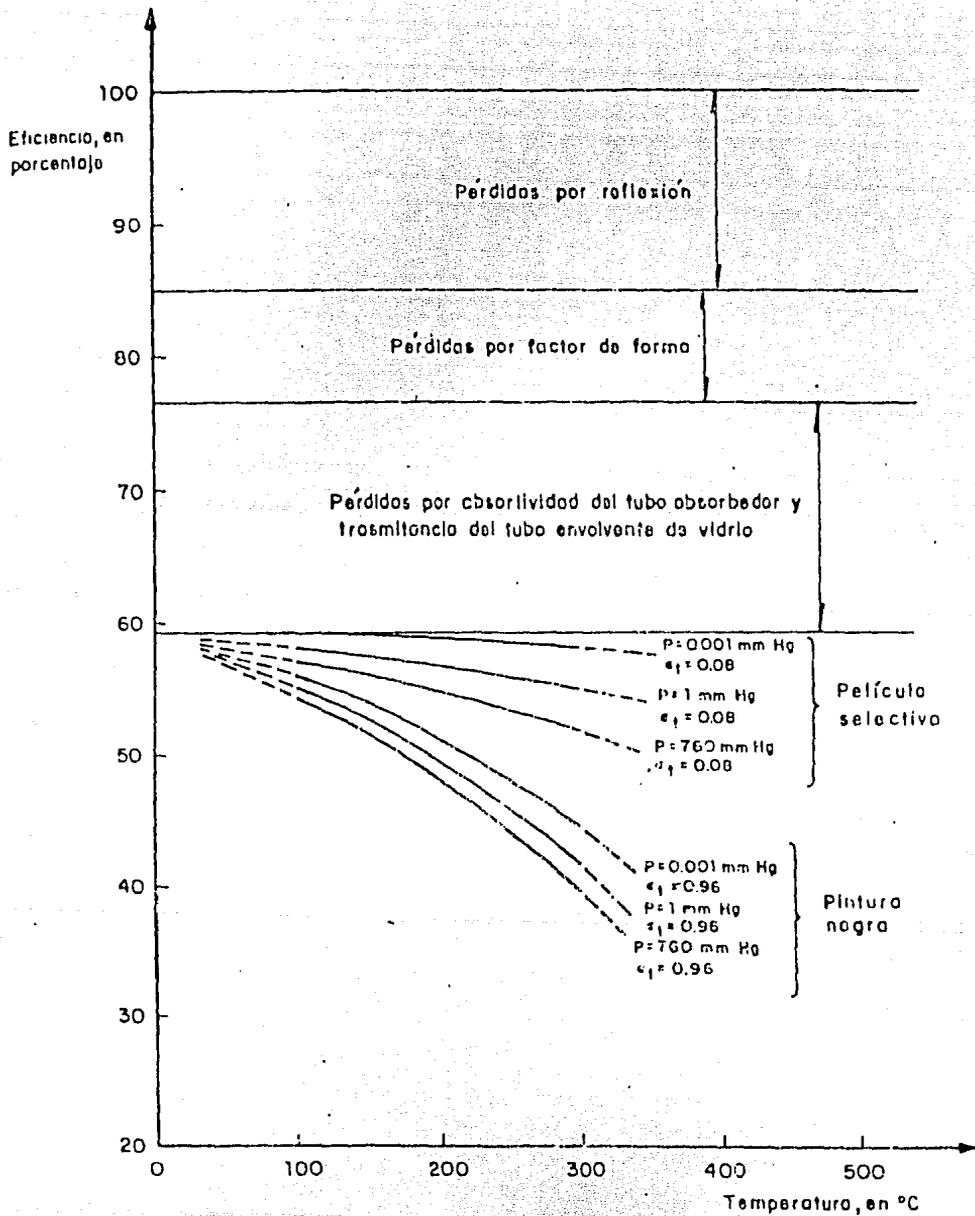


Fig. 2 Eficiencia de un concentrados tipo canal parabólico.

El objetivo de este trabajo es desarrollar una técnica de sellado vidrio-metal y cerámica-metal utilizando sellos metálicos hechos con alambre de estaño-plomo o cobre, de tal manera que se compensen las diferencias de dilatación térmica entre el metal y el vidrio o la cerámica y que los esfuerzos mecánicos producidos sean amortiguados por resortes, pudiendo mantener presiones del orden de 10^{-4} Torr o menores sin bombeo continuo y por periodos prolongados.

Los sellos utilizados en la actualidad no cumplen con los requerimientos para los cuales se desea utilizarlos, como son: la unión de metal-vidrio o metal-cerámica sin el empleo de pegamentos o soldadura, pues se desean sistemas de vacío desarmables con la finalidad de reponer piezas gastadas o añadir módulos que amplíen el sistema (Refs. 1, 2, 12 y 23). Es común en la práctica actual observar frecuentes roturas en los tubos de vidrio soldados o pegados a piezas metálicas, debidas a los coeficientes diferenciales de expansión térmica de los elementos.

Pérdidas de calor por conducción para un anillo a presión P.
 Pérdidas de calor por conducción para un anillo a presión atmosférica.

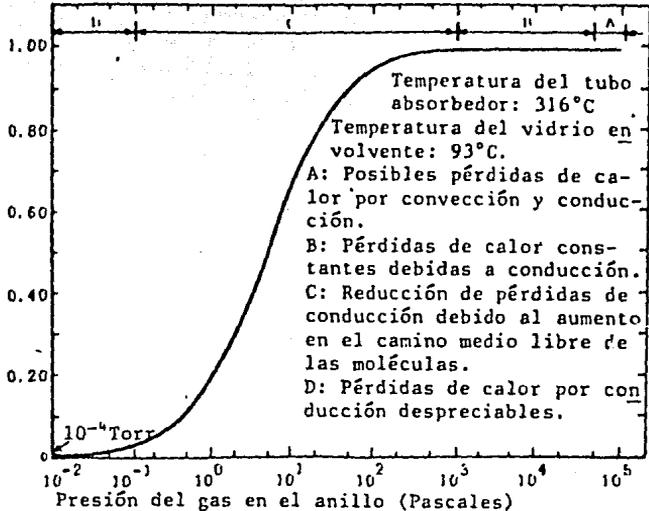


Fig. 3 Efecto de la reducción de presión en el anillo formado por el tubo absorbedor y la envoltente de vidrio.
 (1 Torr = 133 pascales)

El primer capítulo, cubre la descripción teórica del comportamiento elasto-plástico de materiales puestos en contacto bajo esfuerzos de compresión, enfocándose a la unión de un cuerpo cilíndrico con una placa plana (medio semi-infinito), y a la superficie de contacto generada por la plastificación del cuerpo cilíndrico.

El capítulo dos trata los aspectos básicos de las técnicas para la obtención de alto vacío y su medición, tomando aspectos como la permeabilidad, degasificación y presión de vapor de algunos metales; así como la descripción del sistema de evacuación empleado, su funcionamiento y normas de seguridad.

En el capítulo tres se describe el diseño, construcción y funcionamiento de los dispositivos empleados para conocer el comportamiento elasto-plástico de los toroides fabricados con estaño-plomo o cobre, la elaboración de los sellos, el mecanismo de control de la fuerza aplicada sobre las bridas, produciendo los esfuerzos de compresión que actúan sobre los arosellos a ser probados, y los resultados de las pruebas efectuadas con estos elementos a temperatura ambiente y bajo cambios térmicos.

En el capítulo cuatro se describe el diseño de un tubo concentrador solar en el cual se emplean los sellos metálicos propuestos en esta tesis.

1. CONSIDERACIONES TEORICAS SOBRE LA ELASTICIDAD Y PLASTICIDAD DE DOS CUERPOS EN CONTACTO (PLACA Y CILINDRO DE DISTINTOS MATERIALES).

1.1) Propiedades elásticas en materiales sólidos cohesivos sometidos a esfuerzos de compresión.

Los medios granulares pueden presentar características cohesivas, fricciones o una combinación de ambas (en suelos el agua juega un papel importante en su comportamiento). En general, los metales presentan características cohesivas (resistencia al esfuerzo cortante) y pueden tratarse con técnicas del medio continuo (elasticidad y plasticidad).

Al comprimir un cilindro contra una placa (que pueden ser de distintos materiales) se forma una superficie de contacto entre ambas, de pendiente de la presión con la que son puestas en contacto. El número de partículas que interactúan en la unión, que a escala o a microscópica pueden ser átomos ó moléculas, depende de los materiales empleados.

Se consideró, en forma ideal, que si el diámetro de un átomo fuera del orden de 10^{-8} cm y que éstos pudieran alinearse en dirección en el ancho de la superficie de contacto, que en este caso es del orden de 10^{-2} cm, entonces la cantidad de átomos alineados sería del orden de 100,000; por esta razón, el tratamiento a seguir será del tipo macroscópico, utilizando técnicas del medio continuo.

Si una fuerza externa actúa sobre un cuerpo constituido por material (cohesivo), se produce una deformación de éste (tratamiento macroscópico), la cual es el resultado de modificar las distancias entre las partículas que lo forman. En un medio continuo, la deformación unitaria por compresión es el cociente del acortamiento (deformación total) "Δl" entre la longitud original "L", o sea (Ref. 3).

$$e = \Delta l / L \tag{1.1}$$

Las fuerzas internas se modifican a fin de equilibrar las fuerzas externas y oponerse a la deformación; a esta variación, en función de la orientación, en las fuerzas internas se le denomina estado de esfuerzos. Se define un esfuerzo compresivo unitario "σ" por la relación (Ref. 3).

$$\sigma = f / A \tag{1.2}$$

donde "f" es la fuerza normal de compresión y "A" el área donde se aplica dicha fuerza.

La mayoría de los materiales sólidos cambian de forma cuando son sometidos a esfuerzos. Al eliminar esta fuerza de deformación, si el material recobra su forma y dimensiones originales se dice que este material se ha comportado elásticamente. La ley de Hooke establece que, dentro de ciertos límites, el esfuerzo en un

material es directamente proporcional a la deformación que se produce; analíticamente se tiene (ref. 3).

$$\sigma = Ee \quad (1.3)$$

donde "E" es la constante de proporcionalidad conocida como módulo de Young y "e" es la deformación unitaria.

Si en un cuerpo se ejerce una compresión longitudinal, se producirá simultáneamente un acortamiento longitudinal y una expansión transversal (esto solamente es válido para muestras de forma simétrica y compresión lateral nula, como son los cilindros). Para esfuerzos dentro del límite elástico en cada material, la relación entre las deformaciones unitaria transversal e_T y longitudinal e_L es una constante que se llama relación de Poisson dada por (Ref. 3):

$$\nu = - \frac{e_T}{e_L} \quad (1.4)$$

Si el esfuerzo compresivo en el cuerpo es tal que la ley de Hooke deja de ser aplicable, el material presenta un cambio permanente en su forma conocido como deformación plástica.

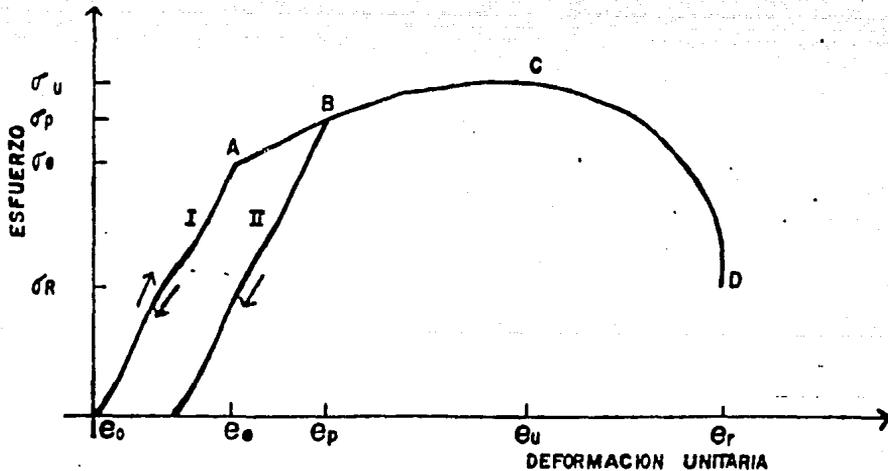
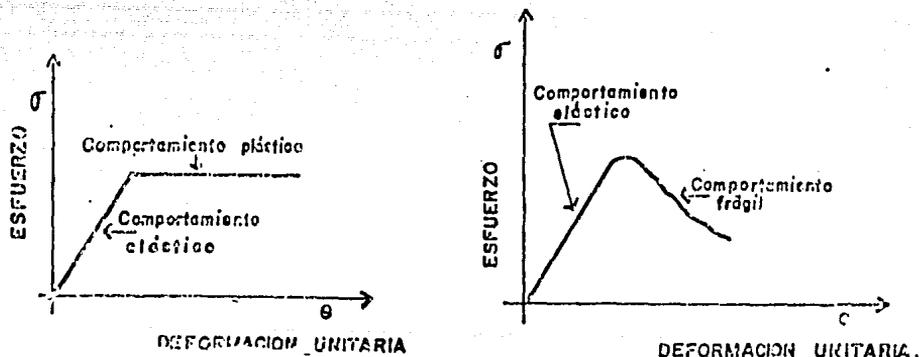


Fig. 1.1 Esfuerzo-deformación en materiales dúctiles (metales)

En la parte I de la figura 1.1, se observa que al aplicar un esfuerzo σ a un sólido elástico (caso ideal) tal que no exceda el límite elástico σ_e , el material regresa a su estado original (punto σ_0) al suprimir el esfuerzo σ . A partir del límite elástico (punto A), cualquier aumento en el esfuerzo σ (menor que σ_p) producirá una deformación permanente; al disminuir éste esfuerzo, el material se recupera elásticamente siguiendo la porción II. A partir del punto B, el material es capaz de seguir soportando nuevos incrementos en el esfuerzo, con deformaciones cada vez mayores. Se llega así al punto C que tiene la máxima ordenada del diagrama y que representa el máximo esfuerzo soportado, este esfuerzo es conocido como resistencia última σ_u . A partir del punto C la deformación aumenta aun con disminución en el esfuerzo, principiando la fractura y apareciendo finalmente la ruptura en el punto D.

En un medio elasto-plástico (caso ideal), se tiene el comportamiento mostrado en la figura (1.2 A); para materiales frágiles como el vidrio se tiene el comportamiento mostrado en la figura (1.2B).



A) Medio elasto-plástico
(caso ideal)

B) Materiales frágiles
(caso ideal)

Fig. 1.2 Esfuerzo-Deformación

1.20 Falla progresiva en un cuerpo sometido a una carga creciente.

Considerando el caso de un cuerpo (medio semi-infinito) al cual se le aplica una carga q , la estructura interna de este cuerpo se va a deformar, conforme se aumenta esta carga, por la generación de esfuerzos internos, originando que el material deje de comportarse elásticamente para dar lugar a zonas de plastificación. El estado elástico límite obtenido por Nabor Carrillo (Ref. 4) ocurrirá cuando $q=\pi C$ (la constante C es conocida como la cohesión del material); esta carga corresponde a pequeñas fallas localizadas en el interior del cuerpo, las cuales no llegan a producir una superficie de falla continua. Los estados de esfuerzo previos a la falla se distribuyen en el material como se muestra en la figura (1.3).

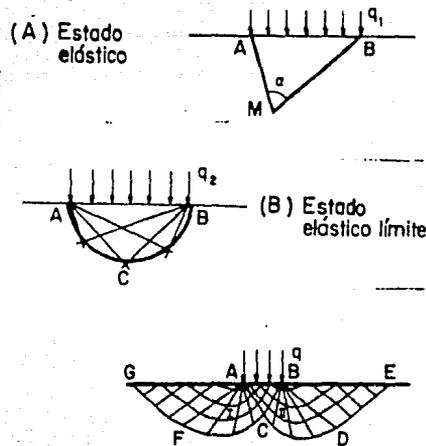


Fig. 1.3 Falla progresiva de un cuerpo en estado plástico (Ref.4)

En todo punto M (fig. 1.3A) los esfuerzos¹ forman el ángulo α entre MA y MB . Estos esfuerzos están dados por las fórmulas (Ref.4)

1 En un cuerpo sometido a esfuerzos, existen planos en los cuales el esfuerzo normal es máximo ó mínimo y el esfuerzo cortante es nulo. Estos planos se llaman principales y los esfuerzos normales que en ellos actúan a 90° entre sí, se llaman esfuerzos principales (Ref.4).

$$a) \sigma_1 = \frac{q}{\pi} (\alpha + \operatorname{sen} \alpha) \quad (1.5)$$

$$b) \sigma_2 = \frac{q}{\pi} (\alpha - \operatorname{sen} \alpha) \quad (1.6)$$

El máximo esfuerzo cortante está dado por (Ref. 4):

$$\tau_{\max} = \frac{q}{\pi} \operatorname{sen} \alpha \quad (1.7)$$

En materiales cohesivos, los máximos esfuerzos cortantes se encuentran en los puntos donde $\alpha = 90^\circ$; esto es, en los puntos del semicírculo ACB (fig. 1.3B) donde:

$$\tau_{\max} = \frac{q}{\pi} \quad (1.8)$$

Al seguir aumentando la carga, las zonas de plastificación aumentan, presentándose zonas de falla, las cuales se han extendido desde el semicírculo ABC hasta las zonas I y II (fig. 1.3C).

Para obtener la localización de las superficies de falla, *Vauter* (Ref. 5) utilizó el método de *Fellenius* (Ref. 6 y 7) de superficies circulares de falla para obtener la curva de deslizamiento, esto se conoce como capacidad límite de carga. La curva de deslizamiento se muestra en la figura 1.4, observándose que esta superficie circular coincide, con muy buena aproximación, con la superficie de falla obtenida por *Prandtl*, en la que $q = (c + 2)c$.

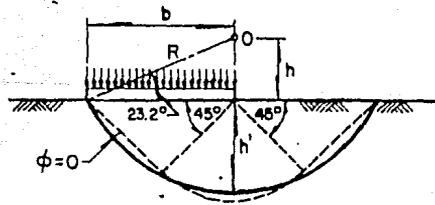


Fig. 1.4 Capacidad límite de carga, usando la suposición de superficies circulares de falla (Ref. 5)

1.3) Cálculo de esfuerzos de compresión y áreas de contacto en diversos materiales.

En 1861 *Hertz* (Ref. 8) desarrolló la teoría matemática de esfuerzos superficiales y deformaciones entre dos superficies en contacto, obteniéndose los esfuerzos de compresión, pero no los máximos esfuerzos cortantes que tienen lugar en el interior de las partes comprimidas. Posteriormente *Timoshenko* (Ref. 9) en 1934 obtuvo para distintos materiales en contacto las ecuaciones para calcular los esfuerzos de compresión y el ancho de la superficie generada al contacto entre estos cuerpos. Estas ecuaciones son para el caso de un cilindro sobre un plano, como se muestra en la figura 1.5 (Ref. 10).

$$\text{Máx. } S_c = 0.056 \sqrt{\frac{P}{D \left\{ \frac{1-\nu_1^2}{E_1} - \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right\}}} \quad (1.9)$$

$$b = 4.06 \sqrt{PD \left\{ \frac{1-\nu_1^2}{E_1} - \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right\}} \quad (1.10)$$

donde "Max S_c " es el máximo esfuerzo compresivo, " b "² es el ancho de la superficie de contacto, "E" es el módulo de elasticidad, " ν " es el módulo de Poisson, "D" es el diámetro del cilindro, "P" es la carga por unidad de longitud. Todas las longitudes están dadas en centímetros y las fuerzas en kilogramos fuerza.

2

"E" permite estimar el orden de magnitud del ancho de la superficie de contacto en un intervalo solamente elástico, al pasar del estado elástico al estado elasto-plástico.

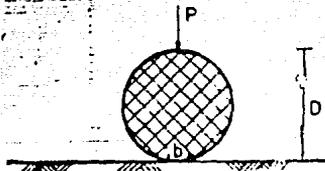


Fig. 1.5 Cilindro sobre plano semi-infinito (Ref. 10)

Para los materiales indicados en la Tabla I-1, los valores de "Max. Sc." y "b" en función del diámetro "D" del cilindro y para valores de $P_1 = 1 \text{ Kg/cm}$, $P_2 = 10 \text{ Kg/cm}$ y $P_3 = 100 \text{ Kg/cm}$, se obtuvieron las curvas mostradas en las gráficas a), b), c) y d) de la figura 1.6.

Tabla I-1

VALORES DE LOS MODULOS DE YOUNG Y DE POISSON UTILIZADOS PARA OBTENER MAX. Sc. Y b DE LA FIGURA 1.6

Material	E (Kg/cm ²)	ν	Modo de empleo
Acero inoxidable	2.00×10^6	.30	Placa
Vidrio	6.30×10^5	.20	Placa
Cerámica	2.46×10^5	.21	Placa
Cobre	1.09×10^6	.30	Cilindro
Estaño-plomo 60-40	3.06×10^5	.40	Cilindro

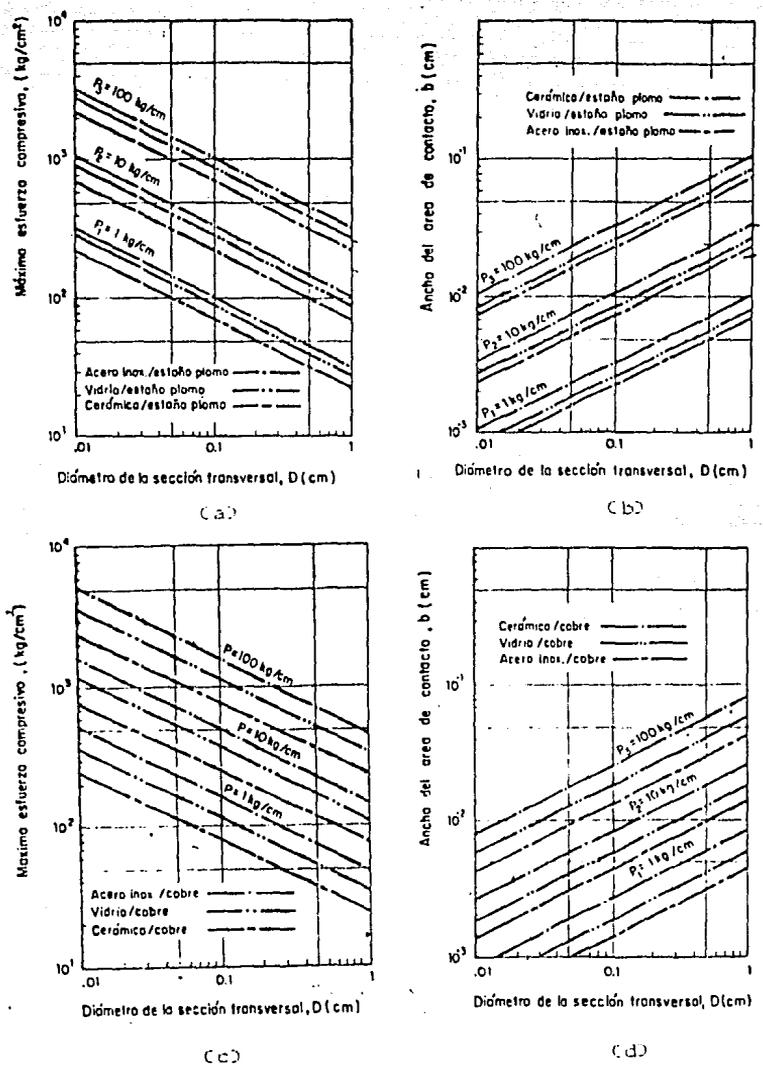


Fig. 1.6 Máximo esfuerzo compresivo y ancho de área de contacto, para el caso de un cilindro de cobre ó estaño-plomo comprimido contra una placa plana de vidrio Pyrex ó cerámica supercompacta

2. FUNDAMENTOS Y TÉCNICAS DE ALTO VACÍO.

2.1) Características de los metales para cámaras de alto vacío.

a) Permeabilidad en metales.

Los materiales menos densos son capaces de contener cantidades más grandes de sustancias ajenas (impurezas) sin sufrir tensiones en su estructura interna; mientras que, en los materiales de mayor densidad sucede lo contrario. Por ésta razón, se tienen más impurezas en plásticos y elastómeros que en metales, vidrios y cerámicas supercompactas.

El proceso de permeabilidad es aquel en el cual los gases pasan continuamente a través de las paredes de los materiales; este proceso involucra primero la absorción del gas en la superficie donde la presión es mayor; después que ha sido absorbido, el gas penetra en el material debido a la diferencia de presiones, difundiéndose hacia la superficie de menor presión. El paso de los gases que atraviesan el material depende de su estructura interna, de la temperatura y del tipo de gas involucrado.

Experimentalmente se ha obtenido lo siguiente:

- Los gases raros no se difunden en ningún metal a ninguna temperatura.
- El hidrógeno no forma soluciones con: aluminio, cromo, cobalto, cobre, fierro, molibdeno, níquel, plata, platino y tungsteno.
- El nitrógeno es insoluble en aluminio, fierro, molibdeno y tungsteno.
- El oxígeno es soluble en cobalto, cobre y especialmente en plata. ver tabla 2.1.

TABLA 2-1

Intervalos de utilidad de algunos materiales empleados
 en cámaras de vacío (unidades en Torr)
 (Ref. 12)

Material	760-1	$1-10^{-3}$	$10^{-2}-10^{-5}$	$10^{-5}-10^{-7}$	$10^{-7}-10^{-10}$
Fierro y Aceros	bueno	bueno	bueno	previa desgasificación	solo acero inoxidable
Fierro, Cobre y Aluminio puro	bueno	bueno	malo	malo	malo
Aleaciones de Cobre	bueno	bueno	bueno	previa desgasificación	solo cobre OFHC
Aleaciones de Niquel	bueno	bueno	bueno	bueno	bueno
Aluminio	bueno	bueno	previa desgasificación	previa desgasificación	no es recomendable
Cuarzo y vidrio	bueno	bueno	bueno	bueno	Solo paredes gruesas
Cerámicas	buenas	buenas	solo con revestimiento de vidrio	solo con revestimiento de vidrio	solo tipos especiales
Mica	buenas	buenas	fuerte desgasificación	fuerte desgasificación	no es recomendable
Hules	bueno	bueno	solo desgasificada	mala	mala
Plásticos	bueno	tipos especiales	solo tipos especiales	solo teflón araldite	no es recomendable

D) Presión de vapor y desgasificación en metales.

Al elevar la temperatura de un metal (sólido ó líquido), mayor es la probabilidad de que átomos ó moléculas superficiales se liberen de éste; a tal fenómeno se le da el nombre de vaporización, y a la proporción en la que un material se vaporiza se le conoce comunmente como presión de vapor.

Los materiales con bajo punto de ebullición, tales como agua, algunas grasas, y aceites tienden a originar problemas en sistemas de alto vacío por su alto grado de vaporización; materiales como madera, lana, algodón, papel, cuero, asbesto y la mayoría de plásticos y hules vaporizan a temperatura ambiente cuando se someten a alto vacío, dando por resultado una pérdida de vacío en el sistema. Por lo tanto, para la elección de materiales para la construcción de sistemas para alto vacío se deben usar materiales con poca vaporización, como metales, vidrio Pyrex y cerámicas supercompactas.

Dado que los metales tienden a volatilizarse aun a temperaturas por debajo del punto de fusión, es necesario elegir aquellos que su presión de vapor sea la más baja para el intervalo de temperaturas de operación del sistema de vacío. Para temperaturas entre 200 y 600 grados centígrados, los metales con menor presión de vapor son: cobre, cromo, hierro, plomo, magnesio, litio, oro, plata, boro, cobalto y aluminio.

Otro aspecto importante a considerar en todos los materiales sólidos es la presencia de imperfecciones en su estructura interna, dando origen a la presencia de espacios que son ocupados por gases difundidos en él; de esta manera se presentan en el material zonas que funcionan como fuentes liberadoras de gases en cámaras de alto vacío, dando la impresión de la existencia de fugas a causa de grietas ó mala instalación de los empaques que sellan las uniones entre las partes que forman la cámara de vacío (fugas virtuales). Al proceso de evacuación de las porosidades del material se le conoce como desgasificación; para que la desgasificación sea mínima es necesario el empleo de materiales poco porosos como son: los metales, el vidrio y cerámicas supercompactas. Influye también en un buen proceso de desgasificación el grado de limpieza de las superficies internas en la cámara de vacío.

c) Sellos metálicos.

Los sellos de junta se definen por la *Sociedad Americana de Vacío* como sellos efectuados por compresión de una junta entre las partes a ser selladas.

Dos bridas con un buen acabado superficial pueden mantenerse en contacto haciendo una buena unión mecánica, pero siempre van a existir irregularidades en la unión, originando la formación de pequeños canales entre las dos superficies; aun si estos canales son del orden de micras, ellos constituyen una considerable fuente de filtración, la cual no puede ser permitida en sistemas de alto vacío. Para cerrar estos canales por simple presión de dos bridas, se requieren muy altos esfuerzos de compresión, dado que estas superficies son muy duras. Para remediar esta situación, la acción de sellado es efectuada por la interposición entre las dos bridas de un tercer material, el cual llena las pequeñas irregularidades de las superficies, requiriéndose fuerzas de compresión sobre las bridas que son razonablemente menores a las utilizadas en la unión sin junta (ver figura 2.1) (Ref 12).

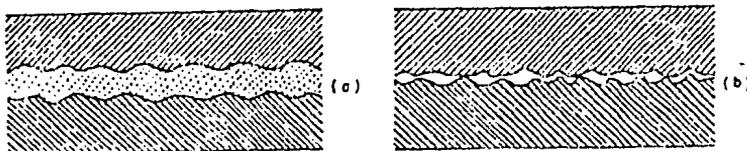


Fig. 2.1 UNIÓN DE BRIDAS (REF. 12)

La presión necesaria sobre la junta para asegurar un buen sellado depende de:

- El material de la junta.
- El acabado superficial de las bridas.
- La deformación existente entre la junta y las bridas.

Para que exista un buen sellado, es necesario que los sellos se comporten de la siguiente forma:

- Al principio, la deformación del sello es elástica; conforme se incrementa la fuerza de compresión sobre el sello se inicia la plastificación.
- La plastificación comienza en los bordes del sello que están en contacto con las bridas, extendiéndose esta hacia el interior del material sellador conforme aumenta el esfuerzo compresivo.

- Cuando el límite elástico del material sellador es alcanzado, ocurre un endurecimiento del mismo por el aumento de dislocaciones en la estructura interna del material; debido a esto, es necesario minimizar el área de contacto sello-brida con la finalidad de reducir el esfuerzo compresivo aplicado al sello para mantener la plastificación sin llegar al agrietamiento y posible ruptura.
- Debido a que en la plastificación el material sellador es deformado más allá del límite elástico, se puede generar una reducción de la presión en la unión sello-brida debido a la contracción por disminución de temperatura. La compresión por aumento de temperatura da origen a un aumento en la superficie de contacto sello-brida, por lo tanto, debe existir un mecanismo que mantenga constante la compresión sobre el sello.
- Una vez montados los sellos y sometidos a compresión, se deforman permanentemente, por tal motivo no pueden ser utilizados nuevamente.

Los sellos de goma natural son materiales limpios, pero tienen alta permeabilidad, bajo intervalo de temperaturas de operación y son inestables químicamente (especialmente al ser expuestos a la luz). Los elaborados con neopreno son menos permeables, pero su intervalo de operación de temperatura y su grado de evolución a los gases no les permite funcionar a más de 149°C y menos de -54°C. Los fabricados a base de silicón tienen un mayor intervalo de temperatura de operación (entre -62°C y 232°C) pero su permeabilidad es alta. Todos estos materiales no son recomendables para ser utilizados a presiones menores que 10^{-4} Torr por su alta presión de vapor a temperatura ambiente en sistemas de sellado permanente (aún con bombeo continuo). El vitón es un hule especial que trabaja a presiones del orden de 10^{-6} Torr, sin embargo se recomienda no utilizarlos cuando las temperaturas son mayores de 204°C. Estos inconvenientes no se presentan en sellos metálicos (Ref. 15).

Un sellador ideal sería un material hecho de un núcleo de alta resistencia mecánica cubierto de capas de materiales de alta ductibilidad y baja dureza, pues el núcleo duro le da rigidez al sello y el blando se deforma para producir el sellado como se muestra en la figura 2.2.

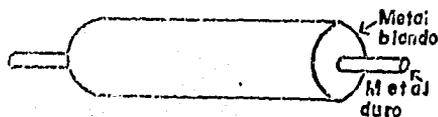


Fig. 2.2 SELLADOR IDEAL (REF. 12)

2.2) Descripción del sistema de vacío empleado.

Un sistema de vacío es aquel en el cual la presión es mantenida a un valor inferior a la presión atmosférica.

El sistema de vacío utilizado consta de :

- Un recipiente (cámara de vacío) lo suficientemente rígido en el intervalo de presiones a ser empleado (10^{-4} a 10^{-7} Torr).
- Un sistema de vacío burdo (bomba mecánica), el cual reducirá la presión dentro de la cámara desde la presión atmosférica hasta un nivel donde un sistema de bombeo fino (bomba de difusión u otras) puede ser usado.
- Medidores para vacío que indiquen la presión en la cámara.

a) Velocidad de bombeo y conductancia.

Partiendo de la ecuación general de los gases, se define el gasto como la cantidad de gas que pasa a través de una abertura por unidad de tiempo a temperatura constante.

La velocidad de bombeo de un sistema para vacío se define como la razón del gasto entre la presión.

$$S = Q/P \quad (2.1)$$

donde S es la velocidad de bombeo; Q es el gasto y P la presión.

Dado que el gasto tiene unidades de presión por volumen entre unidad de tiempo, la velocidad de bombeo tiene unidades de volumen entre unidad de tiempo.

Es posible comparar un sistema de vacío con un circuito eléctrico si se supone que la cantidad de gas que entra a una tubería es el mismo que sale de ella. Esta analogía nos conduce a la siguiente relación:

$$\Delta P = QW \quad (2.2)$$

donde ΔP es la diferencia de presión en los extremos de un tubo; Q la cantidad de gas que fluye y W es la resistencia al flujo.

La resistencia al flujo W se obtiene de la siguiente relación:

$$U = 1/W = 6.5 D^3/L \quad (2.3)$$

siendo U la conductancia del tubo ($\text{cm}^2 \text{Torr lit/Kg seg}$); D el diámetro interior en cm^3 y L su longitud en cm.

Debido a la naturaleza de los materiales y al diseño del sistema de vacío, el sistema de bombeo extraerá gases y/o vapores solo hasta una presión límite. La presión en una cámara después de un tiempo dado es:

$$P_f = P_{lim} + (P_i - P_{lim}) e^{-Cs/V\bar{s}t} \quad (2.4)$$

donde P_f es la presión final; P_{lim} es la presión mínima obtenible por el sistema de vacío; P_i es la presión inicial; \bar{s} es la velocidad de bombeo promedio; V es el volumen a ser evacuado y t es el tiempo de evacuación (esta relación no considera el gas ocluido en las paredes del recipiente).

El tiempo de bombeo se obtiene de la relación:

$$t = (V/\bar{s}) \ln (P_i/P_f) \quad (2.5)$$

donde V es el volumen; \bar{s} la velocidad de bombeo promedio; P_f y P_i son las presiones final e inicial, respectivamente.

B) Bomba mecánica.

En esta bomba, la porción del volumen de aire extraído del sistema en evacuación pasa a través de un tubo de entrada, el cual conduce al interior de una camisa cilíndrica. Aquí se encuentra girando un rotor excéntrico de tal modo que siempre se ajusta en forma compacta en la parte superior del interior de la camisa, ver figura 2.3. Sobre el rotor están colocadas dos paletas planas separadas por un muelle que las comprime contra la superficie de la camisa, estas paletas atrapan las moléculas de aire, y mediante el movimiento sucesivo del rotor, son comprimidas y expulsadas al exterior a través de la válvula de descarga en el tubo de salida (Ref. 16).

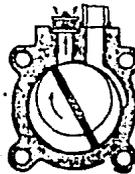


Fig. 2.3 Esquema de funcionamiento.

Se utilizó una bomba mecánica marca Sargent-Welch modelo 1397 con las siguientes características de operación:

- Velocidad de bombeo a una atmósfera 500 litros/min.
- Presión mínima obtenible 1×10^{-2} Torr
- Potencia del motor 1 HP
- Rapidez del motor 1725 rpm
- Rapidez de giro de bombeo 400 rpm
- Tipo de aceite Duo Seal Welch
- Capacidad de aceite 1.18 litros

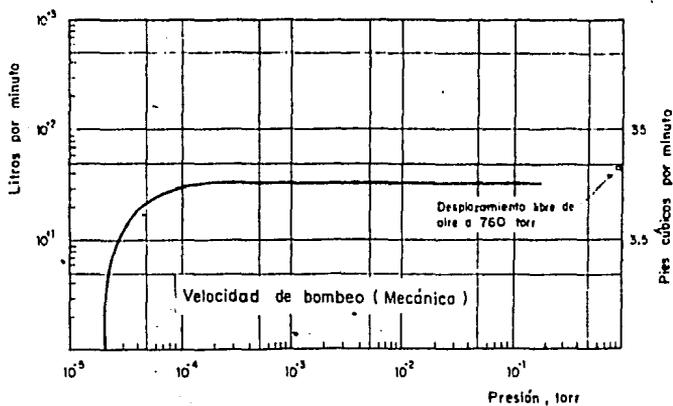
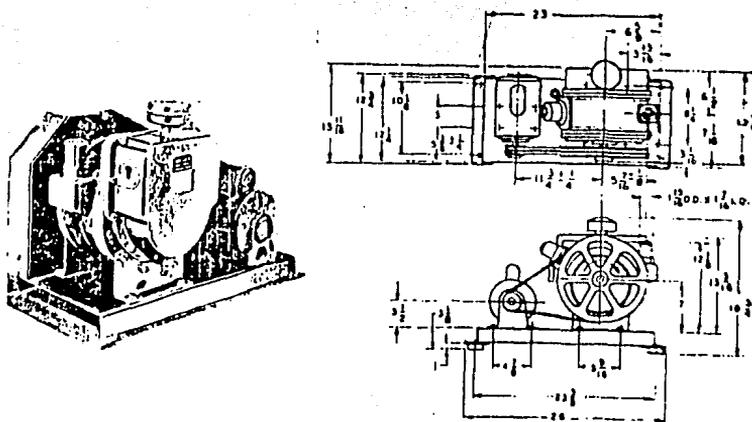


Fig. 3.4 Bomba mecánica Welch modelo 1397 500 lt/min. (Cálculaciones en pulgadas) (Ref. 13)

c) Bomba de difusión

Su funcionamiento se basa en que las moléculas del gas que se evacúan son arrastradas por un chorro de vapor de aceite.

Después de que la bomba mecánica ha creado el vacío necesario en la bomba difusora y en el volumen en evacuación, se conecta la resistencia que calienta el aceite hasta su punto de operación. Los vapores del aceite fluyen por el conducto central, expulsándose a gran velocidad por las toberas hacia la pared refrigerada por un serpentín que conduce agua. Al condensarse estos vapores, escurren hacia el fondo de la vasija, arrastrando las moléculas del gas que se está evacuando (la función principal del chorro de vapor se reduce a entregar parte de su impulso a las moléculas del gas que se evacua, para dirigir las hacia el tubo de escape). El calentador y el refrigerador de la bomba, están dispuestos de tal forma que aseguran la circulación continua de vapor (Ref. 16).

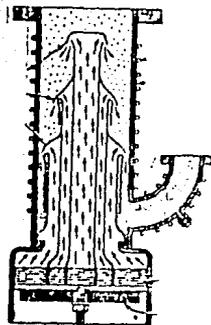


Fig 2.5 Esquema de funcionamiento

Las características de la bomba de difusión marca Varian modelo VHS-6 son las siguientes:

- Velocidad de bombeo	2400 litros/seg
- Presión mínima obtenible	1×10^{-7} Torr
- Presión máxima de salida (para inicio de operación)	1×10^{-3} Torr
- Tiempo de calentamiento del aceite	10 min
- Tiempo de enfriamiento del aceite	60 min
- Flujo de agua (para enfriamiento)	1 lt./min
- Volumen de la bomba	500 cc

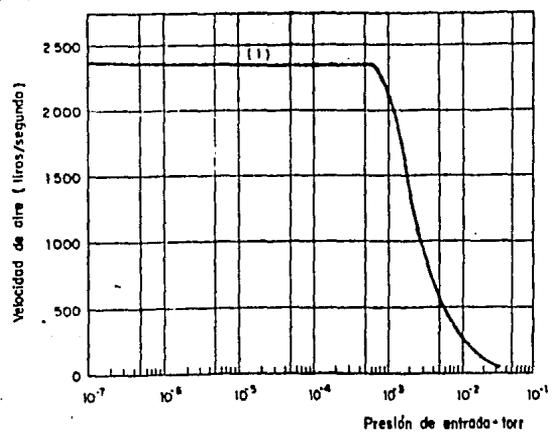
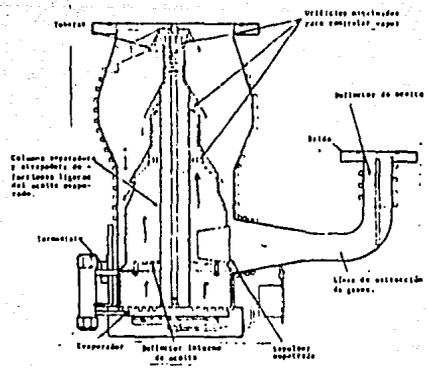


Fig. 2.6 Bomba de difusión Varian modelo VHS-6 2400 lt/seg
Vista esquemática del interior y gráfica de velocidad de bombeo (Ref. 14)

d) Medidores de vacío.

Un elemento importante en todo sistema de vacío, es el empleo de medidores que indiquen la presión existente en el interior de la cámara.

Dado que el intervalo de vacío que se desea medir es de 760 a 1×10^{-6} Torr, se utilizan los siguientes medidores:

a) De termopar.

Los medidores de termopar miden la presión en términos de la cantidad de calor que el gas conducirá desde un filamento caliente (ver figura 2.7). Con una potencia de calentamiento fija, la temperatura de la unión del termopar, la cual depende de la conductividad del gas, está indicada por su voltaje de salida. Cuando la presión disminuye, el termopar se calienta, aumentando su voltaje de salida; este voltaje se registra en un milivoltímetro calibrado en unidades de presión (Ref. 17).

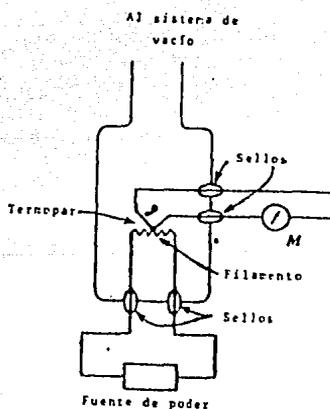


figura 2.7 Funcionamiento del medidor de termopar.

Para vacíos desde 760 a 1×10^{-3} Torr se utilizó un medidor de termopar marca Pennwalt modelo MB 3M y un controlador Pennwalt (figura 2.8).

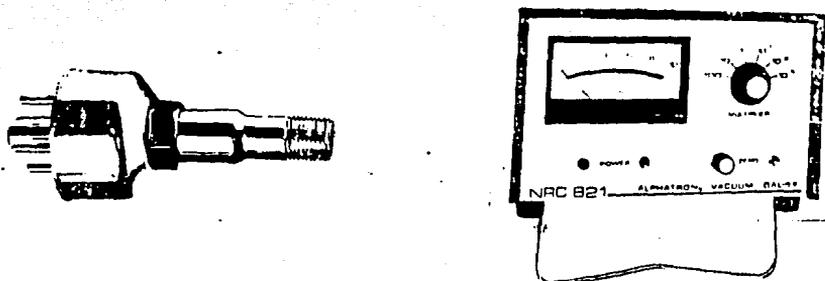


Fig. 2.8 Medidor de termopar y su controlador (Ref. 18).

(B) De ionización.

Su principio de operación se basa en la ionización de los átomos o moléculas del gas, que se encuentran entre el filamento y el colector del medidor (ver figura 2.9).

En este medidor aparecen tres electrodos (filamento, rejilla y colector) colocados en un tubo que se conecta al sistema de vacío. El filamento emite electrones al ser calentado por medio de una corriente eléctrica; como la rejilla está a potencial positivo con respecto al filamento, atraerá a los electrones. Cuando los electrones se aceleran adquieren suficiente energía para ionizar las moléculas del gas en el tubo, produciéndose una corriente de iones que es proporcional a la densidad del gas cuando la corriente de electrones es constante, por lo tanto, esta corriente de iones es proporcional a la presión a temperatura constante. Los iones formados son atrapados por el elemento colector, registrándose la corriente en un electrómetro (Ref. 19).

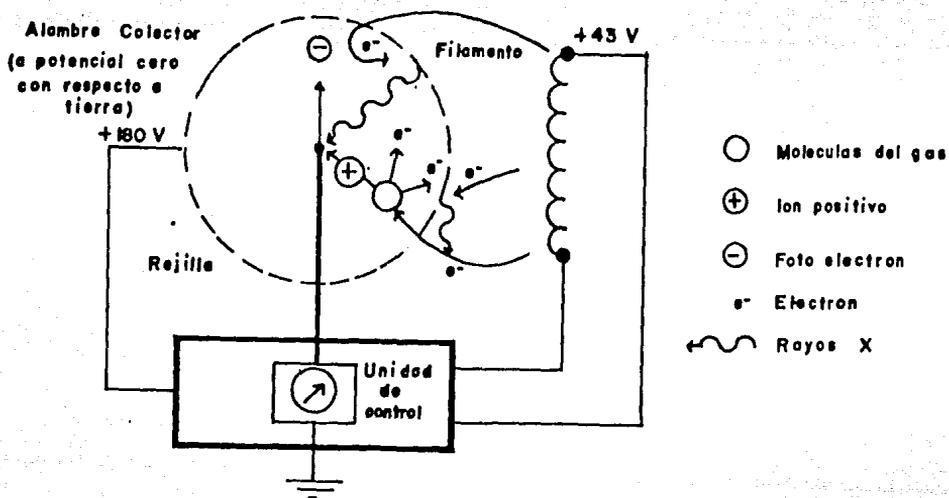


Fig. 2.9 Funcionamiento del medidor por ionización

Para vacíos comprendidos entre 1×10^{-4} y 1×10^{-7} Torr se utiliza un medidor por ionización y un controlador marca Cranville-Phillips (figura 2.10).

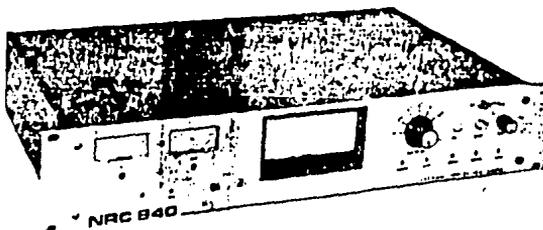


Fig. 2.10 Medidor por ionización y su controlador (Ref. 19)

2.33 Funcionamiento del sistema.

- Se efectúa un prevacío utilizando la bomba mecánica hasta llegar a una presión de 6×10^{-3} Torr.
- Se coloca el aire líquido en el depósito de la trampa de frío de la bomba de difusión.
- Se prueba que no existan fugas en el sistema, cerrando la válvula que conecta a la cámara de pruebas con el sistema de bombeo.
- Una vez comprobado que no hay fugas intermedias, se pone en funcionamiento la bomba de difusión, conectando la resistencia calefactora del aceite (Dow-Corning 704) y el sistema de enfriamiento por agua.
- Después de 60 minutos se pone en funcionamiento el medidor por ionización, estando en condiciones de registrar fugas pequeñas.
- Corregidas las fugas pequeñas, se procede a caracterizar el sistema con sellos de vitón y teflón.

2.40 Detección de fugas.

Las fugas grandes son las que pueden identificarse con el oído y el tacto. Para presiones en intervalos de operación de los medidores de termopar, el efecto de solventes tales como el alcohol o la acetona causarán un cambio en la lectura de estos debido a su alta volatilidad. Los solventes succionados son condensados, originando que la presión baje; en fugas grandes, la presión subirá. El uso de compuestos para sellar tipo plastilina *Cynpac 4, Duocel, High Vacuum Putty, etc* se pueden utilizar para sellar las fugas conforme se van encontrando (Ref. 20).

2.50 Cuidados en su funcionamiento y normas de seguridad.

- No prender la resistencia calefactora de la bomba de difusión sin haber conectado el sistema de enfriamiento por agua, revisando que esta circule continuamente mientras el aceite se encuentre caliente. En caso de interrupción en el flujo de agua, debe desconectarse inmediatamente la resistencia calefactora para evitar que el aceite se degrade.
- No prender el medidor por ionización si no se está seguro de tener una presión del orden de 1×10^{-3} Torr o menores.
- Revisar que no falte aire líquido en el depósito de la trampa de frío.
- No desconectar la bomba mecánica hasta estar seguros de que el aceite de la bomba de difusión se encuentra a temperatura ambiente, para evitar que los vapores de ésta contaminen el sistema evacuado.
- Asegurarse que la presión en la bomba difusora no sea mayor de 1×10^{-3} Torr, evitando con esto la oxidación y degradación del aceite.

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA DE ALTO VACÍO PARA PROBAR SELLOS METÁLICOS.

3.10 Partes que la constituyen.

En la figura 3.1 se muestra una cámara para vacío construida con tubos y bridas de acero inoxidable tipo 304 por ser este un material con buenas características para la obtención de alto vacío, algunas de estas características son: su alta resistencia mecánica a la deformación, la no oxidación en sus superficies y su bajo grado de permeabilidad a los gases. El tubo de cerámica se colocó entre las bridas para estudiar el comportamiento de sellos metálicos comprimidos entre acero inoxidable y cerámica supercompacta.

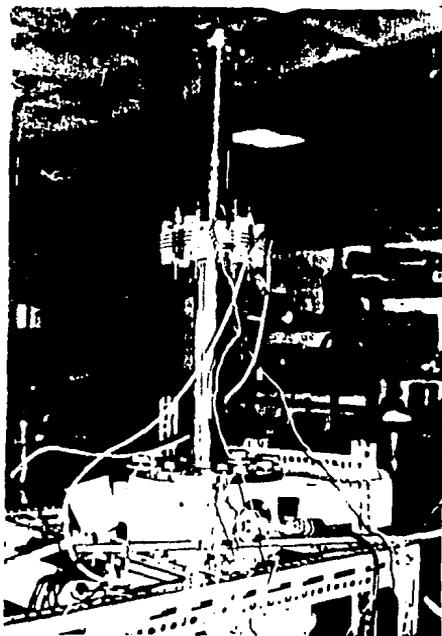


Fig. 3.1 Sistema de vacío de acero inoxidable y cerámica para probar sellos metálicos

En la figura 3.2 se muestra una cámara para vacío que consta de un tubo de vidrio Pyrex entre dos bridas de acero inoxidable; la conexión de ésta con los medidores es por medio de tubos de latón, encontrándose una válvula de paso Hooke entre la cámara de pruebas y el sistema de bombeo con el propósito de aislarlos uno del otro. Esta cámara se utilizó con la finalidad de reducir al mínimo las pérdidas de vacío producidas por la desgasificación de los sellos no metálicos. En este sistema, el único sello no metálico es el que se encuentra entre las bridas que conectan al medidor de ionización con la cámara de pruebas.

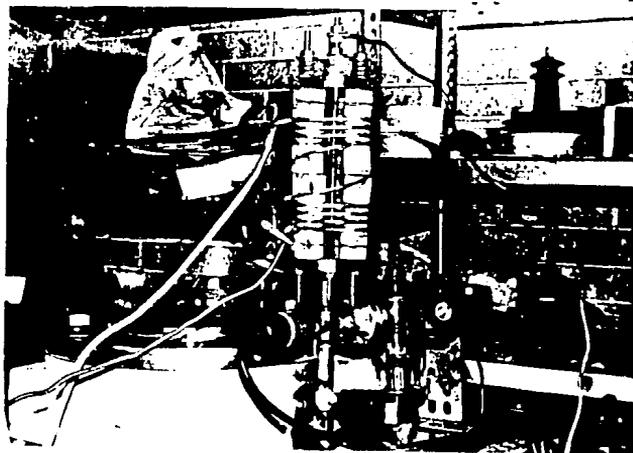


Fig. 3.2 Sistema de vacío de acero inoxidable y vidrio Pyrex para pruebas en sellos metálicos

Debe ponerse especial atención en que las superficies de las bridas que están en contacto con los sellos no deben tener rugosidades; sus superficies deben ser lo más planas posibles, pues de no hacerlo así la compresión sobre los sellos no sería uniforme, ocasionando que algunas porciones del sello no efectúen el sellado que se desea. El acabado de las superficies de contacto en las bridas debe tener un pulido a espejo, para que las irregularidades en el área de contacto de estas superficies con los sellos sean lo suficientemente pequeñas para evitar la formación de canales de filtración de gases (estos canales pueden ser del orden de micras), las cuales no permitirían la obtención de altos vacíos.

Quando la cámara de vacío se expone a cambios de temperatura, se produce una diferencia de dilatación entre las partes que la constituyen, teniéndose que los esfuerzos de compresión sobre los sellos no son constantes, dando lugar a pérdidas en el vacío. Con el fin de conservar el vacío cuando existan variaciones de la temperatura, se utilizaron resortes en los tornillos que comprimen las bridas con el fin de absorber los cambios en los esfuerzos de compresión donde se colocaron los sellos a ser probados. En las figuras 3.1 y 3.2 se observa la localización de estos resortes.

3.20 Pruebas preliminares para la caracterización de las cámaras de vacío.

Para la obtención de un vacío óptimo se requiere que el sistema esté limpio, esto se logra eliminando las impurezas que se encuentran en la superficie interna de la cámara tales como grasas, polvo y humedad; la limpieza se efectúa por lavado químico con solventes como la acetona, seguido de una limpieza por medios mecánicos con ultrasonido; por último, se desgasifica la cámara, por medio de bombeo durante un período que depende de la cantidad de gases ocultos, y de los materiales empleados.

Para poder trabajar con los sistemas de vacío, es necesario caracterizarlos con sellos cuyo comportamiento sea conocido, entendiéndose por caracterización a la obtención del vacío, y la pérdida de este, en función del tiempo en una cámara aislada.

a) Máximos vacíos logrados en el sistema de ensayo y pérdida de éstos en el tiempo.

La mínima presión obtenible por el sistema de bombeo es de 1×10^{-7} Torr; en la práctica, solo se logra utilizando una cámara de acero inoxidable que funcione bajo condiciones de extrema limpieza, sin fugas y utilizando sellos metálicos en las uniones.

No requirió de un tiempo de dos días para la desgasificación de cada uno de los sistemas de prueba (cámara con tubo de cerámica y cámara con tubo de vidrio). La caracterización del sistema se efectúa midiendo la presión (en función del tiempo) dentro de la cámara conforme se va evacuando hasta obtener la mínima presión; posteriormente, la cámara de pruebas se aísla del sistema de bombeo por medio de una válvula y se mide como varía el vacío al transcurrir el tiempo.

Se utilizaron sellos de vitón y teflón para la obtención de las curvas de caracterización, por tener estos materiales una presión de vapor de 1×10^{-6} y 1×10^{-5} Torr respectivamente (Ref. 12). Esto contribuyó a que los máximos vacíos obtenidos en cada una de las cámaras fueran del orden de las presiones de vapor antes descritas.

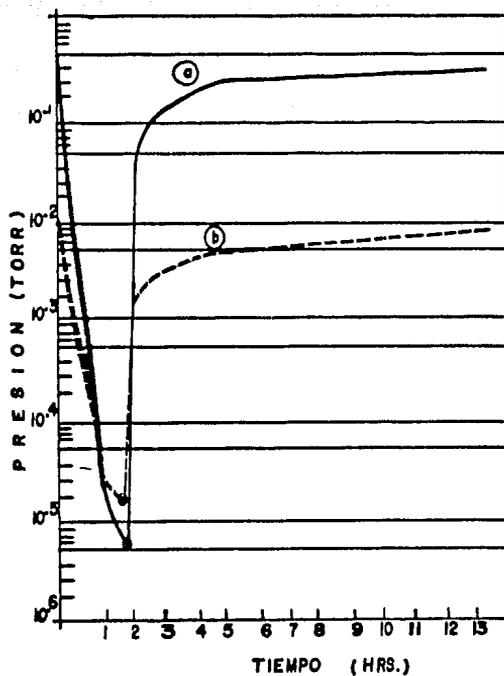


Fig. 3.3 Curvas de ganancia y pérdida de vacío en función del tiempo para probar sellos metálicos. a) Caracterización del sello de vitón. b) Caracterización del sello de teflón.

Con la cámara de acero inoxidable se logró un vacío máximo de 4.8×10^{-6} Torr en cuatro horas, esto se debió en parte a que los sellos era las bridas no son metálicos y a la existencia de fugas en las soldaduras de las partes que forman la cámara, las cuales fueron parcialmente eliminadas con barniz Glyptal. En la cámara de la figura 3.2 (sin vidrio Pyrex) se logró un máximo vacío de 1.8×10^{-7} Torr en dos horas, dado que los conductos por los cuales se extraen los gases de la cámara ofrecen una alta resistencia al evacuado, por ser su conductancia pequeña, originando que la velocidad de bombeo disminuya; además, el material del que están hechos los tubos conectores tienen una gran permeabilidad para vacíos del orden de 1×10^{-5} Torr.

En las cámaras de pruebas se obtuvo una variación considerable en la pérdida del vacío al cerrar la válvula que las aísla del sistema de bombeo (ver figuras 3.3, 3.6, 3.7 y 3.8); esto se debe a que la desgasificación y la presión de vapor de las cámaras es mayor en altos vacíos.

3.5) Construcción y prueba de los anillos de estaño-plomo y cobre para ser usados como sellos para alto vacío.

a) Elaboración de los anillos metálicos.

Los metales usados como materiales para sellos de alto vacío se pueden clasificar en duros y blandos. Se entiende por metales blandos aquellos que tienen un límite elástico inferior al material de las bridas que sellan; el indio, estaño-plomo, aluminio, plata, oro y cobre entre otros son ejemplo de este tipo de metales. Se escogieron el estaño-plomo y el cobre como sellos de prueba por ser metales blandos, económicos y de fácil adquisición en forma de alambre.

Para la elaboración de los anillos de estaño-plomo o de cobre soldados con estaño-plomo, se limpia el alambre con solventes como la acetona, se liman los extremos del alambre y con un caudín de punta delgada se unen los extremos utilizando soldadura de estaño-plomo con fundente; el alambre de cobre no debe estar barnizado. Esta soldadura se efectúa cuidando que no quede gota en la unión.

Como el estaño-plomo se funde a 183°C , no es recomendable utilizarlo para sellos que estén sometidos a temperaturas mayores que ésta. Si se desea trabajar a mayor temperatura, se recomienda usar cobre ya que su punto de fusión es de 1083°C . Para soldar cobre con cobre se usa un soplete de joyero, dirigiendo la flama hacia las puntas del alambre previamente alineadas y puestas en contacto de tal manera que al fundirse no se forme gota.

Los problemas que se presentan al utilizar como sellos de vacío alambres soldados son: posibles fugas en la unión, mala resistencia mecánica, fugas virtuales por degasificación y mal flujo capilar de la soldadura hacia las hendiduras.

b) Medición de las fuerzas aplicadas sobre las bridas de la zona de pruebas.

Al comprimir y calentar un sello metálico entre dos bridas, este se deforma permanentemente aumentando el Área de contacto sello-brida. Debido a esto, se tiene una disminución en la presión ejercida sobre la unión sello-brida, ya que las bridas no mantienen constante el esfuerzo de compresión sobre el sello, pudiendo llegar su deformación a un valor que no sea suficiente para mantener rígida esta unión, originando vías de filtración y pérdida de vacío. Se puede evitar esta pérdida de vacío colocando en las bridas, que comprimen al sello, un dispositivo que mantenga constante los esfuerzos de compresión y evite la pérdida de rigidez en la unión para compensar el cambio de forma del sello por cambios de temperatura. Este dispositivo consiste en la colocación de resortes en los tornillos que comprimen las bridas contra los sellos, de tal manera que estos resortes mantienen sobre el sello el esfuerzo compresivo necesario para que el material del sello pase del estado elástico al estado elasto-plástico. Para poder utilizar estos resortes es necesario determinar como varía su longitud al aplicar una carga que los comprima (calibración); la gráfica mostrada en la figura 3.4 se utiliza para aplicar en cada tornillo la fuerza que se desea transmitir al sello.

La fuerza ejercida en cada resorte es la que resulta de dividir la carga total aplicada al sello entre el número de resortes que comprimen las bridas (un resorte por tornillo); la carga total resulta de multiplicar la carga por unidad de longitud aplicada al sello por la longitud del sello. La carga por unidad de longitud, que se aplica al sello, se obtiene de las rectas de la figura 3.5, en las que, se relaciona el máximo esfuerzo de compresión correspondiente al límite elástico del material (según el tipo de unión) con dicha carga.

Para las pruebas realizadas con el sistema de resortes mostrado en las figuras 3.1 y 3.2, se tiene que, la mínima carga que se puede variar y medir es de 4 Kg; si se toma un factor de variación de 1 Kg, se tiene que la aproximación de la carga que se puede aplicar y medir en cada resorte es de ± 5 Kg.

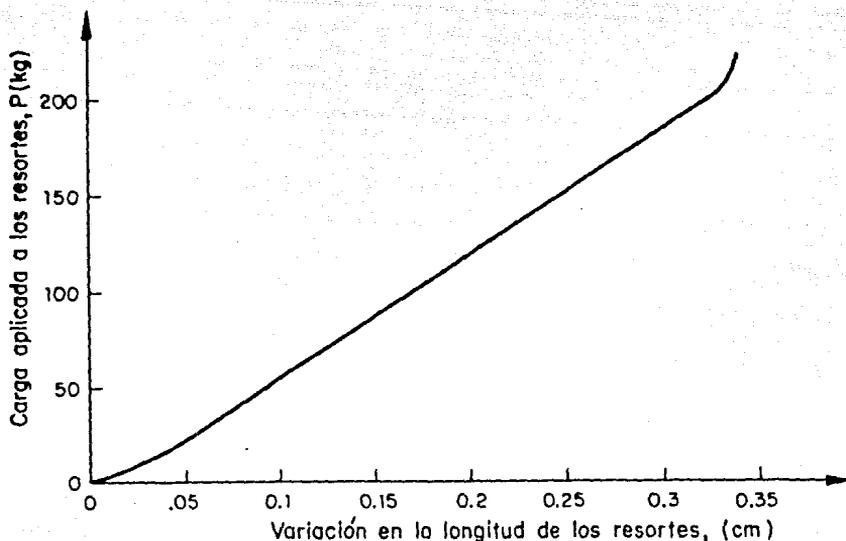


Fig. 3.4 Calibración de los resortes utilizados para la compresión de los sellos de prueba

Se debe aplicar la fuerza sobre las bridas cuidando que la compresión sea uniforme en todas las partes del sello para evitar la fractura de la cerámica o el vidrio, además de asegurar el sellado al mismo tiempo a lo largo de todo el sello. Para esto se recomienda aplicar la fuerza sobre los tornillos en forma cruzada (apretando cualquier tornillo y a continuación el tornillo diametralmente opuesto). La rigidez de las bridas en los lugares intermedios entre los puntos de aplicación de las fuerzas (zonas donde no están actuando directamente los tornillos, con sus resortes, sobre las bridas), debe tomarse en cuenta para que el esfuerzo compresivo en estos lugares sea el suficiente para deformar el sello.

c) Pruebas con los sellos construidos.

De las gráficas de $\max \sigma_c$ vs D de la figura 1.6 y considerando que el límite elástico del alambre de estaño-plomo está entre los 300 Kg/cm^2 y 550 Kg/cm^2 (Ref. 21), se tiene que el diámetro de la sección transversal necesaria para que ocurra la plastificación del anillo se encuentra entre los 0.03 cm y 0.40 cm para una carga por unidad de longitud del anillo entre 10 Kg/cm y 100 Kg/cm respectivamente.

Realizando pruebas con anillos de estaño-plomo, cuyo diámetro de sección se encuentra entre los límites antes descritos, se observó que éstos sí funcionan como sellos para vacío en el intervalo de presiones a los que se desea llegar. Con base en lo anterior se decidió utilizar anillos con sección transversal de 0.15 cm, aplicándoles una carga por unidad de longitud que se encuentra entre 15 Kg/cm y 50 Kg/cm, dependiendo del material del que están hechas las bridas que lo comprimen (ver figura 3.5).

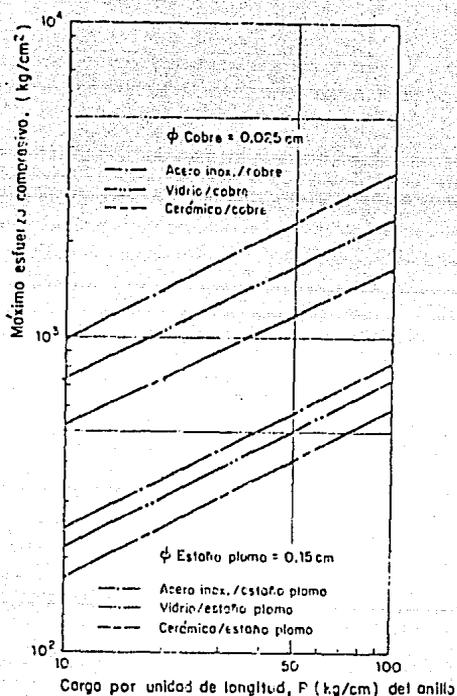


Fig. 3.5 Máximo esfuerzo compresivo en función de la carga por unidad de longitud para alambres de cobre o estaño-plomo

De las pruebas realizadas con estos anillos, se tiene que si se llaman al aplicarse las cargas mostradas en la tabla 3.1, encontrándose en las gráficas de la figura 3.5 que los máximos esfuerzos compresivos correspondientes a estos valores de P son los mostrados en esta tabla. Al finalizar las pruebas, se midió el ancho de la superficie de contacto de los anillos ya deformados, obteniéndose los $\max S_c$ experimentales mostrados en la tabla. La variación entre el valor de máximo esfuerzo compresivo obtenido teóricamente y el obtenido en forma experimental se puede deber a que el alambre de estaño-plomo empleado no fue una barra sólida, siendo en realidad un tubo con núcleo de fundente.

Los resultados de las pruebas de vacío realizadas con estos anillos se encuentran en las curvas "a" de las gráficas en las figuras 3.6, 3.7 y 3.8.

De las gráficas de $\max S_c$ vs D de la figura 1.6, y considerando que el límite elástico del alambre de cobre está entre los 1800 Kg/cm^2 y los 3400 Kg/cm^2 (Ref. 22), se tiene que el diámetro de la sección transversal para que ocurra la plastificación del anillo puede tener un valor entre 0.03 cm y 0.09 cm para una carga por unidad de longitud de 100 Kg/cm .

De las pruebas realizadas con anillos de cobre, se decidió trabajar con anillos de un diámetro de sección transversal de 0.025 cm, pues el sellado se efectuó sin deformar las bridas, sellando cuando la carga por unidad de longitud fue de 36.6 Kg/cm , correspondiendo a un esfuerzo compresivo de 2000 Kg/cm^2 de acuerdo a la gráfica de $\max S_c$ vs P. Al emplear anillos con un diámetro de sección inferior a 0.025 cm, se presentan dificultades en el sellado por imperfecciones en el acabado de las bridas (deben ser planas y bien pulidas) y por el proceso de construcción de los anillos (alineación de las puntas al ser unidas con soldadura y ondulaciones en el anillo formado). Los resultados de las pruebas de vacío realizadas con estos anillos se encuentran en las curvas "b" de las gráficas 3.6, 3.7 y 3.8.

Al finalizar las pruebas, se midieron los anchos de las superficies de contacto de los sellos de cobre utilizados, con un microscopio de contraste GÄERTNER de 30 aumentos, obteniéndose los máximos esfuerzos experimentales mostrados en la tabla 3.1.

La variación entre el $\max S_c$ obtenido teóricamente y el que resulta del experimento se debe a:

- Las características reales del alambre empleado en el sello como son: su composición química (pureza) y el proceso empleado en su fabricación.
- Imperfecciones en la superficie del alambre y doblado de este.
- La forma del anillo cambia en la zona de unión por soldadura, debido a la alineación de los extremos que son soldados al formar el anillo.
- El pandeo causado a las bridas que comprimen el sello en la zona donde se encuentran los tornillos que aplican la compresión sobre las bridas.

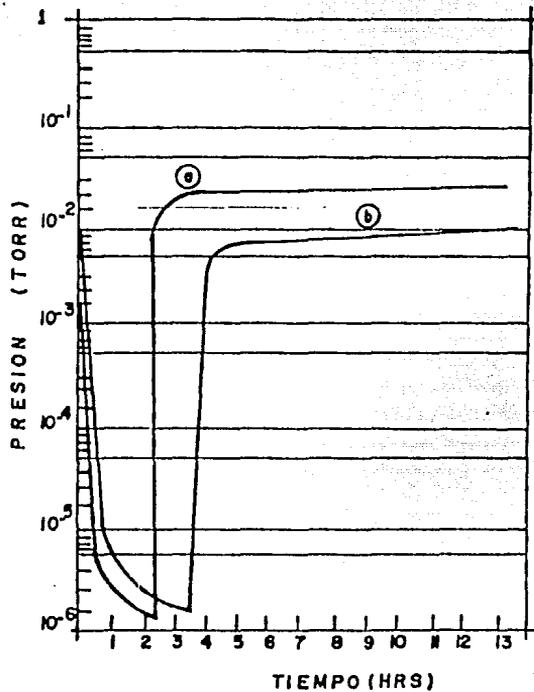


Fig. 3.6 Curvas de ganancia y pérdida de vacío en función del tiempo para: a) Sello de estaño-plomo interpuesto entre bridas de acero inoxidable. b) Sello de cobre interpuesto entre bridas de acero inoxidable.

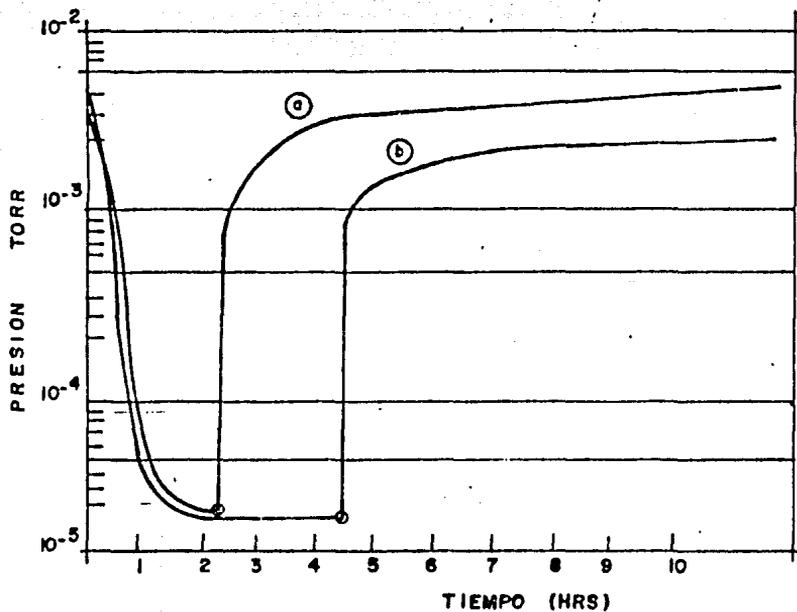


Fig. 3.7. Curvas de ganancia y pérdida de vacío en función del tiempo para: a) Sello de estaño-plomo interpuesto entre vidrio Pyrex y acero inoxidable b) Sello de cobre interpuesto entre vidrio Pyrex y acero inoxidable.

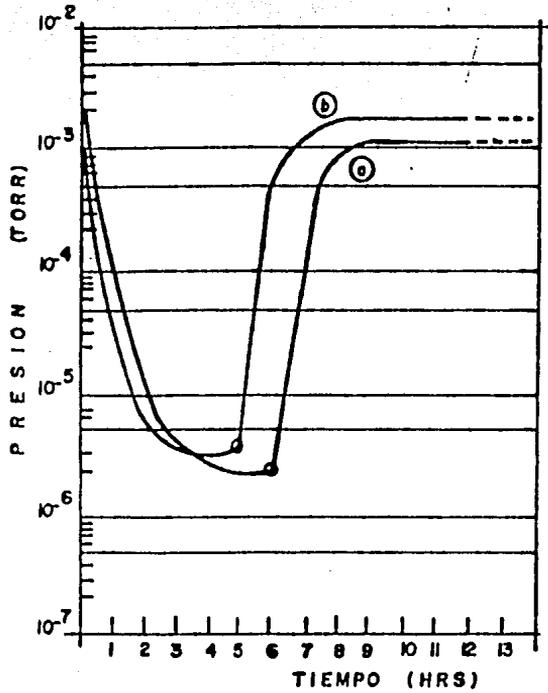


Fig. 3.8 Curvas de ganancia y pérdida de vacío en función del tiempo para: a) Sello de estaño-plomo interpuesto entre cerámica y acero inoxidable. b) Sello de cobre interpuesto entre cerámica y acero inoxidable.

Para verificar si los sellos propuestos funcionan para sellar uniones cerámica-metal y vidrio-metal, se debe tener en cuenta que al comprimir un sello metálico entre dos bridas de distinto módulo de elasticidad (acero-cerámica o acero-vidrio), se debe aplicar un esfuerzo compresivo tal que se asegure el sellado con la brida de acero inoxidable (módulo mayor), pues al aplicar la fuerza de compresión sobre el sello, las áreas de las superficies de contacto sello-brida generadas son distintas, siendo mayor el área de contacto en la unión con la brida de módulo menor (cerámica o vidrio). Se busca que el esfuerzo no llegue a ser de tal magnitud que produzca la ruptura del vidrio o la cerámica.

Para realizar pruebas de conservación de vacío, sometiendo los sellos metálicos propuestos a cambios bruscos de temperatura, se elevó la temperatura de las cámaras de prueba por medio de una resistencia de nicromel (figuras 3.1 y 3.2). En todas las pruebas realizadas con sellos de estaño-plomo o de cobre soldado con estaño-plomo se elevó la temperatura hasta los 183°C (en un tiempo de una hora), pues esa es la temperatura de fusión del estaño-plomo, manteniéndose el vacío. Posteriormente se inició el enfriamiento de esta zona al suspender el calentamiento, desconectando la resistencia y poniendo en funcionamiento un ventilador, llegando a la temperatura ambiente en diez minutos sin perder el vacío. Este proceso se efectuó dos veces en cada prueba, teniendo el mismo comportamiento en cada caso.

La última prueba realizada fue en la cámara con tubo de vidrio, con un sello de cobre unido con cobre, en el cual se hizo vacío a temperatura ambiente. Una vez obtenido el máximo vacío, la cámara se aísla del sistema de bombeo cerrando una válvula, midiendo la pérdida de este. Realizada esta prueba, se abre la válvula para tener nuevamente el sistema al máximo vacío para iniciar las pruebas con cambio en la temperatura, observándose que al aumentar uniformemente la temperatura, el vacío no se pierde, logrando llegar, hasta los 270°C en dos horas con buen funcionamiento en los sellos. No se elevó más la temperatura debido a las limitaciones del sistema calefactor, pues el sello se esperaba que soportara los 400°C , temperatura que está por debajo del punto de fusión del cobre. Al llegar a los 270°C se suspendió el calentamiento, enfriando el sistema con un ventilador, hasta la temperatura ambiente en un tiempo de 20 minutos, conservándose el mismo vacío en el sistema.

TABLA 3.1
Resultados obtenidos en las pruebas, y su comparacion con los valores teóricos.

ANILLO SUPERF. ANILLO	LONG. ANILLO (cm)	SECC. TRANSV. (C) (cm)	CARGA (Kg/cm)	ANCHO DE APEA DE CONTACTO (cm)	MAX σ_c	
					(Kg/cm ²) (teo)	(Kg/cm ²) (exp)
Sn-Pb-Cerámica	21	0.15	22.8	0.347	85.7	270
Sn-Pb-Acero	21	0.15	22.8	0.280	81.3	370
Cu-Cerámica	21	0.025	34.2	0.019	1746.0	1000
Cu-Acero	21	0.025	34.2	0.019	1765.0	1900
Sn-Pb-Vidrio	10.5	0.15	41.9	0.328	127.5	450
Sn-Pb-Acero	10.5	0.15	41.9	0.318	131.6	550
Cu-Vidrio	10.5	0.025	64.7	0.027	2333.0	1800
Cu-Acero	10.5	0.025	64.7	0.025	2543.0	2800

4. DISEÑO DE UN TUBO ABSORBEDOR EVACUADO.

En la actualidad, en los tubos concentradores solares evacuados la unión del tubo de vidrio con el tubo metálico se realiza como se muestra en la figura 4.1. Para evitar la rotura del tubo de vidrio por las diferencias de expansión térmica (longitudinal y radial) entre el tubo de vidrio y el de metal empleados en la construcción del tubo concentrador solar evacuado, la unión del tubo de vidrio con el tubo metálico se realiza por medio de un fuelle metálico y un material (kovar) con coeficiente de expansión térmica cuyo valor es intermedio al del vidrio (Pyrex) y al del metal empleado en el fuelle, brida y tubo absorbedor. La unión del fuelle con la brida es por medio de juntas tipo Varion "Conflat" y la unión del fuelle con el tubo de vidrio es por medio del encajamiento del fuelle en el tubo de vidrio, siendo esta unión permanente.

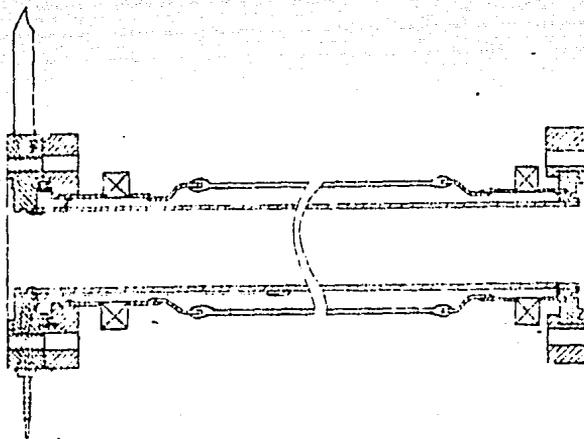


Fig. 4.1 Unión vidrio-metal en los concentradores solares evacuados actualmente en uso.

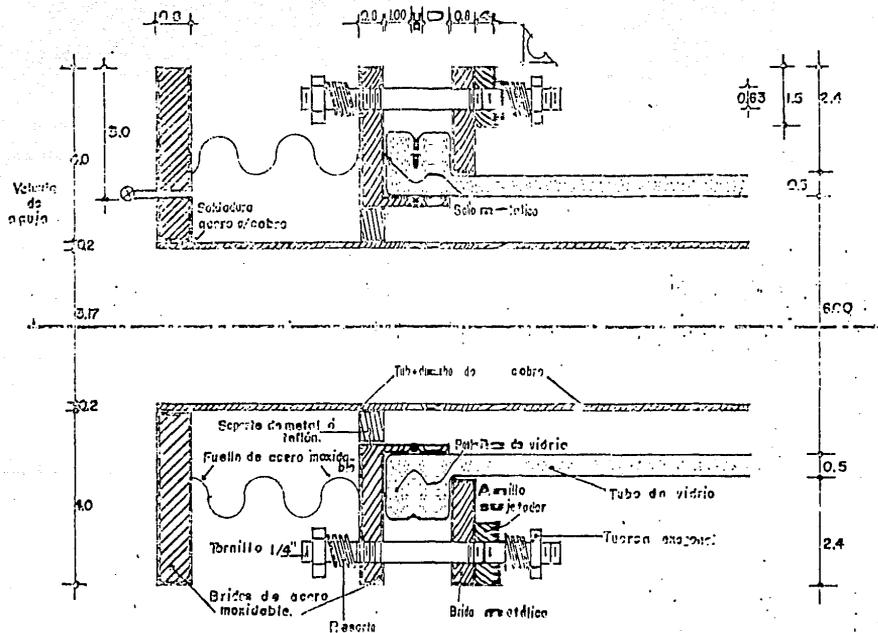


Fig. 4.3 Diseño de un concentrador solar evacuado usando sellos metálicos

Cojas en cm.

El acoplamiento y la alineación de dos concentradores solares evacuados, como los mostrados en la figura anterior, se efectúa como se muestra en la figura 4.2. Los momentos flectores en esta unión son limitados por los fuelles metálicos para evitar la ruptura del vidrio.

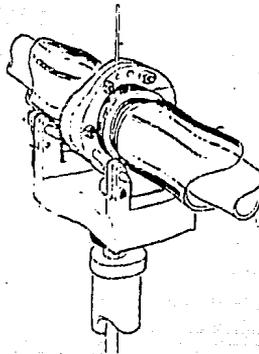


Fig. 4.2 Acoplamiento entre dos tubos concentradores solares.

Para obtener el sellado en uniones del tipo vidrio-metal, en los concentradores evacuados, de manera tal que la diferencia de dilatación o contracción térmica entre estos dos materiales no afecte el sellado, produciendo pérdida en el vacío por la producción de vías de filtración de gases debidas a rupturas del tubo de vidrio o producción de imperfecciones en el sello metálico, se diseñó el sellado de la unión del tubo de vidrio con una brida metálica, mostrado en la figura 4.3. El uso de dos arandelas limita la acción, sobre los extremos de estos tubos de vidrio, de los esfuerzos generados por momentos flexionantes, debidos entre otras causas al doblado (pandeo) por el peso del mismo.

El redondeado de los bordes en las pestañas de los tubos de vidrio se hace con el fin de minimizar la concentración de esfuerzos cortantes. En esta misma figura se muestra el empleo de resortes en los tornillos que actúan sobre las bridas que comprimen a los sellos metálicos. En la figura 4.4 se muestra al detalle las bridas marcadas con una flecha, y en la figura 4.5 la pieza (soporte) que se encuentra entre la brida que comprime al sello metálico y el tubo de metal.

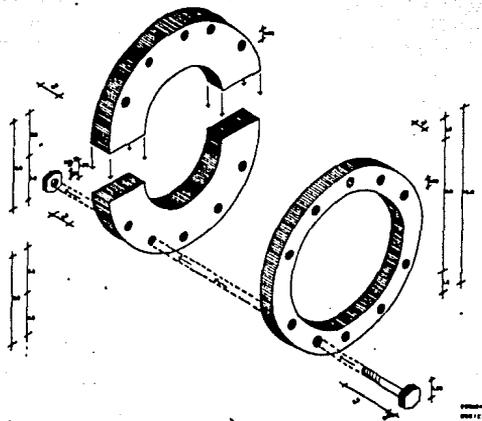


fig. 4.4 Acoplamiento de las bridas señaladas en la figura anterior

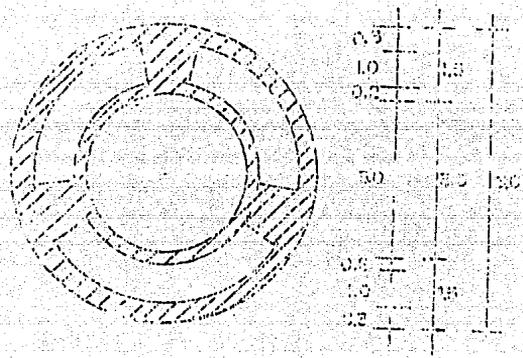


Fig. 4.5 Soporte de metal o teflón entre el tubo metálico y la brida que comprime al sello metálico contra el tubo de vidrio

CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

De las gráficas de ganancia y pérdida de vacío con respecto al tiempo, se observa que el comportamiento de los sellos metálicos probados es mejor en comparación con los sellos de vitón o teflón, con la ventaja de ser útiles a temperaturas mayores a las soportadas por el vitón o el teflón.

La conservación del vacío fue limitada por la existencia de sellos no metálicos en la conexión del medidor por ionización y en las válvulas del sistema de bombeo. Esto se muestra en las curvas de caracterización, las cuales muestran la desgasificación de estos sellos no metálicos de los sistemas de pruebas.

El máximo vacío logrado en la cámara con tubo de cerámica fue de 7.8×10^{-7} Torr, lográndose en esta cámara un muy buen vacío, ya que la máxima presión alcanzada en este sistema, en las condiciones actuales de operación es de 5×10^{-7} Torr.

En la cámara con tubo de vidrio no se llegó a vacíos menores de 1.8×10^{-5} Torr debido a que los tubos que conectan a la cámara y a los medidores de vacío con el sistema de bombeo son de latón, el cual no es buen material para lograr altos vacíos.

Se recomienda utilizar los sellos de estaño-plomo a una temperatura no mayor de 183°C por ser ésta la temperatura de fusión de este material. Con los anillos de cobre se logró un buen sellado a los 270°C , ya que se pudieron formar los sellos al fundir los extremos del alambre (de 0.025 cm), quedando unidos sin uso de soldadura ni de fundente.

Los resortes efectivamente responden a los cambios térmicos, impidiendo que falle el sellado.

Los esfuerzos compresivos en la unión del sello con el acero son mayores a los obtenidos en la unión del sello con la cerámica o el vidrio como se muestra en la tabla 3.1.

Al comparar el esfuerzo compresivo dado por la teoría y el obtenido en las pruebas, se tiene que para los sellos de estaño-plomo, los obtenidos en las pruebas son aproximadamente seis veces menores que los dados por la teoría; una de las causas principales de esta variación se atribuyen a que en el caso de alambre de estaño-plomo se trata de un tubo relleno con fundente y no de una barra sólida.

Para los sellos de cobre, la variación en los valores del esfuerzo compresivo dado por la teoría y los obtenidos en las pruebas, se observan diferencias dentro de un al 75% , pues la caracterización del material empleado para la construcción de estos sellos no fue suficientemente obtenida, debido a la gran diversidad de los tipos de cobre existentes en el mercado.

Para obtener un conocimiento más amplio del comportamiento de los sellos metálicos construidos con alambre, se recomienda utilizar un sistema de pruebas cuyas partes sean de acero inoxidable, utilizando únicamente sellos metálicos ya caracterizados en las uniones con los medidores y con el sistema de bombeo; mejorar la técnica para unir los extremos de los alambres que servirán como sellos; el diseño y construcción de válvulas de aguja capaces de aislar la cámara de pruebas en forma efectiva sin contacto con anillos de hule o algún otro material que emita gases o solventes; además debe diseñarse un sistema de calentamiento de la zona de pruebas que pueda suministrar temperaturas mayores a los 300°C . Todo esto debe realizarse para conocer el comportamiento del sistema con alto vacío en tiempos prolongados. Los tubos concentradores solares, se diseñan de tal manera que no alcancen temperaturas superiores a los 200°C . Un factor de seguridad de 1.5 sería más que amplio para su buen funcionamiento.

REFERENCIAS.

- 1) Contractor Report SAND-7041 "Development of an Evacuated Receiver for Line Focus Solar Thermal Collector"; January 1987.
- 2) Thomas D. Harrison, Gary N. Bond, Arthur C. Ratzel "Design Considerations For a Proposed Passive Vacuum Solar Annual Receiver" Sand 76-0982 April 1979.
- 3) Perchard E. "Resistencia de Materiales". UNAM 1973.
- 4) Carrillo N. "Investigaciones Sobre Estabilidad de Taludes y Fundaciones". UNAM, 1984.
- 5) Taylor, D.W. "Fundamentals of Soil Mechanics". John Wiley and Sons Inc. 1954, 7a. Edición.
- 6) Fellenius, W. "Calculation of the Stability of Earth Dams". Trans. 2nd cong. on Large Dams., Vol. 4, Washington, 1936.
- 7) Fellenius, W. "Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion Adhäsion und unter Annahme kreiszylindrischer Gleitflächen". Rev. ed. Berlin; Ernest, 1939.
- 8) Hertz, H. "Gesammelte Werke". Volumen I. Leipzig., 1896.
- 9) Timoshenko, S. "Theory of Elasticity". Mc. Graw Hill 1934.
- 10) Poark R. J. "Fórmulas de Resistencia de Materiales, Esfuerzos y Deformaciones". , Ed. Aguilar. 1952.
- 11) Dushman. "Vacuum Technique". John Wiley and Sons 1949.
- 12) Roth, A., "Vacuum Sealing Techniques". Pergamon Press, Oxford 1966.
- 13) Sargent-Welch Division "Manual de Bombas de Vácuo Mecánico".
- 14) Varian Vacuum Division, "Manual de Bombas de Vácuo de Difusión".
- 15) Parker Seal de México, "Catálogo de Grosellas PVA-1".
- 16) Andrew Guthrie. "Vacuum Technology", Ed. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- 17) Correa W., Fuentes G. "Proyecto de un Laboratorio de Implantación de Juntas", Tesis Licenciatura, Facultad de Ingeniería. UNAM 1982.

- 18) Varian Vacuum Division-NRC, "Manual de Medidores de Termopar y Controladores", Mass. USA.
- 19) Varian Vacuum Division-NRC, "Manual de Medidores de Ionización", Mass. USA.
- 20) N. G. Wilson, L. C. Beavis, "Handbook of Vacuum Leak Detection", American Vacuum Society.
- 21) "Metals Handbook", 8a. Edición., Pags. 620 y 621.
- 22) Centro Español de Información del Cobre, "El Cobre y sus Aplicaciones en la Tecnología", Madrid, Ed. Helios S. A.
- 23) Glang R, Holmwood R. A. y Kurtz J. A. "High-Vacuum Technology", capítulo 2 del libro Handbook of Thin Film Technology, editado por L. I. Massiel y R. Glang, Mc.Graw Hill 1970.

ESTA TESIS NO PUEDE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Agradecimientos

La realización de este trabajo se llevo a buen término gracias a la colaboración entusiasta y activa de un grupo de personas reunidas no solo por el deseo de efectuar una actividad que contribuya al desarrollo de una tecnología propia en el área de sellado para vacíos, siendo además por el disfrute de un ambiente de trabajo con personas que nos hacen agradable el día a día.

Es un agrado del Departamento de Metalurgia del Centro de Instrumentos, al haber facilitado la utilización de un microscopio de contraste por luz para la medición de la deformación resultante en los anillos.

Es un agrado de E. Calderon y G. Mendona por su colaboración en algunos aspectos relacionados con el experimento.

Al Laboratorio de Geología por permitir la calibración de los relojes con sus instrumentos.

A E. García que asesoró en el maquinado de algunas piezas del equipo utilizado en el experimento.

Al Taller de dibujo del I.I.T. y a Do. Teresa Góizales por su colaboración en la elaboración de los dibujos y grabados.

Al Dr. Wallz y al Dr. M. Aguirre por el generosismo dado en la elaboración del diseño del acoplamiento de bridas en tubos de vidrio.