

30  
24j



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**DETERMINACION DE LA VELOCIDAD  
DE BOMBEO DE UNA BOMBA MECANICA**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**F I S I C O**  
P R E S E N T A :  
**SALUSTIO GONZALEZ ALLENDE**

México, D. F.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

1991



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

<b>INTRODUCCION.</b>	<b>2</b>
<b>CAPITULO 1. FUNDAMENTOS.</b>	
1.1 ECUACION DE ESTADO DEL GAS IDEAL.	5
1.2 ENERGIA CINETICA DE LAS MOLECULAS.	6
1.3 CAMINO LIBRE MEDIO.	7
1.4 VISCOSIDAD.	8
1.5 FLUJO DE GASES.	10
1.6 BOMBAS DE VACIO.	13
<b>CAPITULO 2. VELOCIDAD DE BOMBEO Y CONDUCTANCIAS.</b>	
2.1 VELOCIDAD DE BOMBEO Y FLUJO MASICO.	18
2.2 VELOCIDAD DE EVACUACION.	19
2.3 CONDUCTANCIAS EN UN SISTEMA DE VACIO.	22
2.4 EJEMPLOS DE ALGUNAS GEOMETRIAS.	25
2.5 METODOS DE MEDICION DE LA VELOCIDAD DE BOMBEO.	29
<b>CAPITULO 3. DISEÑO Y CONSTRUCCION.</b>	
3.1 ARREGLO TIPICO.	34
3.2 CAMARA PARA METODO A VOLUMEN CONSTANTE.	38
3.3 MATERIAL EMPLEADO.	39
3.4 SELLOS PARA VACIO.	41
3.5 FUGAS REALES Y VIRTUALES.	44
<b>CAPITULO 4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.</b>	
4.1 DESARROLLO DEL TRABAJO.	47
4.2 CURVAS DE VELOCIDAD DE BOMBEO.	49
4.3 CONCLUSIONES.	53
<b>APENDICE A.</b>	<b>56</b>
<b>APENDICE B.</b>	<b>59</b>
<b>APENDICE C.</b>	<b>62</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.</b>	<b>64</b>

## INTRODUCCION

En el diseño de un sistema de vacío, deben considerarse ciertos parámetros involucrados en los componentes, como lo es el grado de vacío requerido, el que influye en la elección de los elementos conformantes del sistema para su buen funcionamiento. Para alcanzar el grado de vacío requerido, el tiempo es un factor importante que debe ser considerado y que depende de varias exigencias, en gran medida de la velocidad de bombeo, éste es un parámetro de la bomba que influirá en la evacuación de un equipo.

Concretándose a límites de vacío medio, el uso de una bomba de vacío con baja velocidad de bombeo, puede traducirse en pérdidas en tiempo y costo. Por tal motivo, en el presente trabajo se busca desarrollar un método que permita determinar la velocidad de bombeo real de una bomba mecánica cuyo intervalo de operación vaya desde la presión atmosférica hasta presiones de  $10^{-3}$  torr. La finalidad es contar con un dispositivo que permita realizar un estudio a las bombas mecánicas mediante la obtención y el análisis de curvas de velocidad de bombeo, con lo que será posible determinar el estado del conjunto o bien las unidades que deben ser reparadas a modo de mantener un equipo trabajando próximo al 100% de su capacidad.

En el contexto de este trabajo se introducen de manera completa los conceptos fundamentales asociados con la tecnología del vacío. El capítulo 1, trata en forma concreta la ecuación de estado del gas ideal, camino libre medio, viscosidad, flujo de gases y se habla en forma breve de las bombas de vacío. En el

capítulo 2, se exponen los conceptos de velocidad de bombeo y conductancia, dos métodos de medición de la velocidad y ejemplos de medición de conductancias. En el capítulo 3, se plantea el diseño e implementación del sistema obedeciendo a patrones que para ello há aprobado como normas la *Sociedad Americana de Vacío*. También se tratan en este capítulo, los tipos de material empleados en el desarrollo de este trabajo, así mismo se habla de las fugas y sellos. Y en el capítulo 4, se presentan los resultados y el análisis correspondiente de las curvas de velocidad de bombeo obtenidas.

# CAPITULO 1

## FUNDAMENTOS

1.1 ECUACION DE ESTADO DEL GAS IDEAL.

1.2 ENERGIA CINETICA DE LAS MOLECULAS.

1.3 CAMINO LIBRE MEDIO.

1.4 VISCOSIDAD.

1.5 FLUJO DE GASES.

1.6 BOMBAS DE VACIO.

# I FUNDAMENTOS.

## 1.1 ECUACION DE ESTADO DEL GAS IDEAL.

El estudio del comportamiento de los gases, es tarea de la Teoría Cinética partiendo de las siguientes hipótesis:

- el gas está formado por partículas idénticas llamadas moléculas,
- no todas las moléculas viajan con la misma velocidad,
- las moléculas se consideran pequeñas esferas rígidas ( $d \approx 10^{-8}$  cm),
- no existen fuerzas de interacción de ningún tipo entre ellas,
- las moléculas están en movimiento continuo y viajan en línea recta,
- no se mueven con una dirección preferencial,
- las colisiones entre las moléculas y con las paredes del recipiente que las contiene, son perfectamente elásticas.

En una situación de vacío, es decir, cuando un espacio es ocupado por gases a una presión menor que la presión atmosférica, estos gases reales se comportan como un gas ideal, mientras no se acerquen a la condición de vapor saturado<sup>(1)</sup>, esto es, mientras que la presión sea algo más baja que la presión de vapor en equilibrio con la fase sólida o líquida a la temperatura considerada.

La ecuación de estado de un gas ideal, es la relación

(1) Referencia en bibliografía página 245.

que existe entre los tres parámetros que caracterizan el estado de un gas que son: la presión ( $P$ ), el volumen ( $V$ ) y la temperatura ( $T$ );

$$P = nKT^M \quad (1)$$

donde  $K$  es la constante de Boltzmann ( $=1.38 \times 10^{-16}$  Ergios/ $^{\circ}$ K) y  $n$  el número de moléculas por unidad de volumen ( $n=N/V$ ).

## 1.2 ENERGIA CINÉTICA DE LAS MOLECULAS.

Debido a que las moléculas presentan un movimiento al azar en un gas, existe una distribución de velocidades de dichas moléculas, la que fue deducida por Maxwell y Boltzmann y está dada por la expresión:

$$F_v = (4/\sqrt{\pi})\beta^{3/2}v^2 \exp(-\beta^2 v^2) \quad (2)$$

donde,

$$\beta^2 = m/2KT \quad (3)$$

Diferenciando (2), respecto a la velocidad ( $v$ ) e igualando este resultado a cero, se obtiene el valor más probable  $v_p$  de la velocidad ( $v_p = \beta^{-1}$ ). La interpretación de este resultado es que un número mayor de moléculas se encontrará viajando

\* Se trabajará en el sistema de unidades cgs.



con este valor de la velocidad. Sin embargo,  $v_p$  no coincide con el valor promedio aritmético de la velocidad que es  $v_{av} = 1.128v_p$ .

Por último, la velocidad cuadrática promedio  $v^2$ , es igual a:

$$v^2 = 3KT/m \quad (4)$$

de donde la energía cinética total es,

$$mv^2/2 = 3KT/2 \quad (5)$$

Si se considera que esta energía se distribuye igualmente en las tres componentes del movimiento, entonces cada una vale  $(1/2)KT$ .

### 1.3 CAMINO LIBRE MEDIO.

Se llama camino libre medio ( $\lambda$ ), a la distancia promedio que recorre la molécula entre dos colisiones consecutivas, esta es una magnitud importante porque determina el diseño de varios tipos de bombas y de los sistemas de vacío. La viscosidad y la conductividad térmica están relacionadas con esta magnitud.

La ley de distribución de los recorridos libres, define la probabilidad  $dv(x)$  de que la molécula viaje sin chocar una

distancia  $x$  y experimente una colisión en el siguiente tramo infinitesimal  $dx$ , como:

$$dN(x) = n\sigma \exp(-n\sigma x) dx \quad (6)$$

donde  $\sigma = n\pi d^2$  es la sección eficaz de la colisión con  $(d)$  el diámetro molecular; obteniéndose,

$$\lambda = 1/n\sigma \quad (7)$$

Tomando en cuenta la distribución de las moléculas que chocan por sus velocidades relativas, se introduce el factor  $1/\sqrt{2}$ , donde,

$$\lambda = 1/(\sqrt{2}n\pi d^2) \quad (cm) \quad (8)$$

Con base a la relación de este parámetro  $\lambda$  y las dimensiones del recipiente que contiene las moléculas, se presenta en la sección 1.5 la clasificación de los tipos de flujo de gas.

#### 1.4 VISCOSIDAD.

El gas que fluye por un tubo, experimenta una resistencia al flujo de tal manera que la velocidad del fluido decrece del centro hacia las paredes.

Cada capa de gas paralela a la dirección del flujo,

ejerce una fuerza tangencial en la capa adyacente, lo que ocasiona que la capa viaje más lento. A este fenómeno se le conoce como viscosidad interna.

La fuerza tangencial es el resultado de la transferencia de momento entre las capas debido a colisiones moleculares sucesivas y tiene la siguiente expresión:

$$F = \eta(du/dy) \quad (9)$$

(F), es la fuerza por unidad de área;  $du/dy$  es la razón de cambio de la velocidad del gas con respecto a la distancia de las superficies.

A  $\eta$  se le conoce como coeficiente de viscosidad y se define como: "la fuerza tangencial que se ejerce por unidad de área y unidad de gradiente de la velocidad"<sup>(8)</sup> que viene expresada por,

$$\eta = (1/3)mn\lambda v_{av} \quad (10)$$

siendo (m) la masa de la molécula, ( $v_{av}$ ) velocidad media de las moléculas y ( $\lambda$ ) el camino libre medio.

La viscosidad interna depende del fluido, de la rugosidad de las superficies y del gradiente de velocidades del gas; sin embargo, de la ecuación (9) se deduce que no depende de la presión; este resultado es válido para un intervalo dado de presión. A presiones altas, la distancia

(8) Referencia en bibliografía página 8.

promedio entre las moléculas es tan pequeña que las fuerzas intermoleculares llegan a ser importantes y la transferencia de momentos es diferente a lo que se ha supuesto aquí. Y a muy bajas presiones cuando se cumple  $\lambda/y \gg 1$  la fuerza puede expresarse como,

$$F = (Pmu_{av})/4KT\alpha \quad (11)$$

donde (P) es la presión, ( $u$ ) campo de velocidades, y ( $\alpha$ ) una constante. El término ( $Pmu/4KT$ ), se conoce como viscosidad molecular libre.<sup>(4)</sup> La constante ( $\alpha$ ) está relacionada con el deslizamiento de las moléculas en la capa de gas, y para la mayoría de los gases  $\alpha \approx 1$ .

### 1.5 FLUJO DE GASES.

Se pueden distinguir dos casos límites: cuando la presión es baja y predominan los choques de las moléculas con las paredes del recipiente que las contiene, se dice que existe el régimen molecular; pero si la mayor parte de los choques se producen entre las moléculas, se trata del régimen viscoso. Es en este régimen cuando la viscosidad interna afecta al movimiento de los gases.

Cuando el camino libre medio ( $\lambda$ ) es comparable con las dimensiones del recipiente en que están contenidas las

(4) Referencia en bibliografía página 15.

moléculas, el régimen es de transición o intermedio. La presión en la que ocurre este régimen es difícil de precisar y su duración es corta dentro de los sistemas de vacío.

Dentro del estado viscoso se hace referencia a un flujo de tipo turbulento y otro de tipo laminar. El flujo turbulento se obtiene a velocidades y presiones altas y no se presenta en los sistemas de vacío en condiciones normales de evacuación; por el contrario, el flujo laminar se presenta para velocidades menores, en esta situación las capas son paralelas y su velocidad se va incrementando de las paredes hacia el centro del conducto.

El flujo del gas se describe por el número de Knudsen, factor adimensional definido como el cociente del camino libre medio ( $\lambda$ ) entre el diámetro ( $d$ ) del conducto.

$$K_n = \lambda/d \quad (12)$$

Con base en esta relación, se da la clasificación siguiente:

$K_n < 0.01$	viscoso
$0.01 < K_n < 1.0$	intermedio
$K_n > 1.0$	molecular

De lo anterior se tiene que en el régimen viscoso, el

camino libre medio ( $\lambda$ ), es menor que una centésima parte del diámetro del conducto ( $\lambda < 0.01d$ ); en el régimen intermedio el valor de  $\lambda$  está entre  $0.01d$  y  $d$ ; y en el régimen molecular  $\lambda > d$ . Es así como quedan determinados los diferentes tipos de flujo, ubicando el desarrollo de este trabajo en régimen viscoso.

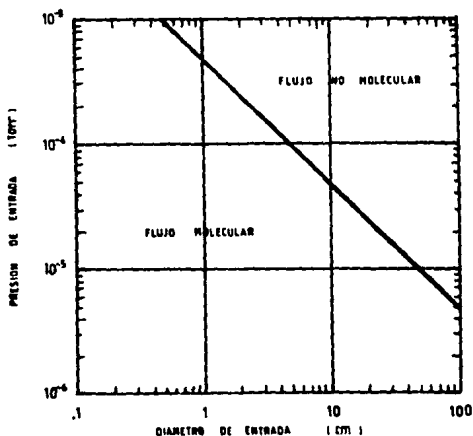


Figura 1. Límite del régimen de flujo no molecular en función del diámetro de entrada de la bomba<sup>10</sup>.

<sup>10</sup> Tomado de STANDARDS OF THE AMERICAN VACUUM SOCIETY, January/1976, sección 5.3.

## 1.6 BOMBAS DE VACIO.

La función principal de una bomba de vacío, es la de reducir el número de moléculas presentes en la fase gaseosa dentro de una cámara, esta condición dependerá del tipo de bomba seleccionada. Esto implica que cada bomba tiene parámetros específicos que la caracterizan como: velocidad de bombeo, presión última, presión de escape, composición del gas residual y otros.

Las bombas de vacío mecánicas cuyo intervalo de operación es desde la presión atmosférica hasta presiones de  $10^{-3}$  torr, se utilizan como bombas de apoyo o prevacío para bombas de alto vacío, que no descargan directamente a la atmósfera. El principio físico asociado a estas bombas es la compresión y expansión del gas, así tenemos las bombas rotatorias de paletas, las bombas rotatorias de pistón y las bombas roots.

Por ejemplo, una bomba rotatoria de paletas contiene un cilindro sólido excéntrico llamado rotor, que gira dentro de un recipiente formando una cámara con un volumen de gas que se succiona por la expansión dentro del contenedor; éste tenderá a cero por la rotación, con lo que la presión del gas confinado aumentará rápidamente siendo mayor que la presión atmosférica y al llegar a la válvula de expulsión se descarga al medio ambiente. Para evitar la condensación de vapores que causaría la descomposición del aceite, se usa una válvula de lastre de gas unida a la cámara de alta presión con la que se

inyecta aire desde el exterior y la válvula que comunica con la atmósfera se abre antes y reduce la relación de compresión para el vapor.

La figura 2. muestra los elementos de una bomba rotatoria de paletas:

- (a) Acceso de aire.
- (b) Descarga.
- (c) Acceso entre el sistema y la bomba.
- (d) Rotor.
- (e) Estator.
- (f) Aceite lubricante y sellador.
- (g) Válvula de descarga.

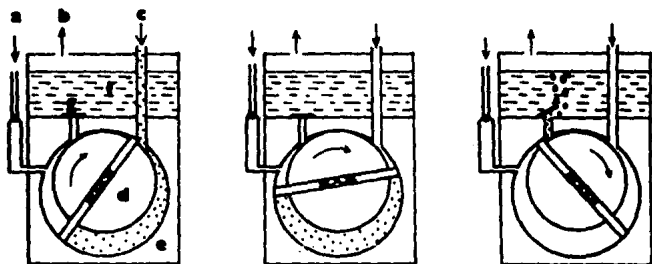


Figura 2. Funcionamiento de una bomba rotatoria de paletas.



La figura 2, muestra los elementos de una bomba rotatoria de pistón:

- a) Puerto de entrada.
- b) Placa hueca con orificio.
- c) Estator.
- d) Rotor excéntrico.
- e) Anillo.
- f) Espacio para enfriamiento con agua.
- g) Válvula de descarga.
- h) Descarga.

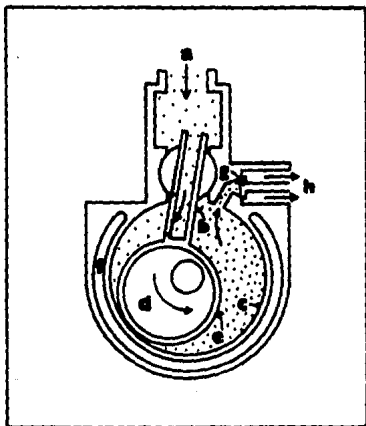


Figura 3. Sección de una bomba rotatoria de pistón.

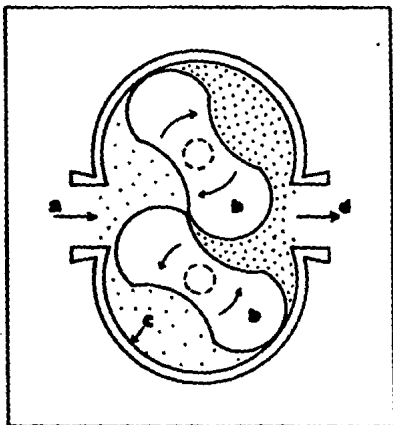


Figura 4. Principio de funcionamiento de una bomba roots: (a) puerto de entrada, (b) rotadores, (c) estator y (d) descarga.

La bomba de prueba usada en este trabajo es una bomba rotatoria de paletas, por tal motivo se há presentado una descripción más completa al respecto.

## CAPITULO 2

### VELOCIDAD DE BOMBEO Y CONDUCTANCIAS

2.1 VELOCIDAD DE BOMBEO Y FLUJO MASICO.

2.2 VELOCIDAD DE EVACUACION.

2.3 CONDUCTANCIAS EN UN SISTEMA DE VACIO.

2.4 EJEMPLOS DE ALGUNAS GEOMETRIAS.

2.4.1) TUBOS.

2.4.2) ORIFICIOS.

2.5 METODOS DE MEDICION DE LA VELOCIDAD DE BOMBEO.

2.5.1) METODO A PRESION CONSTANTE.

2.5.2) METODO A VOLUMEN CONSTANTE.

## 2 VELOCIDAD DE BOMBEO Y CONDUCTANCIAS.

### 2.1 VELOCIDAD DE BOMBEO Y FLUJO MASICO.

En un sistema de vacío las bombas tienen principios de operación distintos, dependiendo del tipo de flujo. Estos sistemas transportan el gas de un recipiente a otro con una rapidez determinada por la velocidad de bombeo ( $S$ ), que se define como el volumen de gas que la bomba extrae del sistema por unidad de tiempo ( $dV/dt$ ), a la presión existente en la entrada de la bomba. Las unidades más comunes de este parámetro son:

- a) Litros por segundo (lts/seg)
- b) Pies cúbicos por minuto (pies<sup>3</sup>/min)
- c) Metros cúbicos por hora (m<sup>3</sup>/hr),
- d) Centímetros cúbicos por segundo (cm<sup>3</sup>/seg)

El flujo de gas ( $Q$ ) que sale de un sistema de vacío, llamado el gasto, se define como el producto del volumen que pasa en una unidad de tiempo, por la Presión ( $P$ ) existente,

$$Q = P(dV/dt) \quad (13)$$

donde por definición,

$$S = dV/dt \quad (14)$$

luego,

$$Q = PS \quad (15)$$

En condiciones de flujo estacionario donde  $(dP/dt=0)$  se cumple que  $(P)$  es constante, conjuntando las ecuaciones (1) y (13) donde  $(n=N/V)$  se obtiene,

$$Q = KT(dN/dt) \quad (16)$$

$dN/dt$  es el flujo másico y es proporcional al gasto,

$$dN/dt = Q/KT. \quad (17)$$

Como la mayoría de los cálculos se refieren a temperatura ambiente, en lo subsecuente se prefiere el uso de  $Q$  en vez de  $Q/KT$ .

## 2.2 VELOCIDAD DE EVACUACION.

Considérese una cámara de un cierto volumen  $(V)$ , que será evacuada por un sistema con velocidad de bombeo efectivo  $(S_0)$ , suponiendo que la presión final del sistema de bombeo es despreciable, en este caso el gasto está dado por la ecuación (15),

$$Q = PS_0 \quad (18)$$

Como resultado del bombeo continuo, la presión en la cámara debe decaer conforme a la siguiente ecuación,

$$Q = -d(PV)/dt \quad (19)$$

de ambas ecuaciones,

$$P = P_0 \exp[-(C_s/V)t] \quad (20)$$

donde  $(P_0)$  es la presión inicial de la cámara.

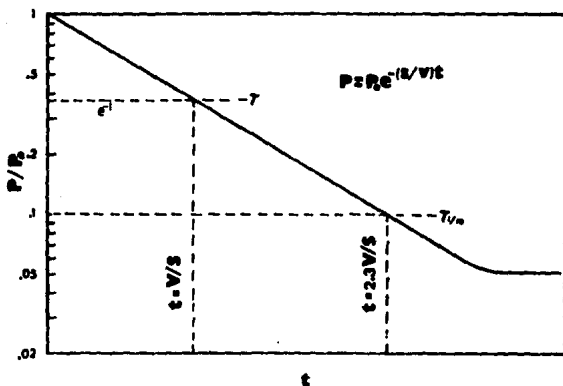


Figura 5. Evacuación de una cámara.

En el caso en que existan fugas en el sistema, el gasto se expresa como,

$$Q = PS - Q_0 \quad (21)$$

donde  $Q_0$  es la fuga que determina la presión final ( $P_1$ ) del sistema; cuando la presión  $P$  alcanza la presión final ( $P=P_1$ ), el gasto  $Q$  se anula ( $Q=0$ ) lo que implica que,

$$Q_0 = S \cdot P_1 \quad (22)$$

de esta manera se tiene que,

$$Q = S \cdot P [1 - (P_1/P)]$$

ó bien,  $S = S \cdot [1 - (P_1/P)]$ , (23)

y la ecuación análoga a la ecuación (20) es,

$$P - P_1 = (P_0 - P_1) \exp[-(S/V)t]. \quad (24)$$

El caso más general  $P_1 \ll P_0 \rightarrow P_0 - P_1 \cong P_0$  luego,

$$P = P_0 \exp[-(S/V)t] + P_1 \quad (25)$$

esta es la expresión matemática para el caso de un sistema con fugas.

Ahora, si  $P \gg P_1$ , la constante de tiempo es  $\tau = V/S$ . De la gráfica de  $\log(P/P_0)$  contra  $t$  (Figura 5), el tiempo requerido para reducir la presión en una década es,

$$v_{L/10} = 2.3 (V/S)$$

entonces,

$$S = 2.3 (V/L) \log (P_0/P) \quad (26)$$

Esta es la ecuación en la que se fundamenta el método a volumen constante para medición de la velocidad de bombeo descrito en la sección 2.5.

### 2.3 CONDUCTANCIAS EN UN SISTEMA DE VACIO.

En la práctica, siempre existe una cámara a evacuar y una instalación a través de la que el volumen de gas será aspirado. En esta instalación el flujo se verá afectado por las dimensiones y la forma geométrica de los conductos, produciéndose pérdidas en el gas aspirado debido al rozamiento de las moléculas entre sí y contra las paredes tanto de los conductos como del recipiente que las contiene, a lo que se denomina conductancia ( $C$ ) y se define como el cociente entre el gasto y la diferencia de presión existente entre ambos lados de la conexión, expresada en unidades de volumen sobre tiempo.

$$C = Q/\Delta P \quad (27)$$

su inverso es la resistencia. Por analogía entre el flujo de gas y la corriente eléctrica, ( $C$ ) corresponde a la



conductividad eléctrica y  $\langle \Delta P \rangle$  a la diferencia de potencial, por lo que las reglas para el cálculo de la conductancia en un circuito eléctrico son aplicables,

a) En paralelo,

$$C = \sum_i C_i \quad (28)$$

b) En serie,

$$1/C = \sum_i (1/C_i). \quad (29)$$

En ambas ecuaciones el subíndice  $i$  representa el número de conductancias dispuestos en el arreglo. La figura 6 muestra la disposición de dos conductancias en paralelo y en la figura 7, se tienen dispuestos dos conductancias en serie.

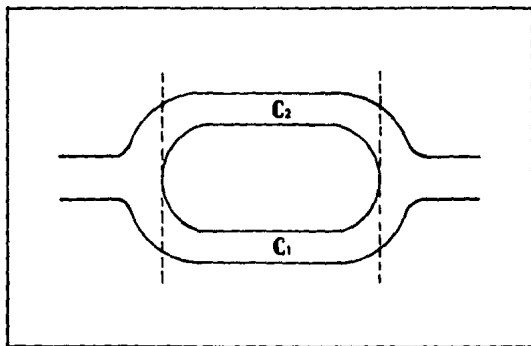


Figura 6. Conductancias en paralelo.

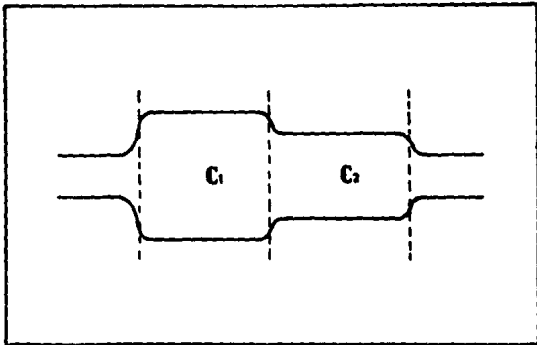


Figura 7. Conductancias en serie.

El cálculo de la conductancia resulta complicado por varios motivos, entre ellos, porque varía de acuerdo a la presión de trabajo, al régimen de flujo y finalmente con la geometría y forma de la instalación. Pero, si conocemos la conductancia  $C$  entre dos puntos cualesquiera del sistema y la velocidad de bombeo  $S_p$  en uno de esos puntos, es posible conocer la velocidad de bombeo en el otro punto con la siguiente expresión.

$$\frac{1}{S_e} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{C} \quad (30)$$

De esta ecuación se deduce que:

- a) Si la conductancia  $C$  es muy elevada, lo que sucede cuando el tubo que une el depósito con la bomba es de gran

diámetro y de longitud pequeña, resulta que  $S_0 = S_p$ , ya que no habrá frenado de las moléculas de gas al atravesar el tubo.

b) Si la conductancia  $C$  es pequeña, lo que ocurre con tubos de pequeño diámetro y gran longitud, será precisamente este valor de  $C$  el que determinará la velocidad real de aspiración, es decir  $S_0 \cong C$  aunque el de la bomba sea muy elevado. Este resultado se entiende porque en efecto, un tubo de pequeña sección provocará mayor frenado al paso de las moléculas de gas. Aplicando este resultado a la ecuación (23), se obtiene,

$$S = C[1 - (P_1/P)]. \quad (31)$$

En la siguiente sección se presentan algunos ejemplos de conductancia.

## 2.4 EJEMPLOS DE ALGUNAS GEOMETRIAS.

A continuación se hará referencia al régimen de flujo y la forma geométrica de la instalación para el caso más común de que el gas sea aire a temperatura ambiente (20°C).

### 2.4.1 TUBOS.

Para tubos rectos y de longitud media, la conductancia calculada a partir de la ecuación de

Poiseuille<sup>(5)</sup> para flujo viscoso es,

$$C = 182 (D^4/L) \bar{P} \quad (\text{its/seg}) \quad (32)$$

con  $D$  el diámetro,  $L$  la longitud del tubo y  $\bar{P}$  la presión promedio en torr. La constante de proporcionalidad presente en esta expresión involucra unidades, de manera que el resultado final tenga las unidades especificadas (its/seg).

Knudsen obtuvo para el régimen molecular la conductancia para tubos largos,

$$C = 12.1 D^3/L \quad (\text{its/seg}) \quad (33)$$

para el régimen intermedio,

$$C = 12.1 (D^3/L) (J) \quad (\text{its/seg}) \quad (34)$$

en esta última expresión (ec. 34),  $J$  es un parámetro que varía según el valor del producto del diámetro por presión (ver tabla de valores de  $J$  en APENDICE A); cuando  $J$  vale 1 el régimen es molecular y cuando  $J$  vale 15 es régimen viscoso.

(5) Referencia en bibliografía página 76.

## 2.4.2 ORIFICIOS.

Se tiene dos cámaras a diferente presión ( $P_1 > P_2$ ) conectadas por un pequeño orificio de área  $A$ , entendiéndose por orificio una abertura delgada y de bordes afilados.

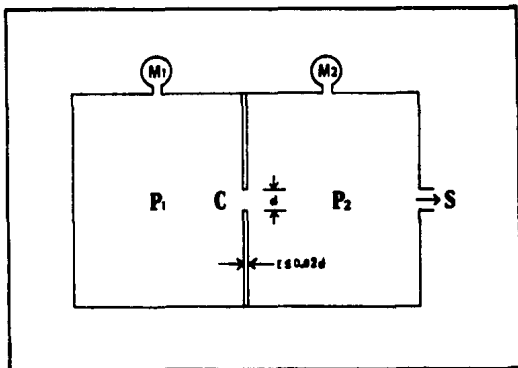


Figura 8. Conductancias en pequeños orificios.

Si la presión es tal que el régimen es viscoso, el flujo de gas ocurrirá de la región con mayor presión a la de menor presión (de  $P_1$  a  $P_2$ ) y dependerá de la relación de presiones  $r = P_2/P_1$ . El gasto  $Q$  que fluye a través del orificio está dado por la ecuación de Prandtl<sup>(2)</sup>.

(2) Referencia en bibliografía página 18.

$$Q = \sqrt{\frac{2\gamma K T_1}{m(\gamma-1)}} r^{1/\gamma} \sqrt{1-r^{(\gamma-1)/\gamma}} P_1 A. \quad (35)$$

donde  $\gamma = C_p/C_v$  es la relación de los calores específicos del gas y  $T_1$  es la temperatura absoluta de la cámara con presión  $P_1$ .

Para que la abertura pueda considerarse como orificio, la Sociedad Americana de Vacío<sup>(13)</sup> recomienda que el espesor  $E$  de la separación entre las cámaras donde está ubicada cumpla que  $E \leq 0.02d$  donde  $d$  es el diámetro de la abertura.

Si se sustituyen valores en la ecuación (35) para aire a 20°C, resulta que para  $r \leq 0.1$ ,

$$C \cong 20A \quad (\text{lbs/seg}) \quad (36)$$

en el régimen molecular se tiene que,

$$C = 11.6A \quad (\text{lbs/seg}) \quad (37)$$

donde  $(A)$  es el área del orificio ( $\text{cm}^2$ ).

Estas conductancias son aplicables en sistemas de vacío cuyos acoplamientos e interconexiones tienen formas geométricas de las mencionadas aquí.

(13) Referencia en bibliografía página 2954.

## 2.5 METODOS DE MEDICION DE LA VELOCIDAD DE BOMBEO.

Existen dos métodos para la medición de la velocidad de bombeo: a presión constante y a volumen constante.

### 2.5.1 METODO A PRESION CONSTANTE.

El método de obtención a presión constante se fundamenta en la ecuación (18) ( $Q = PS$ ), en el que la velocidad de bombeo ( $S$ ) es,

$$S = Q/P \quad (38)$$

y se determina midiendo el flujo ( $Q$ ) a una presión ( $P$ ) constante.

El procedimiento que se sigue es el siguiente: una vasija está siendo evacuada por la bomba, y un volumen de aire es admitido a través de un tubo de vidrio con escala métrica unida a una válvula de aguja (Figura 9). Un medidor de presión se conecta a la vasija en b y la válvula se ajusta hasta que la presión indicada por el medidor sea constante. El volumen de aire bombeado fuera del tubo en el tiempo  $t$ , está dado por el movimiento de una gota de mercurio dentro del tubo, lo que constituye el medidor de flujo. De esta forma, la velocidad de bombeo puede determinarse para varias presiones dentro de la vasija y está dada por,

$$S = Q/P = P_0 V/Pt = P_0 (\pi a^2 l)/Pt \quad (39)$$

donde ( $P_0$ ) es la presión atmosférica; ( $a$ ) es el radio del tubo de vidrio y ( $l$ ) la distancia a la que la gota de mercurio se desplaza durante el tiempo  $t$ .

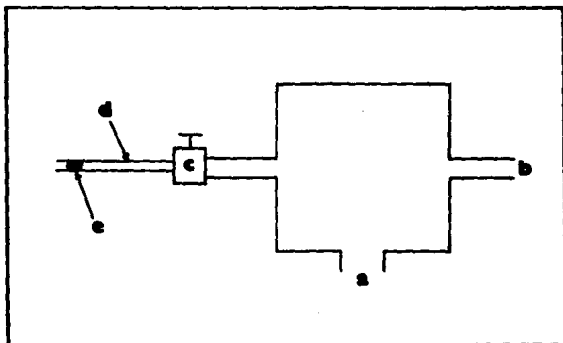


Figura 9. Diagrama para método a presión constante:  
 (a) conexión a la bomba, (b) medidor de presión, (c) válvula de aguja, (d) tubo de vidrio y (e) gota de mercurio.



## 2.5.2 METODO A VOLUMEN CONSTANTE.

Este método está basado en la ecuación (26)  $S = 2.3 (V/t) \log (P_1/P_2)$ , y consiste en registrar las presiones  $P_1$  y  $P_2$  al principio y al final de un intervalo de tiempo dado. El método es generalmente menos preciso que el de presión constante, según lo estima Alexander Roth<sup>(5)</sup>, ya que la velocidad de bombeo varía con la presión.

La velocidad de bombeo determinada por la ecuación (26) para la caída de presión de  $P_1$  a  $P_2$ , está relacionada con la presión promedio  $\bar{P} = (P_1 + P_2)/2$ . Como dicha ecuación está basada en la suposición de que  $S$  es constante, el intervalo de tiempo usado en esta medición tiene que ser tan corto como sea posible.

Los dos métodos para la medición de la velocidad de bombeo descritos en esta sección, se desarrollan en los capítulos siguientes.

(5) Referencia en bibliografía página 270.

## **CAPITULO 3**

### **DISEÑO Y CONSTRUCCION**

#### **3.1 ARREGLO TIPICO.**

**3.1.1) DOMO DE PRUEBA.**

**3.1.2) MEDIDOR DE PRESION.**

**3.1.3) SISTEMA DE INTRODUCCION DE GAS.**

#### **3.2 CAMARA PARA METODO A VOLUMEN CONSTANTE.**

#### **3.3 MATERIAL EMPLEADO.**

#### **3.4 SELLOS PARA VACIO.**

#### **3.5 FUGAS REALES Y VIRTUALES.**

### 3 DISEÑO Y CONSTRUCCION.

La implementación del sistema se divide en dos partes: una de ellas se refiere al Método a presión constante y la otra al Método a volumen constante. Para el primer método existe un arreglo típico que se describe a continuación.

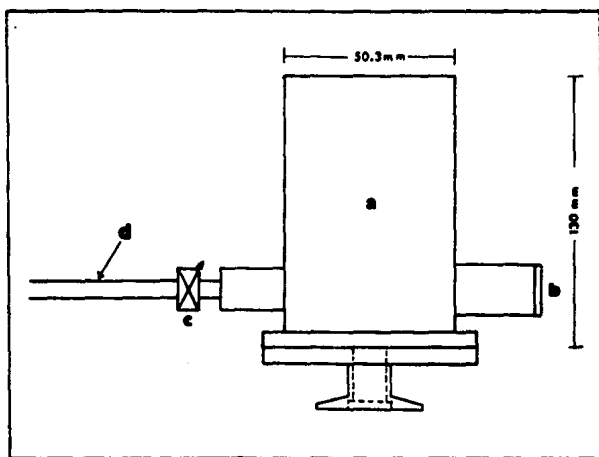


Figura 10. Componentes del sistema: (a) domo de prueba, (b) medidor de presión, (c) válvula de control, (d) medidor de flujo.

### 3.1 ARREGLO TIPICO.

En el diseño y construcción del sistema que nos permitirá determinar la velocidad de bombeo de una bomba mecánica, se consideró la geometría básica que la *Sociedad Americana de Vacío* aprueba como norma.

El sistema se compone de: domo de prueba (a), medidor de vacío (b), válvula de control (c) y el medidor de flujo (d). La válvula y el medidor de flujo constituyen el sistema de introducción de gas, y la disposición de las cuatro partes se muestra en la figura 10. En la parte inferior de esta figura, se observa el adaptador que permite acoplar el domo con la bomba de prueba. Las medidas de este adaptador depende de las medidas del puerto de entrada de la bomba.

#### 3.1.1) DOMO DE PRUEBA.

El domo de prueba es una cámara de forma y dimensiones específicas que se une al puerto de entrada de la bomba, es de sección transversal circular y de diámetro interior  $D$ .

En la selección de las medidas del domo se toman ciertas consideraciones: prevención de resonancia, longitud adecuada para conseguir un flujo uniforme en el punto de medición de la presión y tener espacio suficiente para la conexión del medidor de flujo.

Considerando estos puntos la Sociedad Americana de Vacío<sup>(64)</sup>, proporciona las siguientes medidas.

Para bombas con diámetro de entrada mayor o igual a 50mm, el diámetro  $D$  debe ser igual al de la entrada de la bomba con un 2% de error. Para bombas que tienen diámetro de entrada menor que 50mm, el diámetro  $D$  debe ser de 50mm con un 1% de error. La altura del domo debe tener una longitud mínima de  $1.5D$  y máximo de  $10D$ , siendo necesaria la longitud mínima para trabajos en régimen molecular. El extremo superior de éste puede ser plano y perpendicular al eje vertical, ligeramente cóncavo o inclinado a un ángulo de  $5^\circ$  como máximo.

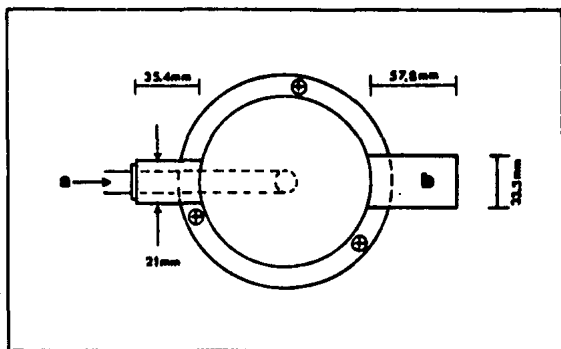


Figura 11. Vista superior de los puertos cilíndricos del domo: (a) entrada de gas, (b) medidor de presión.

(64) Referencia en bibliografía sección 5.2.

El domo tiene dispuesto en lados opuestos, dos puertos cilíndricos proyectados perpendicularmente hacia fuera, cuyos ejes respectivos están a una altura de 0.5D. Uno de los puertos se destina a la instalación de un medidor de presión. El diámetro de este puerto debe medir  $38 \pm 2$  mm y una longitud máxima de 152 mm. El otro puerto es para ajustar un tubo de entrada de gas al domo (figura 11).

### 3.1.2) MEDIDOR DE PRESION.

El medidor de presión empleado, es un medidor de conductividad térmica (pirani) marca Leybold-Heraeus modelo 18231Bri, cuyo intervalo de operación cubre totalmente las presiones de una bomba mecánica que va de la presión atmosférica a una presión de  $10^{-3}$  torr.

Este medidor se coloca en uno de los puertos cilíndricos del domo cuya unión se sella con un arosello sintético.

### 3.1.3) SISTEMA DE INTRODUCCION DE GAS.

El segundo de los puertos cilíndricos del domo, lleva un tubo de entrada de gas, cuyo diámetro debe medir  $10 \pm 1$  mm y hace un ángulo recto hacia arriba. El tubo termina a lo largo del eje central del domo a una distancia de 0.5D por abajo de la tapa superior (figura



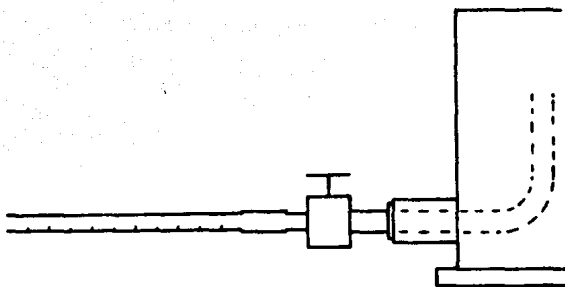


Figura 13. Sistema de Introducción de Gas.

### 3.2 CAMARA PARA METODO A VOLUMEN CONSTANTE.

En esta segunda parte se usa una cámara de mayor tamaño: es un cilindro circular de diámetro  $D = 20.5$  cm y longitud  $L = 39$  cm, cuyas tapas van selladas con arosellos sintéticos y atornilladas.

En el centro de la tapa superior se tiene un puerto circular para ajustar el medidor de presión.

En la tapa inferior tiene un puerto cilíndrico hacia abajo colocado excéntricamente. Este puerto es para acoplar la cámara al puerto de la bomba (figura 14).



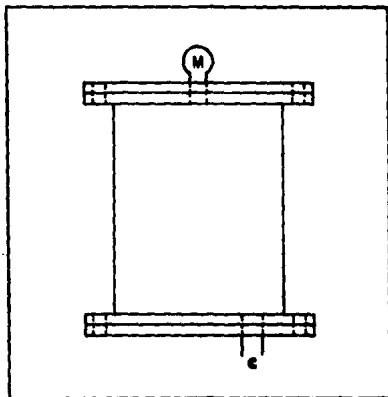


Figura 14. Cámara para método a volumen constante:  
(M)D medidor de presión, (c) conexión a  
la bomba.

### 3.3 MATERIAL EMPLEADO.

Los materiales metálicos que se emplean en sistemas de vacío deben cumplir ciertos criterios como son: baja presión de vapor, resistentes a la temperatura ( $T \approx 450^{\circ}\text{C}$ ), deben soportar la presión atmosférica, resistentes a la corrosión cuando sean expuestos al aire durante el horneado, químicamente inertes, fácil maquinado, formabilidad y la

difusión de gases a través de ellos debe ser despreciable. A pesar de que muchos metales son permeados por el hidrógeno ( $H_2$ ), la penetración por otros gases es gradualmente baja y la permeación por gases raros es nula.

Para la construcción de la cámara de vacío se usa acero inoxidable serie 300, 304L y 316L, donde L indica bajo contenido de carbón. En el presente trabajo se usó el de serie 300.

La serie 300 de acero inoxidable es de gran importancia para la industria del vacío ya que pueden ser latonados, soldados y maquinados con facilidad y como son aleaciones no magnéticas esto puede usarse como un medio de identificación parcial.

El adaptador que sirve para acoplar el domo con la bomba se construyó de aluminio, éste es un material suave en su estado puro con una densidad de  $2.7 \text{ g/cm}^3$ , por lo que solo en contadas ocasiones se usa como elemento estructural, encontrando mayor uso como material para arosellos debido a su fácil formación y soldado.

En el sistema de introducción de gas del domo de prueba, se usó tubo de cobre para el tubo de entrada de gas. El cobre puro no es recomendable para usarse en sistemas de vacío a temperaturas elevadas porque en el proceso de su refinación quedan contenidas algunas inclusiones de oxígeno, los que pueden combinarse con el hidrógeno que se difunde para formar agua, pero a temperatura ambiente, encuentra múltiples aplicaciones tales como cámaras y tubos conectores.

El vidrio se agrega al conjunto de materiales para vacío, ya que tiene las propiedades requeridas, que deben ser: estables, inertes, fuertes, no porosos, maquinables y de fácil adquisición; pero la característica que lo distingue es su habilidad para transmitir un amplio espectro de radiación luminosa.

#### 3.4 SELLOS PARA VACIO.

Los sellos se utilizan en el acoplamiento de las diferentes partes que constituyen el sistema con el propósito de evitar fugas.

En la unión de los puertos cilíndricos con el domo de prueba se usa soldadura; sello estático permanente que se emplea en uniones fijas, de interconexión entre líneas, tapas, cuerpos de válvulas y cualquier otro componente de un sistema que al montarse queda en una posición única. Además, esta clase de sello puede efectuarse entre metales, vidrios, cerámicas o la combinación entre ellos. En la Figura 15, se muestran algunas formas de soldadura<sup>(7)</sup>.

En el acoplamiento del domo de prueba con el puerto de entrada de la bomba y, del puerto cilíndrico del domo con el medidor de presión, se usan arosellos sintéticos hechos de nitrilo y vitón, que es la forma más general para sellar sistemas. También existen arosellos metálicos fabricados de cobre, oro y aluminio con el mismo propósito.

(7) Referencia en bibliografía página 122.

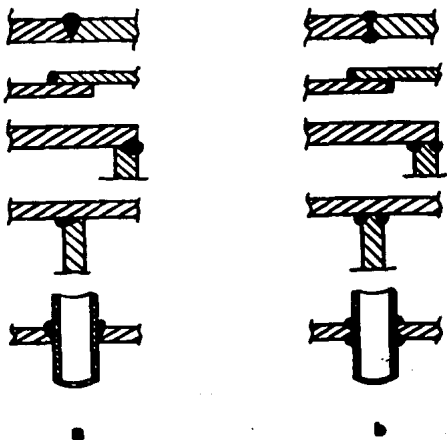


Figura 15. Formas de soldadura. (a) Más apropiadas adecuadas para presiones arriba de  $10^{-4}$  torr. (b) Forman cavidades por los cordones de soldadura, lo que facilita la existencia de fugas tipo virtual<sup>■</sup>.

Existen sellos de tipo dinámico que corresponden a los usados en partes móviles como es la traslación de la compuerta en el interior de la válvula usada o, sellos que permiten giros o deslizamientos en ejes móviles, etc.

■ Gases y vapores atrapados en cavidades formadas al construir una pieza.

Para los montajes de sellos estáticos y dinámicos debe tomarse en cuenta: el acabado de la superficie de asiento del arosello en ambas piezas entre los que se va a comprimir, medidas adecuadas en la profundidad y anchura de la caja que va a contenerlos. En la figura 16, se dan algunos datos al respecto, donde  $d$  es el diámetro de la sección transversal del arosello, con espacio libre después de comprimir entre 18 y 20%.

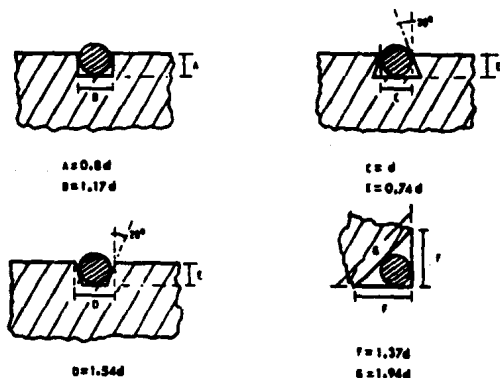


Figura 16. Medidas en el acabado de la superficie de asiento de arosellos<sup>(7)</sup>.

(7) Referencia en bibliografía página 106.

### 3.5 FUGAS REALES Y VIRTUALES.

Se denomina fuga al flujo de gas de un volumen a una presión dada a otro con presión diferente y se encuentra en todos los sistemas, esto implica que no existe un sistema de vacío que sea perfecto sin embargo, la presión última del sistema está determinada por el tamaño de esta fuga.

Las fugas se clasifican en reales y virtuales: las fugas reales, son las de aquellos gases que se producen fuera de la envolvente del sistema de vacío o componentes selladas; las fugas virtuales, son gases atrapados en el interior del recipiente por medio de grietas, hendiduras, ranuras, soldaduras inapropiadas y otros.

Existe otra fuente de gas que se origina internamente llamada degasificación y se debe principalmente a la desorción de gases atmosféricos, a la contaminación de las superficies y la temperatura del componente.

En el método a presión constante, la detección de fugas se enfoca, a la detección y medición del flujo de gas que se introduce al domo de prueba por medio de una fuga controlada.

La respuesta de un sistema evacuado y sellado para pruebas, depende de la clase de fuga. Si es una fuga real, la presión se incrementa en forma constante respecto al tiempo; si es una degasificación o una fuga virtual, la presión se incrementa exponencialmente hasta que tiende al equilibrio.

La presencia de fugas en un sistema de vacío, puede ser por error de diseño o construcción y por defectos del

material. En la construcción y montaje, puede tener una superficie de asiento para sello mal terminada o sin las medidas correctas; una soldadura mal hecha o descuido al manejar las partes pulidas para sellos rayando o golpeando partes del sistema.

Considerando las posibles causas mencionadas, hay necesidad de diseñar uniones de soldadura adecuadas, montajes para sellos tanto estáticos como dinámicos seguros y seleccionar el material con una resistencia mecánica apropiada para soportar los esfuerzos a que será sometido.

## CAPITULO 4

### RESULTADOS Y CONCLUSIONES

- 4.1 DESARROLLO DEL TRABAJO.
- 4.2 CURVA DE VELOCIDAD DE BOMBEO.
- 4.3 CONCLUSIONES.



## 4 RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

### 4.1 DESARROLLO DEL TRABAJO.

Una vez terminado el dispositivo objeto de este trabajo, se monta a una bomba rotativa de paletas D4A marca Leybold-Heraeus de 1500 rpm. El aceite que emplea esta bomba como lubricante y sellador es tipo DIFFOIL 20 con las siguientes características: presión de vapor  $1 \times 10^{-7}$  torr, viscosidad 69/350, densidad a  $143^{\circ}\text{C}$  0.88 g/cc y se procede de la siguiente manera:

Se coloca el medidor de presión graduado en mbar, de la misma marca que la bomba, en el puerto correspondiente de la cámara. Un tubo de vidrio graduado en centímetros se acopla a la válvula por medio de una manguera flexible especial para vacío, asegurándose con un nivel de gota que dicho tubo permanezca completamente horizontal. El tubo tiene en el extremo del lado del acoplamiento con la válvula, un diámetro mayor que el total. Esto es para alojar el mercurio desplazado y evitar que se introduzca a la válvula.

Se enciende la bomba y en seguida el medidor de presión, observando que la aguja se desplaza de un extremo a otro de la escala, empezando rápido y conforme avanza se torna más lento hasta que finalmente alcanza la presión de  $10^{-3}$  mbar, con la válvula de lastre de gas cerrada. Se acepta el uso de esta unidad de presión (mbar), conociendo la equivalencia con el torr que es,  $1 \text{ torr} = 1.33 \text{ mbar}$ .

Se mantiene la bomba funcionando 60 minutos aproximadamente antes de iniciar la toma de datos, para que la bomba adquiera: su temperatura normal de operación (50-70°C), sus componentes se han degasificado y el aceite ha desprendido sus impurezas al adquirir una elevada tensión de vapor. Además, las tolerancias (~ 1.2 mm) que forzosamente deben existir entre las partes móviles se han llenado de aceite formando un sistema sellado.

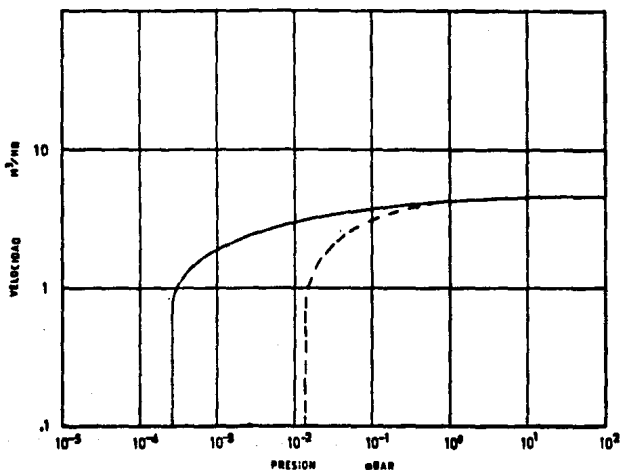
Se abre la válvula para introducir a la cámara un flujo constante de aire y se espera a que la presión sea estable en un valor determinado. luego con una jeringa se inyecta una gota de mercurio dentro del tubo de vidrio y con un cronómetro se mide el tiempo que la gota tarda en desplazarse una distancia dada, la que corresponde a un cierto volumen. Para ello, es importante que el mercurio a usar y la pared interior del tubo estén limpios, de lo contrario la gota de mercurio se adhiere a las paredes y se deforma imposibilitando el desplazamiento.

El problema que se presenta a presiones mayores que 2 mbar es que la gota se desplaza con mucha rapidez, de manera que no es posible medir el tiempo.

Se tomaron varias mediciones para cada presión en un intervalo comprendido entre  $1 \times 10^{-3}$  y 2 mbar (VER APENDICE B).

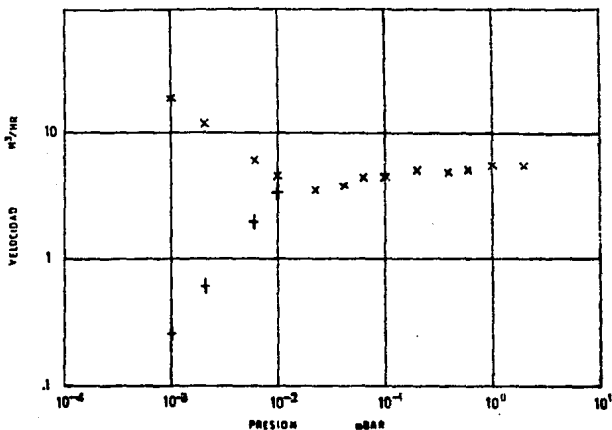
## 4.2 CURVA DE VELOCIDAD DE BOMBEO.

Existe una curva característica de velocidad de bombeo correspondiente a la bomba rotativa de paletas empleada, la que proporciona el fabricante (Gráfica No.1). Las presiones últimas que indican estas curvas, se obtienen con bombas nuevas, limpias y con un aceite limpio de baja presión de vapor.



Gráfica No. 1. Curva teórica. Línea continua, sin lastre de gas. Línea punteada, con lastre de gas.

De los datos obtenidos experimentalmente en la sección anterior, resulta la curva de la Gráfica No. 2, marcado cada punto con una "X".

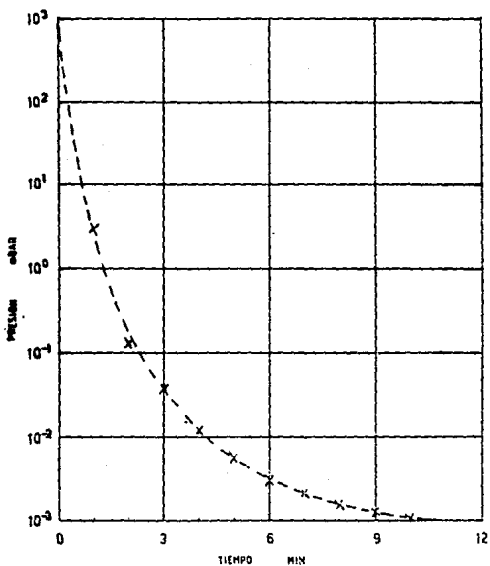


Gráfica No. 2. Curva experimental sin lastre de gas.

En el intervalo de presión  $1 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-2}$  mbar de la misma gráfica, se presentan los valores de la velocidad de bombeo calculada de la ecuación (31) ( $S=C(1-(P_1/P))$ ), marcados con un signo "+". La conductancia que figura en esta ecuación se refiere al acoplamiento del domo de prueba con la bomba y para calcularla se usa la ecuación (32) para

régimen viscoso, porque el trabajo se desarrolló en este régimen de acuerdo con la figura 2, que muestra los límites del régimen no molecular en función del diámetro de entrada de la bomba, ya que el de la bomba empleada en este trabajo es  $d = (1.6 \pm .003)\text{cm}$ .

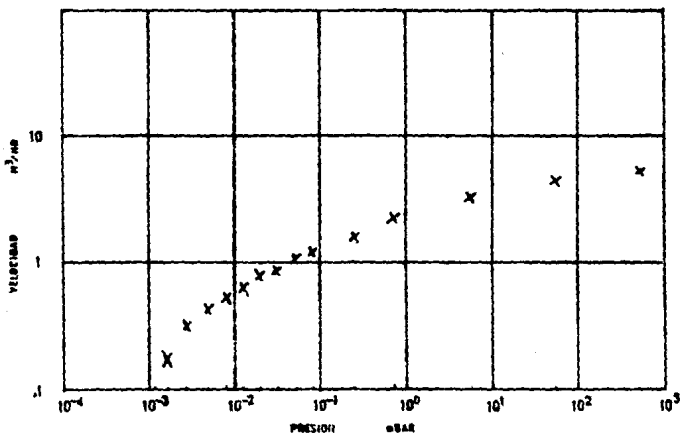
Para complementar resultados se usa el método a Volumen Constante (SECCION 2.5.2), vaciando con la misma bomba un volumen de 12.87 lts.



Gráfica No. 3. Tiempo de evacuación de la cámara.

Los parámetros medidos en este proceso son: presión y tiempo de evacuación. En la gráfica No. 3 se observa la curva ajustada con los valores experimentales (VER APENDICE C TABLA 4), gráfica de la que se toman valores de presión y tiempo en ciertos intervalos para posteriormente aplicar la ecuación (26). (en la que se fundamenta este método), y obtener la velocidad de bombeo promedio de cada intervalo (VER APENDICE C TABLA 5).

La obtención indirecta de estos valores, permite considerar un mayor número de datos en el intervalo de mayor curvatura los que dan origen a la gráfica No. 4.



Gráfica No. 4.

#### 4.3 CONCLUSIONES:

Las gráficas obtenidas en este trabajo, en general no coinciden con la curva teórica que proporciona el fabricante (Gráfica No. 1). En la gráfica No. 2 del método a presión constante, se observa un comportamiento similar dentro del intervalo comprendido entre  $2 \times 10^{-2}$  y 2 mbar. Abajo de éste, se obtienen valores falsos de la velocidad de bombeo que implica hacer ciertas consideraciones al método desarrollado.

Las aproximaciones que conducen a la ecuación (31) que es  $S=C(1-(P_1/P))$ , son aplicables en el intervalo de presión  $1 \times 10^{-2}$ - $2 \times 10^{-2}$  mbar, porque ciertamente la conductancia disminuye al disminuir la presión de trabajo (VER APENDICE B TABLA 3), por lo que es factible la obtención de la velocidad de bombeo a partir de la conductancia y la relación de presiones involucradas en la ecuación (31), con lo que se ajusta una curva aceptable de la velocidad de bombeo.

La interpretación de los valores elevados obtenidos en el mismo intervalo de presión, es que corresponden al flujo volumétrico en la parte más estrecha del conducto. Si la conductancia a bajas presiones se hace muy pequeña, se puede pensar como si existiera una reducción en la sección del conducto en el que aumenta la velocidad de flujo comparado con la velocidad en otra parte del conducto de sección mayor.

La desviación de la curva experimental con respecto a la curva teórica, se atribuye al desgaste en las partes móviles

de la bomba y a la contaminación del aceite. El aceite debe tener baja presión de vapor y con suficiente viscosidad para formar una película que debe sellar el espacio entre las superficies móviles. De esta forma, la viscosidad requerida en una bomba particular, depende de las tolerancias entre las partes en movimiento, la velocidad rotacional y la temperatura de operación de la bomba. Si se toma en cuenta que la bomba empleada en el experimento no es nueva y además con un tiempo de uso dado, el desgaste puede estar presente sin descartar la presencia de impurezas y gases diluidos en el aceite.

En la gráfica No. 4, se observa el resultado del método a volumen constante. A pesar de que la forma indirecta de obtener los datos lo hace menos exacto, en general se obtiene una curva congruente, que está por abajo de la curva teórica y desciende a partir de la presión atmosférica.

De los dos métodos desarrollados en este trabajo, se obtiene resultados más confiables de velocidad de bombeo del método a presión constante. Aunque el intervalo de presión en que se trabajó no cubre el intervalo de trabajo de una bomba mecánica, los resultados están más cercanos a la curva teórica. Si se cambia el tubo de vidrio empleado, por otro de diámetro mayor, puede ampliarse el intervalo a la presión atmosférica, porque la velocidad de la gota de mercurio disminuye facilitando las mediciones. Por otro lado, si se construye el adaptador de manera que se elimine el efecto de la conductancia, puede mejorar el resultado a presiones inferiores a  $2 \times 10^{-2}$  mbar.



Con frecuencia estas curvas tienen un carácter aproximado, depende del método desarrollado. Esto significa que son ciertas sólo cuando los valores de las magnitudes que figuran en estas relaciones se encuentran en determinados límites. Fuera de estos límites se hacen inciertas y es necesario buscar un método que proporcione resultados confiables en límites más amplios.

## APENDICE A

### FLUJO VISCOZO Y MOLECULAR EN UN TUBO LARGO DE SECCION CIRCULAR.

Para la conductancia de un tubo largo de sección circular, con la suposición de que: (a) el flujo no es turbulento en alguna parte del tubo y (b) la diferencia de presión entre los extremos no es tan grande que el mecanismo de flujo cambie a lo largo del tubo, Knudsen da la siguiente ecuación.

$$C = \left[ \frac{\pi D^4 \bar{P}}{128 \eta L} \right] + \left[ \frac{1}{8} \sqrt{\frac{2\pi KT}{m}} \frac{D^3}{L} \right] \left[ \frac{1 + \sqrt{\frac{m}{KT}} \frac{D\bar{P}}{\eta}}{1 + 1.24 \sqrt{\frac{m}{KT}} \frac{D\bar{P}}{\eta}} \right]$$

donde D es el diámetro del tubo,  $\bar{P}$  es la presión promedio en el tubo, L es la longitud del tubo,  $\eta$  es la viscosidad del gas, K la constante de Boltzmann, T es la temperatura absoluta y m la masa de la molécula; todos en unidades cgs.

Si la presión es muy baja, el primer miembro en el lado derecho de la ecuación puede despreciarse y el tercer miembro tiende a la unidad entonces la ecuación en régimen molecular se reduce a:

$$C = \frac{1}{8} \sqrt{\frac{2\pi KT}{m}} \frac{D^3}{L}$$

Si la presión es muy alta, el tercer miembro llega a ser una constante independiente de ésta, de modo que los dos últimos

membros pueden despreciarse. La ecuación de la conductancia en régimen viscoso queda,

$$C = \frac{\pi}{128} \frac{D^4 \bar{P}}{\eta L}$$

De acuerdo a la ecuación de Knudsen, los valores de las constantes para aire a 20°C se tiene,

$$C = \left[ 102 \frac{D^4 \bar{P}}{L} \right] + \left[ 12.1 \frac{D^8}{L} \right] \left[ \frac{1 + 256 D \bar{P}}{1 + 316 D \bar{P}} \right]$$

con D y L en cm y  $\bar{P}$  en torr, o bien,

$$C = 12.1 \frac{D^8}{L} (J)$$

donde,

$$J = \frac{1 + 271 D \bar{P} + 4.79 (D \bar{P})^2}{1 + 316 D \bar{P}}$$

De esta manera, J representa la corrección a ser aplicada a la fórmula de la conductancia en régimen molecular cuyos valores están tabulados como función de  $D \bar{P}$  en la tabla 1 de la página siguiente.

Tabla 1.

REGIMEN	DPC Torr-cm <sup>2</sup>	J
molecular	≤ 0.01	1.0
transición	0.02	1.1
	0.04	1.4
	0.06	1.7
	0.08	2.0
	0.10	2.3
	0.20	3.8
	0.40	6.9
	0.60	9.9
	0.80	13.0
	1.00	16.0
viscoso	2.00	31.0
	4.00	62.0
	10.00	153.0

ANALISIS DE DATOS DEL METODO A PRESION CONSTANTE.

El número de lecturas de tiempo obtenidas para un volumen dado a una presión determinada es seis, de éstas en la tabla 2 columna 2 sólo se reportan los valores promedios.

El tubo de vidrio empleado, tiene un diámetro  $d = (2.9 \pm 0.05)$  cm y para referencia del desplazamiento (l) de la gota el tubo se graduó en cm, utilizando estos datos para calcular el volumen de aire introducido [ $\pi (d/2)^2 l$ ].

La presión atmosférica involucrada en la ecuación (39) para calcular la velocidad de bombeo se tomó de  $P_a = (580 \pm 0.5)$  torr =  $(771.4 \pm 0.66)$  mbar y se obtienen los valores de la columna 4.

Tabla 2.

	Presión (P) (mbar)	Tiempo (t) (Seg)	Volumen(V) (cm <sup>3</sup> )	Velocidad de bombeo (S) (x10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> /seg)	(m <sup>3</sup> /Hr)
1.-	$(1 \pm 0.05) \times 10^{-3}$	97.14 ± 3.26	0.66 ± 0.026	5.24 ± 0.65	18.86 ± 2.34
2.-	$(2 \pm 0.05) \times 10^{-3}$	76.78 ± 1.27	0.66 ± 0.026	3.32 ± 0.27	11.93 ± 0.97
3.-	$(6 \pm 0.05) \times 10^{-3}$	49.34 ± 0.84	0.66 ± 0.026	1.72 ± 0.11	6.20 ± 0.40
4.-	$(1 \pm 0.05) \times 10^{-2}$	40.04 ± 0.39	0.66 ± 0.026	1.27 ± 0.13	4.60 ± 0.47
5.-	$(2.2 \pm 0.05) \times 10^{-2}$	25.02 ± 0.55	0.66 ± 0.026	0.92 ± 0.08	3.31 ± 0.29
6.-	$(4 \pm 0.05) \times 10^{-2}$	11.98 ± 0.25	0.66 ± 0.026	1.06 ± 0.08	3.82 ± 0.29
7.-	$(6 \pm 0.05) \times 10^{-2}$	7.00 ± 0.20	0.66 ± 0.026	1.23 ± 0.09	4.43 ± 0.32
8.-	$(1 \pm 0.05) \times 10^{-1}$	16.40 ± 0.17	2.64 ± 0.094	1.24 ± 0.12	4.46 ± 0.43
9.-	$(2 \pm 0.05) \times 10^{-1}$	6.88 ± 0.06	2.64 ± 0.094	1.48 ± 0.10	5.33 ± 0.36
10.-	$(4 \pm 0.05) \times 10^{-1}$	3.76 ± 0.11	2.64 ± 0.094	1.35 ± 0.10	4.86 ± 0.36
11.-	$(6 \pm 0.05) \times 10^{-1}$	2.29 ± 0.07	2.64 ± 0.094	1.48 ± 0.11	5.33 ± 0.40
12.-	$(1 \pm 0.05) \times 10^0$	1.33 ± 0.07	2.64 ± 0.094	1.53 ± 0.21	5.51 ± 0.76
13.-	$(2 \pm 0.05) \times 10^0$	1.66 ± 0.06	6.80 ± 0.231	1.53 ± 0.15	5.51 ± 0.54

La columna 3 de la tabla 3, representa la conductancia  $C$  total del acoplamiento del domo de prueba con la bomba, la que se compone de dos conductancias en serie ( $C_1$  y  $C_2$ ).  $C_1$  es de un diafragma con diámetro  $d_1=(0.88\pm 0.005)$ cm y espesor  $L_1=(0.82\pm 0.005)$ cm y  $C_2$  es la conductancia del adaptador con diámetro  $d_2=(1.28\pm 0.005)$ cm y longitud  $L_2=(3.04\pm 0.005)$ cm. Para calcular las conductancias  $C_1$  y  $C_2$  se usó la ecuación (32) corregida para cálculos con presiones dadas en mbar. La conductancia total  $C$ , se obtuvo de la ecuación (29) para un arreglo de dos conductancias en serie.

Tabla 3.

	$C_1$ $\left( \frac{\times 10^8 \text{ cm}^3}{\text{seg}} \right)$	$C_2$ $\left( \frac{\times 10^8 \text{ cm}^3}{\text{seg}} \right)$	$C$ $\left( \frac{\times 10^8 \text{ cm}^3}{\text{seg}} \right)$	$S'$ $\left( \frac{\times 10^8 \text{ cm}^3}{\text{seg}} \right)$	$S'$ $\left( \frac{\text{H}}{\text{Hr}} \right)$
1.-	0.18±.014	0.214±.042	0.097±0.04	0.073±.032	0.26±0.11
2.-	0.36±.019	0.429±.073	0.194±0.07	0.170±.069	0.61±0.21
3.-	1.06±.039	1.286±.197	0.59 ±0.17	0.56 ±.16	2.02±0.58
4.-	1.77±.140	2.14 ±.42	0.97 ±0.4	0.94 ±.39	3.38±1.40
5.-	3.90±.20	4.71 ±.79	2.14 ±0.71	---	3.31±0.29
6.-	7.10±.29	8.57 ±1.35	3.98 ±1.19	---	3.82±0.29
7.-	10.65±.39	12.86±1.97	5.82 ±1.69	---	4.43±0.32
8.-	17.74±1.40	21.43±4.18	9.70 ±4.04	---	4.46±0.43
9.-	35.49±1.91	42.85±7.28	19.41±6.62	---	5.33±0.36
10.-	70.98±2.93	85.71±13.50	38.82±11.79	---	4.86±0.36
11.-	106.48±3.93	128.0±19.71	58.23±16.98	---	5.33±0.40
12.-	177.46±13.99	214.3±41.78	97.06±40.40	---	5.51±0.78
13.-	354.91±19.11	428.5±72.84	194.1±66.24	---	5.51±0.54

Cuando la conductancia se hace pequeña comparada con la velocidad nominal  $S_p$ , la velocidad de bombeo se puede determinar con la ecuación (31); de esta forma se obtuvo la velocidad de bombeo ( $S'$ ) a presiones inferiores que  $2 \times 10^{-8}$  mbar. El valor de la presión final ( $P_f$ ) se tomó el que proporciona el fabricante que es  $P_f = 2.5 \times 10^{-8}$  mbar. La presión final no se pudo determinar experimentalmente por limitación de escala del medidor de presión empleado.

## APENDICE C

### ANALISIS DE DATOS DEL METODO A VOLUMEN CONSTANTE.

Se evacúa una cámara de volumen  $V = (12.87 \pm 0.079) \times 10^3 \text{ cm}^3$ . Los valores de presión obtenidos a intervalos de un minuto se muestran en la tabla 4.

Los datos de la tabla 4 se grafican en papel semi-log (gráfica 3) y de la curva ajustada a estos puntos, se obtienen los datos de presión y tiempo de la tabla 5 (columnas 1 y 2). La columna 3 ( $\Delta t$ ), es la diferencia de tiempo entre dos presiones consecutivas de la columna 1; y la columna 4 es la presión promedio de este intervalo de tiempo.

TABLA 4.

Tiempo ( $\pm 0.3 \times 10^{-2} \text{ min}$ )	Presión (mbar)
0	$(1.0 \pm .05) \times 10^0$
1	$(3.0 \pm .05) \times 10^0$
2	$(1.3 \pm .05) \times 10^{-1}$
3	$(3.9 \pm .05) \times 10^{-2}$
4	$(1.2 \pm .05) \times 10^{-2}$
5	$(5.6 \pm .05) \times 10^{-3}$
6	$(3.1 \pm .05) \times 10^{-3}$
7	$(2.2 \pm .05) \times 10^{-3}$
8	$(1.6 \pm .05) \times 10^{-3}$
9	$(1.3 \pm .05) \times 10^{-3}$
10	$(1.1 \pm .05) \times 10^{-3}$
11	$(1.0 \pm .05) \times 10^{-3}$



Para calcular la velocidad de bombeo S, se usa la ecuación 26, la que involucra el volumen de la cámara, dos presiones consecutivas y el intervalo de tiempo entre las presiones mencionadas.

La conductancia no se toma en cuenta porque la unión de la cámara con la bomba fue directa, no hubo reducción y la distancia de interconexión es corta.

TABLA 5.

PRESION(P)	TIEMPO(t)	$\Delta t$	PRES. PROM.	VEL. DE BOMB. (S)	
(mbar)	( $\pm 2$ seg)( $\pm 4$ seg)	(mbar)	(mbar)	( $\times 10^2 \text{cm}^3/\text{seg}$ )	( $\text{m}^3/\text{Hr}$ )
$(1.0 \pm 0.05) \times 10^5$	0	20	$(5.5 \pm 0.05) \times 10^3$	$1.482 \pm 0.305$	$5.33 \pm 1.098$
$(1.0 \pm 0.05) \times 10^4$	20	24	$(5.5 \pm 0.05) \times 10^4$	$1.235 \pm 0.213$	$4.44 \pm 0.767$
$(1.0 \pm 0.05) \times 10^3$	44	32	$(5.5 \pm 0.05) \times 10^6$	$0.626 \pm 0.121$	$3.33 \pm 0.436$
$(1.0 \pm 0.05) \times 10^2$	76	19	$(7.0 \pm 0.05) \times 10^{-1}$	$0.621 \pm 0.134$	$2.23 \pm 0.482$
$(4.0 \pm 0.05) \times 10^{-1}$	93	40	$(2.5 \pm 0.05) \times 10^{-1}$	$0.446 \pm 0.047$	$1.60 \pm 0.169$
$(1.0 \pm 0.05) \times 10^{-1}$	135	16	$(8.25 \pm 0.05) \times 10^{-2}$	$0.346 \pm 0.086$	$1.24 \pm 0.317$
$(6.5 \pm 0.05) \times 10^{-2}$	151	20	$(5.25 \pm 0.05) \times 10^{-2}$	$0.312 \pm 0.064$	$1.12 \pm 0.230$
$(4.0 \pm 0.05) \times 10^{-2}$	171	24	$(3.25 \pm 0.05) \times 10^{-2}$	$0.252 \pm 0.044$	$0.91 \pm 0.158$
$(2.5 \pm 0.05) \times 10^{-2}$	195	26	$(2.05 \pm 0.05) \times 10^{-2}$	$0.220 \pm 0.035$	$0.79 \pm 0.126$
$(1.6 \pm 0.05) \times 10^{-2}$	221	31	$(1.3 \pm 0.05) \times 10^{-2}$	$0.165 \pm 0.026$	$0.70 \pm 0.094$
$(1.0 \pm 0.05) \times 10^{-2}$	252	41	$(8.0 \pm 0.05) \times 10^{-3}$	$0.160 \pm 0.016$	$0.58 \pm 0.058$
$(6.0 \pm 0.05) \times 10^{-3}$	293	54	$(4.75 \pm 0.05) \times 10^{-3}$	$0.128 \pm 0.010$	$0.46 \pm 0.036$
$(3.5 \pm 0.05) \times 10^{-3}$	347	63	$(2.75 \pm 0.05) \times 10^{-3}$	$0.086 \pm 0.005$	$0.31 \pm 0.018$
$(2.0 \pm 0.05) \times 10^{-3}$	430	110	$(1.65 \pm 0.05) \times 10^{-3}$	$0.050 \pm 0.002$	$0.18 \pm 0.007$
$(1.3 \pm 0.05) \times 10^{-3}$	540	120	$(1.15 \pm 0.05) \times 10^{-3}$	$0.028 \pm 0.001$	$0.10 \pm 0.004$
$(1.0 \pm 0.05) \times 10^{-3}$	660				

## BIBLIOGRAFIA

- (1) J. KIKOIN, A. KIKOIN.  
FISICA MOLECULAR.  
ED. MIR 1971.
- (2) GERHARD LEWIN.  
FUNDAMENTOS DE LA CIENCIA Y TECNICA DEL VACIO.  
ED. AGUILAR. ESPAÑA 1972.
- (3) PEDRO EGEA GIL.  
OBTENCION Y APLICACIONES INDUSTRIALES DEL VACIO  
ED. GUSTAVO GILI S. A. BARCELONA 1973.
- (4) JOHN F. O'HANLON.  
A USER'S GUIDE TO VACUUM TECHNOLOGY.  
ED. JOHN WILEY 1980.
- (5) ALEXANDER ROTH.  
VACUUM TECHNOLOGY.  
ED. NETHERLANDS, NORTH HOLLAND 1978.
- (6) A. GUTHRIE AND R. K. WAKERLING.  
VACUUM EQUIPMENT AND TECHNIQUES.  
ED. MCGRAW-HILL 1949.
- (7) NOTAS IFUNAM 1974  
TECNICAS DE VACIO.
- (8) KARE W. R. JOHNSON.  
PROPIEDADES DE MATERIALES PARA SISTEMAS DE VACIO.  
SOCIEDAD MEXICANA DE CIENCIA DE SUPERFICIES Y DE VACIO A. C.  
1983. AMERICAN VACUUM SOCIETY.

- (9) N. G. WILSON Y L. C. BEAVIS.  
MANUAL DE DETECCION DE FUGAS DE VACIO.  
SOCIEDAD MEXICANA DE CIENCIA DE SUPERFICIES Y DE VACIO A. C.  
1984. AMERICAN VACUUM SOCIETY.
- (10) G. A. BOUTRY.  
FISICA APLICADA A LAS INDUSTRIAS DE VACIO Y DE ELECTRONICA.  
TOMO I.  
ED. MASSON ET C<sup>ie</sup>. PARIS 1982.
- (11) STANDARDS OF THE AMERICAN VACUUM SOCIETY.  
JANUARY, 1976.
- (12) G.F. WESTON.  
MATERIALS FOR ULTRAHIGH VACUUM.  
VACUUM PHYSICS DIVISION. MULLARD RESEARCH LABORATORIES.  
ENGLAND.  
VACUUM/VOLUME 25/NUMBER 11/12. NOV./1975.
- (13) AMERICAN VACUUM SOCIETY.  
RECOMENDED PROCEDURE FOR MEASURING PUMPING SPEEDS.  
JOURNAL VACUUM SCIENCE TECHNOLOGY. A 5 (4), JUL/AUG 1987.