

CURSO BÁSICO DE TECNOLOGIA DE VÁCUO

Prof. Evaldo José Corat

Prof. Edson Del Bosco

Prof. Carlos Salles Lambert

lambert@ifi.unicamp.br

INPE, São José dos Campos

Agosto de 2000



CURSO BÁSICO DE TECNOLOGIA DE VÁCUO

CAPÍTULO I

1º Introdução

O interesse por ciência e tecnologia de vácuo é bastante antigo. O experimento mais famoso que revela o grau de interesse de cientistas, que visualizaram a necessidade da ausência de gás, foi o experimento de Magdeburg, que levou esse nome por ter sido feito na cidade de Magdeburg em 1672. Conforme mostra a Fig. 1, esse experimento consistiu em separar duas meias esferas de metal (cobre) juntadas apenas pelo vácuo interno. Apesar da técnica de separação ser bastante primitiva, o conceito de vácuo visualizando suas aplicações já estavam bem evidentes.

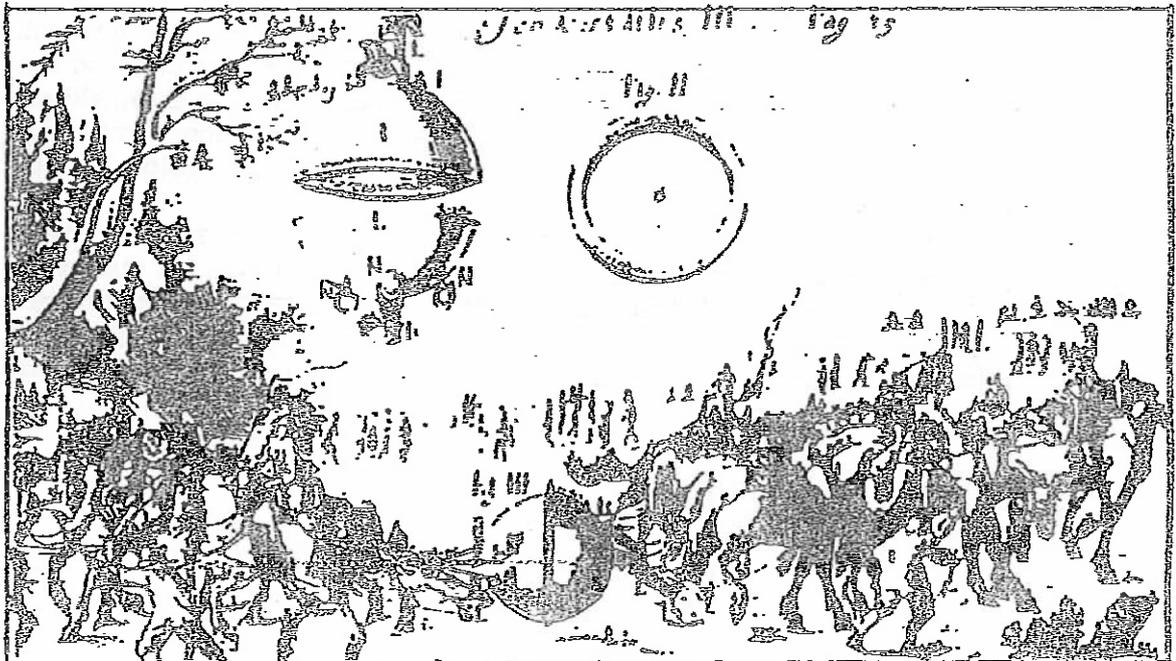


Figura 1. Experimento de Magdeburg

A palavra "VÁCUO" é derivada da palavra "VAZIO". Muito embora seja absolutamente impossível conseguir obter em uma câmara ou em um sistema qualquer o vazio, ou seja a ausência completa da matéria, em ciência e tecnologia de vácuo usa-se esta terminologia de forma cotidiana. A unidade de pressão é vastamente usada para medir a quantidade de matéria (gás) em um recipiente, que além de fornecer a densidade do gás, fornece também o grau de vácuo alcançado dentro desse recipiente.

Para começarmos a nos familiarizar com o vácuo, podemos citar como exemplo, que a pressão estimada no espaço interestelar é de cerca de 10^{-19} atmosferas. Por outro lado, a pressão no interior da Terra é de cerca de 3×10^8 atmosferas.

Deve-se lembrar que a máxima pressão que já foi possível alcançar em

laboratório foi de cerca de 500.000 atmosferas, usando-se prensas especiais. Esse nível de pressão foi possível de ser alcançada em câmaras muito pequenas, usadas na sintetização de diamante a partir do grafite.

E qual seria a menor pressão possível de se alcançar? E esta é a questão da qual começa a nos interessar, pois estamos começando a falar de vácuo, ou seja a retirada da matéria(gás) de um recipiente situado em um ambiente onde a pressão é uma atmosfera, isto é, na superfície da Terra. A retirada de gases de uma câmara depende basicamente do tipo da bomba de vácuo utilizada e das condições de limpeza em que se encontra este recipiente. Esse assunto será bastante estudado nos próximos capítulos. Entretanto, podemos dizer que uma bomba iônica associada a sistemas criogênicos, isto é, em baixas temperaturas, é possível alcançar um vácuo de até cerca de 10^{-15} atmosferas.

Desta forma pode-se dizer, que em termos da tecnologia atual, a pressão obtida artificialmente varia de cerca de 20 ordens de grandeza. Diante deste intervalo grande de variação, é de se esperar que são necessários vários tipos de bombas de vácuo e/ou compressores, bem como, vários tipos de medidores de vácuo, destinados a cada tipo de aplicação em laboratório ou em sistemas industriais.

Terminologicamente, define-se como vácuo a situação em que um sistema tem pressão abaixo da pressão atmosférica, que corresponde, ao nível do mar, a 760 Torr. Ou melhor, ao nível do mar, uma atmosfera corresponde à densidade de moléculas do ar de $2,69 \times 10^{19}$ moléculas por centímetros cúbicos. Portanto, um recipiente que se encontra com uma densidade menor que esse valor, diz-se que este está em vácuo.

A classe científica é unânime em dizer, que o progresso científico e tecnológico alcançou o estágio atual porque foi possível simular, na superfície da Terra e dentro de câmaras especiais, as condições ambientais do espaço até pelo menos centenas de quilômetros de altitude. Para ilustrar, a Fig.2 mostra a dependência da pressão, ou melhor do vácuo, como função da altitude a partir da superfície da Terra.

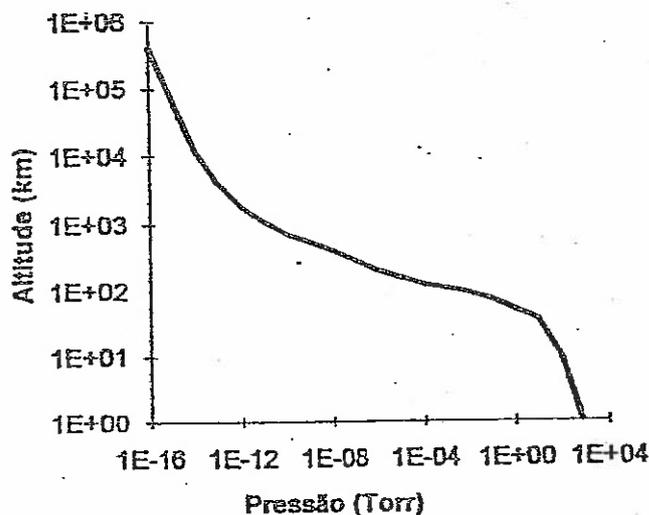


Figura 2. Dependência da pressão com a altitude a partir da superfície da Terra..

Nota-se, da Fig.2, que até cerca de 10 Km, a variação da pressão é pequena, pois a esta altitude a pressão é cerca de 150 Torr. Por outro lado, em cerca de 100 Km de altitude a pressão é cerca de 10^{-5} Torr. Este valor de pressão corresponde a um vácuo que está quase no limite da capacidade de uma bomba difusora, por exemplo. Enquanto que, para altitudes acima de 1000 Km, torna-se muito mais difícil simular o mesmo ambiente, em termos de densidade de partículas, mesmo utilizando o mais avançado sistema de vácuo, pois a pressão a esta altitude é de cerca de 10^{-13} Torr.

Na Superfície da Terra, o ar é composto principalmente de oxigênio e nitrogênio, por isso, a maioria dos sistemas de bombeamento e, também medidores de pressão, mesmo para ultra-alto-vácuo, são especificados para trabalhar com esses tipos de gases, a menos que seja especificado um tipo bem específico de aplicação.

Outros gases também fazem parte da composição do ar, mas em quantidade muito menor que o nitrogênio e o oxigênio, conforme mostra a tabela 1.

Tabela 1: Composição do ar ao nível do mar, a 25°C.

GÁS	PERCENTUAL (%)	PRESSÃO PARCIAL (TORR)
Nitrogênio(N ₂)	78,08	$5,95 \times 10^2$
Oxigênio(O ₂)	20,95	$1,59 \times 10^2$
Água(H ₂ O)	1,57	11,9
Argônio(Ar)	0,93	7,05
Dióxido de Carbono(CO ₂)	0,033	$2,5 \times 10^{-1}$
Neônio(Ne)	$1,80 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-2}$
Hélio(He)	$5,24 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-3}$
Kriptônio(Kr)	$1,10 \times 10^{-4}$	$8,4 \times 10^{-4}$
Hidrogênio(H ₂)	$5,0 \times 10^{-5}$	$3,8 \times 10^{-4}$
Xenônio(Xe)	$8,7 \times 10^{-6}$	$6,6 \times 10^{-5}$
Metano(CH ₄)	$2,0 \times 10^{-4}$	$1,5 \times 10^{-3}$
Ozônio(O ₃)	$7,0 \times 10^{-5}$	$5,3 \times 10^{-5}$
Óxido de Nitrogênio(N ₂ O)	$5,0 \times 10^{-5}$	$3,8 \times 10^{-4}$

2 - UNIDADES

Estudos em ciência e tecnologia de vácuo, os parâmetros de medidas mais usados são: temperatura, volume, pressão, velocidade de bombeamento e fluxo. Abaixo, apresentamos as unidades mais comuns para medidas desses parâmetros e suas conversões.

2.1 - Temperatura

°C (graus centígrados, ou graus Celsius)

K (Graus Kelvin)

°R (Graus Remir)

°F (Graus Fahrenheit)

$$^{\circ}\text{C}/5 = ^{\circ}\text{R}/4 = (^{\circ}\text{F} - 32)/9$$

$$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273$$

Para $\text{K} = 0$ (chamamos de zero absoluto)

2.2 - Volume

metro cúbico (m^3), litro(L), centímetro cúbico (cm^3)

$$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L} = 1000.000 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ galão} = 3,79 \text{ L}$$

2.3 - Velocidade de Bombeamento

$$S = \text{L/s}, \text{ m}^3/\text{h}, \quad 1 \text{ L/s} = 3,6 \text{ m}^3/\text{h} = 2,12 \text{ ft}^3 = 1,59 \times 10^{-3} \text{ (gramas/s - ar a}$$

CNTP).

2.4 - Vazão

$$Q = \text{Torr. L/s} = 0,133 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} = 79 \text{ sccm (standard cubic centimeters per minute)}.$$

2.5 - Pressão -

Para medidas de pressão em regime de vácuo, existem várias unidades. No Brasil, assim como nos Estados Unidos, é muito comum usar a unidade Torr, entretanto, na Europa é mais comum usar o mBar. Por outro lado, atualmente, estabeleceu-se através do Instituto Internacional de Pesos e Medidas, sediado em Paris, um padrão mundial para essa unidade que é o Pascal (Pa).

Pressão é força por unidade área

1 atmosfera = $1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, que equivale à pressão exercida por uma coluna de mercúrio de 760mm de altura no nível do mar a temperatura de

0°C .

$$1 \text{ atmosfera} = 1,03 \text{ Kg/cm}^2.$$

$$1 \text{ Torr} = 1/760 \text{ atm}$$

$$= 133 \text{ Pa}$$

$$= 133 \text{ N/m}^2$$

$$= 1 \text{ mm de Hg (Mercúrio)}$$

$$= 1000 \text{ } \mu\text{m (micron)}$$

$$= 1,33 \times 10 \text{ Bar}$$

$$= 1,33 \text{ mBar.}$$

$$= 1,36 \times 10 \text{ Kg/cm}^2$$

$$= 1,33 \times 10 \text{ dyn/cm}^2$$

$$= 1,93 \times 10 \text{ psi}$$

$$= 3,94 \times 10 \text{ pol de Hg}$$

$$= 13,6 \text{ mm de H}_2\text{O}$$

3 - Limites de Vácuo Universalmente Usados

Como já tem sido citado anteriormente, quando a pressão em um sistema é inferior que a pressão atmosférica, ou seja, contém uma densidade de moléculas inferior a $2,69 \times 10^{19}$, dizemos que o sistema está sob vácuo. E como, o intervalo de pressão em regime de vácuo é muito grande, ou seja, alcança até cerca de 15

ordens de grandeza, estabelece-se um critério para caracterizar a qualidade do vácuo em um determinado sistema, como segue:

Vácuo grosseiro,	de 760 Torr a 1 Torr
Vácuo médio	de 1 a 10^{-2} Torr
Alto vácuo	de 10^{-2} a 10^{-6} Torr
Ultra alto vácuo	de 10^{-6} a 10^{-12} Torr

4 - Algumas Definições Importantes

4.1 - Vapor

É um gás próximo à sua temperatura de condensação

4.2 - Vaporização

É a entrada estimulada termicamente de moléculas para a fase de vapor

4.3 - Pressão de Vapor

É a pressão de um gás em equilíbrio dinâmico com a fase líquida ou sólida da mesma substância a uma dada temperatura. Por exemplo, a pressão de vapor da água a 25 °C é 11,9 Torr. Não é possível estabelecer uma lei, para todos os gases, que relaciona a pressão de vapor com a temperatura, no entanto, é possível obter esse comportamento para cada gás separadamente, como pode ser encontrado na ref. 2.

4.4 - Pressão parcial

É a pressão de um determinado gás em uma mistura de gases.

4.5 - Pressão Total

É a soma de todas as pressões parciais dos componentes gasosos em uma mistura

4.6 - Sorção

É o aprisionamento de moléculas de um gás por um sólido ou líquido. A sorção pode se dar por adsorção ou por absorção.

4.7 - Adsorção

É o aprisionamento de moléculas de um gás pela superfície de um sólido ou um líquido.

4.8 - Absorção

É o aprisionamento de moléculas de um gás pelo interior ou volume de um sólido ou líquido.

4.9 - Desorção

É o processo inverso do aprisionamento, ou seja, é o processo de remover as moléculas de um sólido ou líquido aprisionadas em superfícies ou volumes. É o mesmo que degaseificação. Degaseificação, de um sólido ou líquido, em geral mais utilizado para sólido, é muito importante em ultra alto vácuo, pois a esse nível de vácuo, as partículas ou moléculas que "escapam" da superfície ou do volume de um determinado material começam a interferir na qualidade do vácuo a ser

alcançado.

5 - Aplicações

Tecnologia de vácuo tem aplicações em praticamente todas as áreas do conhecimento, como foi dito anteriormente, a prosperidade foi alcançada graças à possibilidade de simular ambientes com baixíssimas pressões na superfície da Terra. Para esclarecer melhor e enumerar algumas áreas, apresentamos na tabela 2, uma relação dessas áreas com o vácuo necessário para cada aplicação.

Tabela 2 - Aplicações de Vácuo como função das áreas de pesquisas e desenvolvimento.

GRAU DE VÁCUO	ULTRA ALTO VÁCUO	ALTO VÁCUO	MÉDIO E BAIXO VÁCUO
APLICAÇÃO			
Fabricação de Lâmpadas		XXX	
Fabricação de Cinescópios		XXXXXXXX	
Deposição de Filmes Finos	XXXX	XXXXXXXX	
Simulação Espacial	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXX	
Pesquisas em Materiais	XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXX	XXXX
Fusão Nuclear	XXXXXX	XXXXX	
Sistemas de Plasmas		XXXXXX	
Embalagem a Vácuo			XXX
Física de Superfície	XXXXXXXXXXXX	XX	
Microeletrônica		XXXXXX	XXXXXX
Baixas Temperaturas	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXX	XX
Difratômetros de Elétrons	XXXXXX	XXXXX	
Microscópios Eletrônicos		XXXXX	
Geração de Feixes Moleculares	XX	XXXXX	
Espectrometria de Massa	XXX	XXXXX	
Geração de Feixes de Íons		XXXX	XXX
Aceleradores de Partículas	XXX	XX	

PRESSÃO EM TORR 10⁻¹³ 10⁻⁷ 10⁻³ 10³

6 . TEORIA CINÉTICA DO GÁS IDEAL

O conceito de gás ideal está estritamente ligado à ideia de independência entre as moléculas que o compõem. Este conceito está ligado às seguintes hipóteses básicas:

1. as moléculas podem ser consideradas como esferas de dimensões muito pequenas;
2. o volume ocupado por todas as moléculas é uma fração desprezível do volume ocupado pelo gás;

3. as moléculas não exercem forças entre si a não ser durante as colisões;
4. as moléculas andam em trajetórias retílineas e de uma maneira perfeitamente caótica (movimento browniano);
5. as moléculas efetuam colisões perfeitamente elásticas.

É importante lembrar que este comportamento é muito próximo da realidade quando se trata de pressões sub-atmosféricas. O hidrogênio, o oxigênio, o nitrogênio, o hélio, o argônio, e muitos outros gases reais se comportam como gases ideais, a pressões da ordem da atmosférica ou menores. A aproximação de gás ideal só não é válida em condições de alta pressão ou para gases particulares, em que a interação entre as moléculas não é desprezível. Portanto, dentro das necessidades deste curso vamos considerar apenas os gases como ideais.

6.1 - Equação de estado do gás ideal

Uma equação de estado de um gás é uma relação funcional entre as suas variáveis macroscópicas: temperatura, pressão e volume. Esta relação pode ser obtida de experimentos que relacionem estas quantidades. Para os gases ideais, uma experiência em que se mede P , V , T e m , a massa do gás, obtém-se os seguintes resultados:

- à temperatura constante, a pressão de um gás é inversamente proporcional ao seu volume específico (V/m). Esta é a chamada lei de Boyle;
- o produto da pressão pelo volume específico é diretamente proporcional à temperatura. Esta é a lei de Charles.

Estes dois resultados experimentais podem ser resumidos pela relação

$$P \frac{V}{m} = rT, \quad (1)$$

onde r é uma constante de proporcionalidade cujo valor depende do gás estudado. Comparando o valor de r para vários gases obtém-se que

$$r = \frac{R}{M}, \quad (2)$$

onde M é o peso molecular do gás e R é uma constante de proporcionalidade, que é a mesma para todos os gases e é a chamada constante universal dos gases ideais. Escrevendo a equação (1), considerando a equação (2), tem-se

$$P \frac{V}{m} = \frac{R}{M} T \Rightarrow PV = \frac{m}{M} RT \Rightarrow PV = \eta RT, \quad (3)$$

onde η é o número de moles do gás, dado por m/M .

O número de moles η também é dado pela razão entre o número total de moléculas N e o número de Avogrado N_0 ($\eta = N/N_0$). Também, a constante universal dos gases se relaciona com a constante de Boltzmann através do número de Avogrado ($R = N_0 k$), de forma que a equação (3) pode ser escrita como

$$PV = NkT \Rightarrow P = nkT, \quad (4)$$

onde n é a densidade do gás N/V .

O principal objetivo, e também o grande valor da teoria cinética dos gases é explicar esta relação entre as quantidades macroscópicas do gás com um modelo microscópico relativamente simples, como o descrito na introdução.

6.2 - Considerações adicionais sobre as unidades de medidas

É importante padronizar as unidades de medida das várias quantidades envolvidas na equação de estado. O sistema internacional de unidades é o mais indicado para esta padronização, uma vez que este é o padrão internacional. Neste sistema, a pressão é dada em Pascal, onde 1 Pa é igual a 1N/m^2 . A unidade de volume é o m^3 . A unidade de temperatura é o Kelvin (K). Neste sistema de unidades a constante de Boltzmann é aproximadamente $1,38 \times 10^{-23}$ Joules/K, e a constante universal dos gases é aproximadamente $8,314$ Joules/(mole.K).

É interessante notar que o produto kT tem unidade de energia, e portanto o produto PV também tem unidade de energia.

Apesar desta padronização do sistema de unidades, na verdade, existem outras unidades que são mais comumente usadas em tecnologia de vácuo, principalmente no que se refere à medida da pressão. A tabela 3 abaixo indica a relação existente

Tabela 3. Fatores de conversão entre as unidades de medida de pressão mais usadas

Pressão	bar	mbar	Pa	atm	Torr
1 bar	1	10^3	10^5	0,986823	$0,750062 \times 10^3$
1 mbar	10^{-3}	1	10^2	$0,986923 \times 10^{-3}$	0,750062
1 Pa (N/m^2)	10^{-5}	10^{-2}	1	$0,986923 \times 10^{-5}$	$0,750062 \times 10^{-2}$
1 atm = 760 torr	1,01325	$1,01325 \times 10^3$	$1,01325 \times 10^5$	1	$0,76 \times 10^3$
1 Torr	$1,333224 \times 10^{-3}$	1,333224	$1,333224 \times 10^2$	$1,315789 \times 10^{-3}$	1

entre as principais destas unidades.

Em particular, o Torr é a unidade de pressão mais comumente usada. O litro é a unidade de volume mais comumente usada. Nestas unidades, a constante de Boltzmann é igual a $1,03 \times 10^{-22}$ Torr.litro/K.

6.3 - Cálculo cinético da pressão

Considerando, então, o gás ideal, as moléculas sofrem colisões entre si, além de colidir com as paredes do recipiente que as contém. A pressão do gás, segundo este modelo, resulta da transferência da *quantidade de movimento* das moléculas para as paredes do recipiente. Ou seja, uma molécula de massa m_0 e velocidade v , na colisão com a parede, transfere para a mesma uma quantidade de movimento $m_0 v$. Portanto, a pressão está relacionada com a velocidade e conseqüentemente com a energia cinética das moléculas. Será verificado na próxima seção que a energia cinética das moléculas está diretamente relacionada com a temperatura do

gás. Intuitivamente, deste raciocínio, pode-se dizer que a pressão depende da densidade e da energia cinética das moléculas.

Para calcular a pressão, de forma simplificada, considere o gás em um recipiente cúbico de aresta l e lados da área A . Uma molécula, com vetor velocidade v , colidindo com o lado perpendicular à direção x , leva um tempo entre colisões sucessivas entre os dois lados que é dado por

$$\Delta t = \frac{2l}{v_x},$$

onde v_x é a componente de v na direção x .

Como uma molécula que colide perpendicularmente à parede volta com velocidade igual, no sentido contrário, a variação da quantidade de movimento em uma colisão é dada por

$$\Delta(m_0 v_x) = m_0 v_x - (-m_0 v_x) = 2m_0 v_x;$$

A força exercida por cada molécula, sobre a parede, segundo a segunda lei de Newton, que define a força como a taxa de variação da quantidade de movimento com o tempo, será dada por

$$F_x^o = \frac{\Delta(m_0 v_x)}{\Delta t} = \frac{2m_0 v_x}{2l/v_x} = \frac{m_0 v_x^2}{l}.$$

Como a pressão é a força exercida por unidade de área, a pressão devido a esta molécula será

$$P_x^o = \frac{F_x^o}{A} = \frac{m_0 v_x^2}{Al} = \frac{m_0 v_x^2}{V},$$

onde V é o volume do cubo. A pressão devida a N moléculas é, portanto,

$$P_x = \frac{N}{V} \overline{m_0 v_x^2} = n m_0 \overline{v_x^2},$$

onde $\overline{v_x^2}$ é a velocidade quadrática média na direção x , calculada entre todas as moléculas do gás. Como o gás é completamente isotrópico, o mesmo resultado seria encontrado para moléculas com componente de velocidade na direção y e z , e

ainda $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$. Como,

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2} = 3\overline{v_i^2}, \quad i = x, y, z,$$

a pressão é igual em todas as direções, e é dada por

$$P = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2} \quad (5)$$

6.4 - Cálculo cinético da energia das moléculas

A energia cinética média ($\overline{E_c} = \frac{1}{2} m_0 \overline{v^2}$) pode ser obtida igualando as equações

(4) e (5), tal que

$$nkT = \frac{1}{3}nm\overline{v^2}$$

ou seja, a energia cinética média é dada por

$$\overline{E_c} = \frac{3}{2}kT. \quad (6)$$

A equação (6) implica que a energia cinética média das moléculas independe do gás, dependendo apenas da temperatura. Este é um resultado particular do teorema de Virial, que diz que a energia média é igual a $\frac{1}{2}kT$ para cada grau de liberdade da molécula. Como em um gás ideal as moléculas têm apenas 3 graus de liberdade, obtém-se o resultado da equação (6).

6.5 - Distribuição de Maxwell para as velocidades

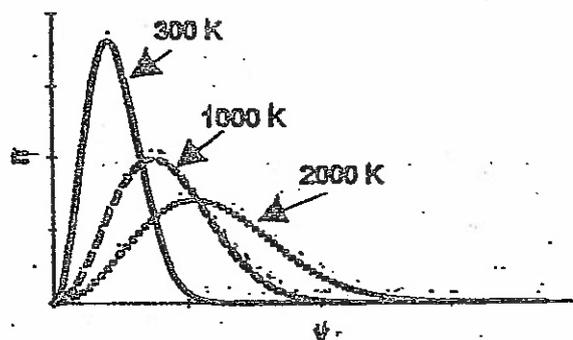


Figura 3. Distribuição de velocidades das moléculas para várias temperaturas.

Com base no que foi descrito nas seções anteriores, verifica-se que na teoria cinética dos gases a velocidade das moléculas é um fator de extrema importância. Uma questão essencial, portanto, é saber qual é a velocidade das moléculas em um gás. Naturalmente, não existe sentido em falar na velocidade de cada molécula, pois em um gás o número total de moléculas (N) é muito grande. Por isto, a velocidade das moléculas deve ser tratada de forma estatística.

A Figura 3 mostra como se distribui a velocidade das moléculas de um gás para 3 diferentes temperaturas, em um gráfico da densidade de moléculas contra a velocidade. O que se observa é que a distribuição de velocidades tem um máximo, que se desloca para velocidades maiores com o aumento de temperatura, acompanhado de um alargamento da distribuição. Naturalmente, como o número de moléculas do gás é o mesmo para todas as temperaturas, diminui a densidade no máximo da distribuição.

Foi Maxwell quem pela primeira vez, em 1859, deduziu a distribuição estatística das velocidades das moléculas de um gás. Esta é chamada de distribuição de Maxwell das velocidades, e o nome da curva é uma maxwelliana. Esta distribuição, é dada por

$$F(v)dv = \frac{4n}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m_0}{2kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-m_0 v^2 / 2kT} dv, \quad (7)$$

onde $F(v)dv$ é o número médio de moléculas por unidade de volume com velocidade (em módulo) no intervalo entre v e $v+dv$. A distribuição dos módulos da velocidade é obtida a partir da distribuição da velocidade vetorial

$$f(\vec{v})d^3\vec{v} = n \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-m_0 v^2 / 2kT} d^3\vec{v},$$

onde $d^3\vec{v} = dv_x dv_y dv_z$, é o chamado elemento de volume no espaço das velocidades. Sendo que

$$F(v)dv = 4\pi v^2 f(\vec{v})dv. \quad (8)$$

Se quisermos saber, por exemplo, qual é o número de moléculas do gás por unidade de volume, com velocidades compreendidas entre v_1 e v_2 , basta integrar a função distribuição de Maxwell $F(v)$ entre estes dois limites, tal que

$$n_{12} = \int_{v_1}^{v_2} F(v)dv.$$

A área total em baixo da curva de distribuição de Maxwell é igual à densidade do gás

$$n = \int_0^{\infty} F(v)dv. \quad (9)$$

O ponto de máximo da função de distribuição de Maxwell define o valor mais provável de velocidade

$$v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} \quad (10)$$

Quando se tem uma função distribuição estatística, como é o caso da distribuição de Maxwell, o valor médio de uma dada observável é dado por

$$\bar{g} = \frac{\int_0^{\infty} F(v) g dv}{\int_0^{\infty} F(v) dv} = \frac{\int_0^{\infty} F(v) g dv}{n}$$

Com isto, pode-se calcular a velocidade média

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}, \quad (11)$$

e a velocidade quadrática média

$$\overline{v^2} = \frac{3kT}{m_0} \quad (12)$$

É interessante notar, que se o valor da velocidade quadrática média, dado pela equação (12), for substituído na expressão cinética para a pressão, a equação (5), obtém-se a equação de estado do gás ideal, dada pela equação (4).

8.6 - Densidade de Impactos moleculares

As paredes de um recipiente que contém um gás estão sujeitas ao bombardeamento constante das moléculas do gás. Já foi obtida a expressão para a pressão, baseada nestes impactos. No entanto, é interessante obter com que frequência estas moléculas incidem sobre a parede. Será chamado de *densidade de impactos moleculares*, ν , o número de colisões com uma determinada parede, por unidade de área e por unidade de tempo, e está representado na Fig. 4.

Para deduzir uma expressão para ν , considere a colisão de uma molécula com

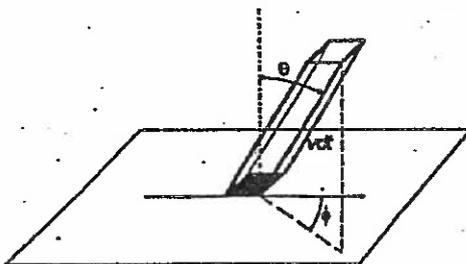


Figura 4. Desenho auxiliar no cálculo da densidade de impactos moleculares

o elemento de área dA , conforme o desenho da Figura 4. Se esta molécula incide segundo uma direção definida pelos ângulos θ e ϕ , e com velocidade v , serão definidas como colisão $\theta - \phi - v$, todas as colisões com o elemento de área dA cujos θ , ϕ e v estejam, respectivamente, nos intervalos compreendidos entre θ e $\theta + d\theta$, ϕ e $\phi + d\phi$, e v e $v + dv$.

O número de colisões $\theta - \phi - v$ com dA , no intervalo de tempo dt , é igual ao número de moléculas contidas em um prisma de base dA , e cujos lados sejam paralelos à direção $\theta - \phi$ e tenham comprimento $v dt$. O número de moléculas dentro deste prisma equivale às moléculas com velocidade, em módulo, entre v e $v + dv$, e com direção $\theta - \phi$. Este número é expresso matematicamente por

$$(dA v dt \cos \theta) f(\vec{v}) d^3 \vec{v}$$

Dividindo por dA e dt , e integrando sobre as velocidades, teremos o número total de moléculas incidentes por unidade de área e por unidade de tempo

$$\nu = \int v \cos \theta f(\vec{v}) d^3 \vec{v}.$$

Esta integral deve ser resolvida em coordenadas esféricas, onde o elemento de volume no espaço de velocidades é dado por $d^3v = v^2 \sin \theta d\theta d\phi dv$. Também, deve-se recordar a equação (8), que relaciona a distribuição de velocidade, $f(v)$, com a distribuição do módulo da velocidade, $F(v)$, de tal forma que a densidade de impactos moleculares é dada por

$$v = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty F(v) v dv \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin \theta \cos \theta d\theta d\phi$$

Resolvendo a integral, e considerando que $\int_0^\infty F(v) v dv = n\bar{v}$, obtém-se que

$$v = \frac{1}{4} n\bar{v} \quad (13)$$

Substituindo n a partir da equação de estado e a velocidade média como obtida na equação (11), obtém-se que

$$v = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{P}{\sqrt{kT m_0}}$$

se ainda lembramos que $m_0 = M/N_0$, e substituindo o valor da constante de Boltzmann em torr.litro/K e de N_0 , obtém-se

$$v = \frac{3,5 \times 10^{22} P}{\sqrt{MT}} \quad (14)$$

onde o resultado é dado em número de colisões por centímetro quadrado e por segundo, se usarmos a pressão em torr, o peso molecular em gramas e a temperatura em kelvin.

6.7 - Caminho livre médio

Durante o movimento, as moléculas colidem entre si. A distância média percorrida por uma molécula entre colisões é chamada de caminho livre médio.

Para deduzir uma expressão para o caminho livre médio, suponhamos uma molécula de diâmetro d e que tenha uma velocidade v . Ela percorre uma distância $v \delta t$ no intervalo de tempo δt : imagine um círculo de diâmetro $2d$, em torno da molécula, e perpendicular à direção de movimento. O volume varrido por este círculo, no intervalo de tempo δt , então, dado por

$$\delta V = \pi d^2 v \delta t$$

A condição para que haja uma colisão com outra molécula é de que esta molécula encontre uma outra dentro deste volume. Se este é o caso a densidade é dada por uma molécula dentro deste volume, ou seja

$$n = \frac{1}{\pi d^2 v \delta t}$$

Definindo o caminho livre médio como a distância percorrida $\lambda = v\bar{\alpha}$, obtém-se

$$\lambda = \frac{1}{\pi d^2 n}$$

Se n for substituído a partir da equação de estado, então

$$\lambda = \frac{kT}{\pi d^2 P} \quad (14)$$

Considerando que não apenas a molécula que gera o volume δV , mas também as outras estão em movimento, então a expressão para o caminho livre médio será dada por

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 P} \quad (15)$$

Esta última expressão é que deve ser usada para estimar o caminho livre médio.

7- Referências:

- 1- Vacuum Manual, ed. por L. Holland, W. Steckelmacher e J. Yarwood, E. & F. N. Spon, London 1974.
- 2- A User's Guide to Vacuum Technology, John F. O'Hanlon, John Willey & Sons New York, 1980.

CONCEITOS DE ESCOAMENTO E BOMBEAMENTO DE GASES

1. INTRODUÇÃO

Esta apostila aborda alguns conceitos de tecnologia de vácuo de importância fundamental, tanto para o entendimento das características de componentes e equipamentos descritos em catálogos e manuais, como para o dimensionamento de sistemas de vácuo. Os conceitos aqui apresentados, embora sejam tratados de maneira simplificada, sem complicações matemáticas, são suficientes para se avaliar ou mesmo dimensionar corretamente um sistema simples de vácuo. Uma formulação mais completa, necessária para a análise de sistemas de vácuo complexos, pode ser encontrada nas referências citadas no fim da apostila. A introdução de exemplos, juntamente com o desenvolvimento dos conceitos, tem como objetivo facilitar o entendimento dos mesmos, e, também, de tornar o conteúdo da apostila bastante prático.

Sistema de unidades

Sempre que possível será utilizado o sistema internacional de unidades, SI ou MKS, que é baseado nas grandezas: massa \Rightarrow *Kilograma*, comprimento \Rightarrow *metro*, e tempo \Rightarrow *segundo*, para definir as outras unidades. Por exemplo, a grandeza *velocidade* que é definida por distância percorrida por unidade de tempo é expressa no sistema SI por *metros/segundo* (m/s). A maioria das unidades das grandezas físicas recebem nomes especiais que geralmente homenageiam cientistas importantes. Por exemplo, a grandeza física *força* (massa x aceleração), tem por unidade (Kg m . l. s²) e é denominada *Newton* (N), em homenagem ao cientista inglês Isaac Newton. Entretanto, existem algumas unidades que são consagradas pelo uso e continuam sendo utilizadas mesmo não pertencendo ao sistema SI. Como exemplo típico em tecnologia do vácuo, tem-se a unidade de *pressão* (força por unidade de área), que no sistema SI tem o nome de *Pascal* (Pa), mas que tem como uso consagrado a unidade Torr, em homenagem ao físico italiano Torricelli. Outra unidade de pressão que aparece comumente na literatura de tecnologia de vácuo é o *Barque* é derivada no sistema de unidades CGS (*centímetro, grama, segundo*). A relação entre as unidades de pressão citadas é dada por:

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ Torr} = 760 \text{ mmHg} = 1,01 \times 10^5 \text{ Pa} = 1,01 \text{ Bar}$$

Com estas relações, pode-se converter um valor de pressão dado em uma certa unidade para outro sistema de unidades que nos seja mais conveniente ou mais necessário para um determinado cálculo.

-----//-----

Exemplo 1.

Um determinado fabricante de bombas de vácuo diz que com seu equipamento é possível chegar a uma pressão final de 3×10^{-5} Pa. Então, qual seria esta pressão num sistema de unidades que voce esteja mais acostumado, por exemplo em Torr?

É só fazer uma regra de três:

$$1,01 \times 10^5 \text{ Pa} \Rightarrow 760 \text{ Torr}$$

$$3,5 \times 10^{-5} \text{ Pa} \Rightarrow X \text{ Torr}$$

$$\text{Então, } X = (3,5 \times 10^{-5} \times 760) / 1,01 \times 10^5 = 2,6 \times 10^{-7} \text{ Torr}$$

-----//-----

2. CONCEITO DE VÁCUO

Dá-se o nome de *vácuo* ao meio onde a pressão do gás é menor que a pressão atmosférica, ou seja, quando o número de moléculas por cada centímetro cúbico contido neste meio for menor que $2,5 \times 10^{19}$, que é o número de moléculas por centímetro cúbico existente à pressão atmosférica e à temperatura ambiente.

Regiões de vácuo

Em tecnologia de vácuo costuma-se dividir o nível de vácuo em quatro regiões: *baixo vácuo*, *médio vácuo*, *alto vácuo* e *ultra alto vácuo*. A tabela 1 mostra os limites de pressão para as quatro regiões de vácuo. Evidentemente, que os valores de pressão que definem os limites das quatro regiões de vácuo não são rigorosos.

Tabela 1. Regiões do vácuo

Baixo vácuo	700 - 1 Torr
Médio vácuo	$1 - 10^{-2}$ Torr
Alto vácuo	$10^{-2} - 10^{-6}$ Torr
Ultra alto vácuo	$< 10^{-6}$ Torr

Densidade e livre caminho médio

Dois conceitos fundamentais em tecnologia de vácuo são os de densidade de partículas e o livre caminho médio.

- *Densidade de partículas* é o número médio de partículas por unidade de volume.
Unidades: partículas/m³ \Rightarrow 1/m³ \Rightarrow m⁻³, ou cm⁻³.

→ *Livre caminho médio* é a distância média que uma partícula percorre entre duas colisões sucessivas.

A tabela 2 mostra os valores da densidade de moléculas e do livre caminho médio em função da pressão, para o ar a 25°C.

Tabela 2. Densidade de moléculas e livre caminho médio, para o ar a 25°C

P (Torr)	n (molec./cm ³)	λ (cm)
760	$2,26 \times 10^{19}$	$6,7 \times 10^{-6}$
1	$3,25 \times 10^{16}$	$5,1 \times 10^{-3}$
10^{-3}	$3,25 \times 10^{13}$	5,1
10^{-6}	$3,25 \times 10^{10}$	$5,1 \times 10^3$
10^{-9}	$3,25 \times 10^7$	$5,1 \times 10^6$
10^{-12}	$3,25 \times 10^4$	$5,1 \times 10^9$
10^{-15}	$3,25 \times 10^1$	$5,1 \times 10^{12}$

Basicamente, nas regiões de baixo e médio vácuo o número de moléculas de gás no interior do volume, definido por um recipiente evacuado, é muito maior que o número de moléculas aderidas à superfície interna do recipiente. Assim, nestas regiões, as bombas de vácuo tem por função remover as moléculas na fase gasosa. Já, nas regiões de alto e ultra alto vácuo o número de moléculas aderidas à superfície é maior que o número de moléculas no interior do volume. Portanto, as bombas de vácuo nestas regiões devem retirar do sistema as partículas que deixam as superfícies internas. Por esta razão, que quando deseja-se baixar mais rapidamente a pressão de um recipiente utiliza-se a técnica de aquecer externamente as paredes do mesmo. Desta forma, as partículas (moléculas) ganham energia e se "soltam" das paredes e são bombeadas para fora do recipiente.

3. TIPOS DE FLUXO

Num sistema de vácuo em operação os gases estão sempre em movimento das regiões de maior para as regiões de menor pressão. Este movimento direcionado é denominado *fluxo*. Em tecnologia de vácuo considera-se, basicamente, quatro categorias de fluxos: *turbulento*, *laminar*, *intermediário* e *molecular*. Na prática os cálculos de dimensionamento de um sistema de vácuo podem ser feitos apenas utilizando os regimes laminar e molecular, já que nos outros regimes existe um acentuado grau de complicação matemática e não há ganho significativo nos valores obtidos. Este será o procedimento adotado nesta apostila.

Quando um recipiente a ser evacuado é levado da pressão atmosférica até um valor baixo de pressão (alto vácuo), os gases dentro recipiente passam pelos quatro tipos de fluxos, na ordem:

turbulento ⇒ laminar ⇒ intermediário ⇒ molecular.

Regime turbulento

Neste regime, o livre caminho médio das partículas é muito pequeno (muito menor que as dimensões dos diâmetros das tubulações). Isto ocorre porque existe uma grande quantidade de moléculas de gás (alta pressão), predominando, assim, as colisões entre as moléculas. Desta forma, o fluxo de gases é governado pelo efeito de *viscosidade*. A velocidade média das partículas é grande e o fluxo é bastante irregular, aparecendo redemoinhos ao longo das tubulações. Por esta razão o fluxo é denominado turbulento.

Como este tipo de fluxo aparece nas instalações de vácuo somente nos momentos iniciais do bombeamento, ele é normalmente desprezado nos cálculos de um sistema.

Regime laminar ou viscoso

A medida que a pressão do gás começa a diminuir, também diminui a velocidade das partículas e aumenta o livre caminho médio, embora continue ainda sendo menor que as dimensões da tubulação. Abaixo de uma certa velocidade o fluxo começa a ficar mais regular, embora ainda dominado pelo efeito da *viscosidade*. As *linhas de fluxo* tornam-se retas paralelas ou ligeiramente curvadas nas irregularidades da tubulação de vácuo, daí o nome de fluxo laminar. O perfil radial de velocidade das partículas na tubulação é parabólico, possuindo velocidade máxima no centro ($r = 0$) e velocidade quase nula na parede dos tubos. Este tipo de fluxo é também conhecido por *fluxo viscoso*.

Regime intermediário

A medida que a pressão do gás dentro do recipiente diminui o livre caminho médio fica comparado com as dimensões (diâmetro) da tubulação. O número médio de colisões entre as partículas é comparado com o número médio de colisões com as paredes do recipiente. Assim o fluxo deixa de ser totalmente viscoso (efeito de conjunto) e começa a ter efeito individual das moléculas. Devido ao caráter misto de efeito viscoso e molecular, a formulação matemática para o cálculo dos parâmetros de fluxo são bastante complexos. Aliado ao fato deste regime ser transitório, ou seja, de curta duração, ele é normalmente desprezado no cálculos de um sistema de vácuo.

Regime molecular

Com a diminuição da pressão, o livre caminho médio das partículas torna-se muito maior que as dimensões típicas da tubulação. As colisões das moléculas com as paredes predominam, e o efeito de viscosidade (efeito coletivo) deixa de existir, tomando-se importante o movimento individual das moléculas, daí o nome de regime *molecular*.

Número de Reynold

Experimentalmente, verifica-se que a distinção entre o regime turbulento e o regime viscoso pode ser feito através do *número de Reynolds*. O número de Reynolds é uma grandeza sem dimensão, ou seja, sem unidades que é definido por:

$$Re = \rho v D / \eta \quad (1)$$

onde $\rho \Rightarrow$ densidade de massa do gás (g / cm^3)

$D \Rightarrow$ diâmetro do tubo (cm)

$v \Rightarrow$ velocidade média de escoamento (cm / s)

$\eta \Rightarrow$ coeficiente de viscosidade do gás (poise)

Verifica-se que:

$Re > 2100 \Rightarrow$ fluxo turbulento

$Re < 1000 \Rightarrow$ fluxo viscoso.

O número de Reynolds pode ser mais útil quando escrito em termos do parâmetro *fluxo de gás*, $Q = PS$ (ver seção 4). Pode-se mostrar que o número de Reynolds fica:

$$Re = (4M / \pi R_0 T \eta) / (Q/D) \quad (2)$$

onde $M \Rightarrow$ massa molecular do gás (g)

$R_0 \Rightarrow$ constante universal dos gases:

($R_0 = 62,364 \text{ Torr.lit}^\circ\text{K} .\text{mole}$)

$T \Rightarrow$ temperatura ($^\circ\text{Kelvin}$)

$\eta \Rightarrow$ coeficiente de viscosidade do gás (poise)

$D \Rightarrow$ diâmetro do tubo (cm)

Substituindo os valores numéricos para o caso do ar ($M = 28,98$ e $\eta = 1,829 \times 10^{-4}$ poise) e para a temperatura ambiente ($T = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ }^\circ\text{K}$) tem-se:

$$Re = 11 (Q / D) \quad (3)$$

$Q \Rightarrow$ Torr. l / s

$D \Rightarrow$ cm

Usando as condições do número de Reynolds que definem os regimes turbulento e viscoso têm-se:

$Q > 200D \Rightarrow$ fluxo turbulento

$Q < 100D \Rightarrow$ fluxo viscoso

Número de Knudsen

A diferenciação dos fluxos viscoso, intermediário e molecular é feita utilizando-se o número de Knudsen, que é definido por:

$$N_k = \lambda / D \quad (4)$$

onde $\lambda \Rightarrow$ livre caminho médio (cm)
 $D \Rightarrow$ diâmetro do tubo (cm)

Verifica-se que:

$$1/N_k > 110 \Rightarrow \text{fluxo viscoso}$$

$$1 < 1/N_k < 110 \Rightarrow \text{fluxo intermediário}$$

$$1/N_k < 1 \Rightarrow \text{fluxo molecular}$$

Utilizando a expressão $\lambda P = 5 \times 10^{-3}$ (cm Torr) para o ar à temperatura ambiente têm-se:

$$DP > 0,5 \text{ cm Torr} \Rightarrow \text{fluxo viscoso}$$

$$0,005 < DP < 0,5 \Rightarrow \text{fluxo intermediário}$$

$$DP < 0,005 \text{ cm Torr} \Rightarrow \text{fluxo molecular}$$

Como exemplo de aplicação do número de Knudsen, vamos determinar qual o tipo de fluxo para os seguintes casos:

-----//-----

Exemplo 2.

a) Tubo de 2cm de diâmetro com gás à pressão de 10Torr.

Tem-se: $DP = 2 \times 10 = 20 \text{ cm Torr}$, então o fluxo é claramente viscoso.

b) Tubo de 0,015m de diâmetro com gás à pressão de 2×10^{-3} Torr.

Tem-se: $0,015 \text{ m} = 1,5 \text{ cm}$

Então $DP = 1,5 \times 2 \times 10^{-3} = 3,0 \times 10^{-3} = 0,003 \text{ cm Torr}$.

$0,005 < 0,03 < 0,5$ então o fluxo é intermediário.

c) Tubo de 2,0 cm de diâmetro com gás à pressão de 1×10^{-5} Pa.

Tem-se: $1,01 \times 10^5 \text{ Pa} \Rightarrow 760 \text{ Torr}$

$$1 \times 10^{-5} \text{ Pa} \Rightarrow X$$

$$X = 7,5 \times 10^{-8} \text{ Torr}$$

$$\text{Então: } DP = 2,0 \times 7,5 \times 10^{-8} = 1,5 \times 10^{-7} \text{ cm.Torr} \Rightarrow \text{fluxo molecular}$$

-----//-----

4. DEFINIÇÕES IMPORTANTES

Velocidade de bombeamento: S_b

As bombas de vácuo são usadas para remover gases de um recipiente. A taxa com a qual os gases são removidos é medida pela velocidade de bombeamento, S_b . Desta forma, a velocidade de bombeamento é definida como o volume de gás por unidade de tempo que é removido do recipiente por uma bomba de vácuo. As unidades usuais de velocidade de bombeamento são: litros/s, m^3/h , cm^3/s e etc.

$$S = \Delta V / \Delta t \quad (4)$$

Fluxo de gás: Q

O fluxo de gás é definido como sendo o produto da velocidade de bombeamento e da pressão do gás na entrada "boca" da bomba de vácuo.

$$Q = PS_b \quad (5)$$

As unidades usuais de Q são: Torr Litros / s, $\text{Pa m}^3 / \text{s}$, etc

Para um sistema isotérmico, ou seja, quando a temperatura é constante ao longo de todo o sistema de vácuo, e considerando que não haja vazamentos de gases, pode-se mostrar que o fluxo de gases, Q , é constante ao longo de todo o sistema, ou seja, não acumulo de gases em um ponto qualquer da tubulação. Assim, o fluxo de gás através de uma seção qualquer (Figura 1) de uma tubulação é dado por:

$$Q = PS \quad (6)$$

onde P é a pressão na seção considerada e S é o volume de gás que passa por unidade de tempo (velocidade) pela seção considerada.

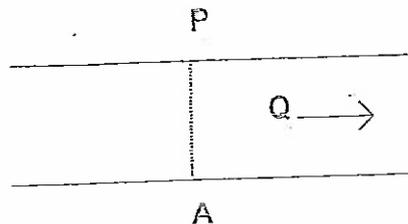


Figura 1

Condutância e impedância

Como já foi mencionado, o escoamento de gases ao longo de uma tubulação é devido a uma diferença de pressão entre duas seções da tubulação. Geralmente, esta diferença de pressão é produzida por uma bomba de vácuo. Portanto, a pressão ao longo de uma tubulação não é constante, ela é sempre menor perto da boca de uma bomba de vácuo e vai aumentando conforme se afasta da mesma. Sendo $Q=PS$ uma grandeza constante, isto implica que a velocidade de bombeamento em cada seção da tubulação não é constante, mas varia de tal modo que o produto PS seja constante. Portanto, S é maior na extremidade mais próxima da bomba de vácuo e vai diminuindo conforme se afasta da mesma.

A variação da pressão ao longo de uma tubulação é devido a uma certa resistência (impedância) que a própria parede e geometria da tubulação oferece ao escoamento dos gases. Por analogia com a teoria de circuitos elétricos, define-se a *impedância*, Z , de uma parte da tubulação entre duas seções A e B (figura 2), como sendo:

$$Z_{AB} = (P_A - P_B) / Q \quad (7)$$

A *condutância*, C , entre as mesmas seções, A e B é dada pelo inverso da impedância. Desta forma tem-se:

$$C_{AB} = 1 / Z_{AB} = Q / (P_A - P_B) \quad (8)$$

As unidades de condutância são: litros/s, m^3/h , etc. Portanto, condutância e velocidade de bombeamento possuem a mesma unidade. Mas são conceitos distintos. A velocidade de bombeamento se refere a um ponto (seção) de uma tubulação, enquanto que a condutância se refere à parte de uma tubulação entre dois pontos ou duas seções.

Condutâncias em série

Considere dois tubos ligados em série, conforme a figura 2. Como vimos o fluxo de gás, Q , deve ser constante ao longo da tubulação, então:

$$Q = C_{AB} (P_A - P_B) = C_{BC} (P_B - P_C)$$

Portanto,

$$P_A - P_B = Q / C_{AB}$$

$$P_B - P_C = Q / C_{BC}$$

Somando esta duas últimas equações tem-se:

$$P_A - P_C = Q / C_{AB} + Q / C_{BC}$$

Então:

$$1/C_{AB} + 1/C_{BC} = (P_A - P_C)/Q = 1/C_{AC}$$

Portanto, para dois tubos em série têm-se:

$$1/C_{AB} + 1/C_{BC} = 1/C_{AC} \quad (9)$$

$$Z_{AB} + Z_{BC} = Z_{AC} \quad (10)$$

As impedâncias em série se somam e os inversos das condutâncias em série se somam.

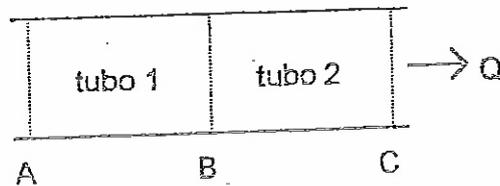


Figura 2

Condutâncias em paralelo

Considere dois tubos ligados em paralelo conforme a figura 3. Tem-se que o fluxo de gás total é da do por:

$$Q = Q_1 + Q_2$$

Então,

$$Q = (P_A - P_B) C_1 + (P_A - P_B) C_2$$

$$Q / (P_A - P_B) = C_1 + C_2$$

Portanto, para dois tubos em paralelo têm-se:

$$C_1 + C_2 = C_{AB} \quad (11)$$

$$1/Z_{AB} = 1/Z_1 + 1/Z_2 \quad (12)$$

As condutâncias em paralelo se somam e os inversos das impedâncias em paralelo se somam.

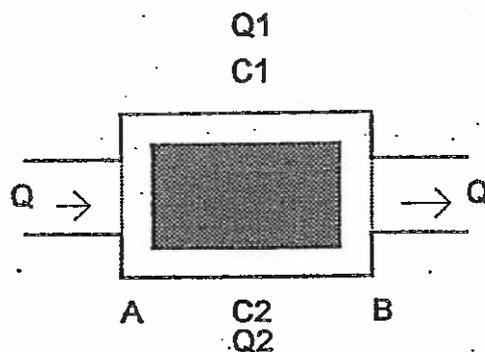


Figura 3

Velocidade de bombeamento ao longo da tubulação

Como vimos anteriormente a velocidade de escoamento dos gases varia ao longo da tubulação de vácuo. Considere o escoamento de gases da tubulação mostrada na figura 4.

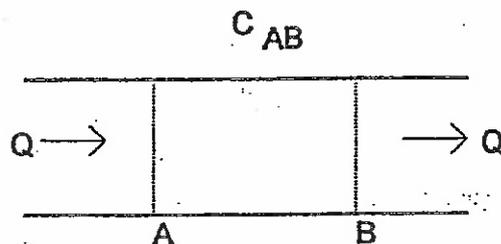


Figura 4

Na seção transversal A, a velocidade de bombeamento é dada por:

$$S_A = Q/P_A \quad \text{ou} \quad 1/S_A = P_A/Q$$

Na seção transversal B, a velocidade de bombeamento é dada por:

$$S_B = Q/P_B \quad \text{ou} \quad 1/S_B = P_B/Q$$

Subtraindo as duas equações do inverso das velocidades e usando a equação 8, temos

$$1/S_A + 1/S_B = (P_A - P_B)/Q = 1/C_{AB}$$

Que pode ser escrito da forma

$$1/S_A = 1/S_B + 1/C_{AB} \quad (13)$$

Rearranjando os termos, a equação 13 pode se escrita como:

$$S_A = S_B C_{AB} / (S_B + C_{AB}) \quad (14)$$

Portanto, as equações 13 ou 14 permitem calcular a velocidade de bombeamento em qualquer seção da tubulação de um sistema, conhecendo-se a velocidade de bombeamento em uma outra seção e a condutância entre essas duas seções.

Velocidade efetiva de bombeamento

Normalmente, a velocidade que se conhece de antemão é a velocidade nominal de bombeamento da bomba de vácuo, S_b , que é especificada pelo fabricante.

IMPORTANTE: A velocidade de bombeamento especificada pelo fabricante é a velocidade na entrada (boca) da bomba de vácuo.

Geralmente, a bomba de vácuo é ligada a uma câmara, através de vários tubos. Portanto, para se saber, por exemplo, qual a velocidade real ou efetiva de bombeamento na câmara de vácuo deve-se usar a equação 14, que podemos reescreve-la da seguinte forma:

$$S_{ef} = S_b C_T / (S_b + C_T) \quad (15)$$

onde S_{ef} é a velocidade efetiva de bombeamento na câmara de vácuo
 S_b é a velocidade nominal de bombeamento da bomba de vácuo
 C_T é a condutância total entre a bomba e a câmara de vácuo

-----//-----

Exemplo 3.

Calcular a velocidade efetiva de bombeamento em uma câmara de vácuo que esta sendo bombeada por uma bomba difusora de velocidade nominal de 150 l/s, sabendo-se que a bomba difusora esta ligada à câmara por uma tubulação com condutância de 90 l/s?

Neste caso podemos usar diretamente a expressão para a velocidade efetiva.

$$S_{ef} = S_b C_T / (S_b + C_T) = 150 \times 90 / (150 + 90) = 56,3 \text{ l/s}$$

-----//-----

Exemplo 4.

No exemplo anterior considerar que a conexão entre difusora e câmara é feita por dois tubos em série de condutâncias 120 l/s e 90 l/s?

Neste caso temos primeiro que calcular qual é a condutância total. Como os dois tubos estão em série temos

$$1/C_{AC} = 1/C_{AB} + 1/C_{BC} = 1/120 + 1/90 = 0,0194 \Rightarrow C_{AC} = C_T = 51,4 \text{ l/s}$$

Usando agora a expressão para a velocidade efetiva temos:

$$S_{ef} = S_b C_T / (S_b + C_T) = 150 \times 51,4 / (150 + 51,4) = 38,3 \text{ l/s}$$

Pode-se verificar dos exemplos anteriores que quanto menor é a condutância entre a bomba e a câmara a ser evacuada menor é a velocidade efetiva de bombeamento.

Dois casos extremos e importantes podem ser verificados apartir da equação para a velocidade efetiva:

1- Condutância da tubulação muito maior que a velocidade da bomba.

- $C_T \gg S_b \Rightarrow S_{ef} = S_b$ (bom)

1- Condutância da tubulação muito menor que a velocidade da bomba.

- $C_T \ll S_b \Rightarrow S_{ef} = C_T$ (ruim)

5. FORMULÁRIO BÁSICO DE CONDUTÂNCIAS

Vimos nas secções anteriores alguns conceitos básicos de escoamento e bombeamento de vácuo. Nesta seção serão apresentados algumas expressões para o cálculo de condutância de tubulações de vácuo. Como o tratamento matemático para a dedução das expressões é muitas vezes bem complicado, achamos mais proveitoso apenas fornecer os resultados simplificados (equações práticas) com comentários e exemplos de aplicações.

Todas as fórmulas apresentadas são válidas para o ar (Nitrogênio) e para a temperatura ambiente (20°C).

5.1 ESCOAMENTO EM REGIME VISCOSO OU LAMINAR

Condutância de orifícios

$$C \sim 20 A \quad (\text{l/s})(16)$$

onde, A é a área do orifício (cm²)

Se o orifício for circular, de raio R (cm), então $A = \pi R^2$, tem-se:

$$C \sim 70 R^2 \quad (\text{l/s}) \quad (17)$$

Condutância de tubos cilíndricos

$$C \sim 182 (D^4 / L) \bar{P} \quad (\text{l/s}) \quad (18)$$

onde D (cm) é o diâmetro do tubo,

L (cm) é o comprimento do tubo

P (Torr) é a pressão média no tubo $(P_1 + P_2) / 2$

Condutância de tubos retangulares

$$C \sim 260 Y (A^2 / L) P \quad (\text{l/s}) \quad (19)$$

onde A (cm²) é a área do tubo

L (cm) é o comprimento do tubo

P (Torr) é a pressão média no tubo $(P_1 + P_2) / 2$

Y é um fator de correção que depende das laterais (a, b) do retângulo, dado na tabela 3

Tabela 3. Fator de correção em função do formato do tubo retangular

a/b	Y	a/b	Y
1,0	1,00	0,5	0,82
0,9	0,99	0,4	0,71
0,8	0,98	0,3	0,58
0,7	0,95	0,2	0,42
0,6	0,90	0,1	0,23

Condutância de tubo anular

$$C \approx 2900 \left(\frac{P}{L} \right) \left[r_0^4 - r_i^4 - \frac{(r_0^2 - r_i^2)^2}{\ln(r_0 / r_i)} \right] \quad (20)$$

onde P (Torr) é pressão média

L (cm) é o comprimento do tubo

r₀ (cm) é o raio menor

r_i (cm) é o raio maior

5.2 ESCOAMENTO EM REGIME MOLECULAR

Condutância de orifícios

$$C \sim 11,6 A \quad (\text{l/s}) \quad (21)$$

onde A (cm) é a área do orifício

Para um orifício cilíndrico, $A = \pi R^2 = \pi D^2/4$, tem-se:

$$C \sim 9,2 D^2 \quad (\text{l/s}) \quad (22)$$

Condutância de tubos longos circulares

$$C \sim 12,1 D^3 / L \quad (\text{l/s}) \quad (23)$$

onde D (cm) é o diâmetro do tubo

L (cm) é o comprimento do tubo, $L > 20 D$

Condutância de tubos longos retangulares

$$C \sim 31 a^2 b^2 K_r / (a + b) L \quad (\text{l/s}) \quad (24)$$

onde a (cm) e b (cm) são as laterais do tubo

L (cm) é o comprimento do tubo, $L > 20 D$

K_r é um fator experimental de correção, dado na tabela 4.

Tabela 4. Fator de correção, K_r , para a condutância de tubo longo retangular

b/a	K
1	1,108
0,667	1,126
0,5	1,151
0,333	1,198
0,2	1,297
0,125	1,400
0,1	1,444

Condutância de um tubo longo anular

$$C \sim 12 (D_e - D_i)^2 (D_e + D_i) (K_o / L) \quad (\text{l/s}) \quad (25)$$

onde D_e (cm) é o diâmetro externo

D_i (cm) é o diâmetro interno

L (cm) é o comprimento do tubo, $L > 20D$

K_o é um fator de correção dado na tabela 5

Tabela 5. Fator de correção para tubo angular longo

D_i / D_e	0	0,259	0,5	0,707	0,866	0,966
K_0	1	1,072	1,154	1,254	1,430	1,675

Condutância de tubo curto circular

$$C \sim C_t(1 + 1,33 D^3 / L) \quad (\text{l/s}) \quad (26)$$

onde C_t é a condutância para tubo longo (equação 23)

D (cm) é o diâmetro do tubo

L (cm) é o comprimento do tubo, $L < 20 D$

Condutância de tubo curto retangular

$$C \sim 31(a b^2 / L K_r) \quad (\text{l/s})(27)$$

onde a (cm) e b (cm) são as laterais do tubo

L (cm) é o comprimento do tubo, $L < 20 D$

K_r é um fator experiencial de correção, dado na tabela 4.

Condutância de tubo anular curto

$$C \sim 12 (D_e - D_i)^2 (D_e + D_i) K_0 / [L + 1,33 (D_e - D_i)] \quad (\text{l/s}) \quad (28)$$

onde D_e (cm) é o diâmetro externo

D_i (cm) é o diâmetro interno

L (cm) é o comprimento do tubo, $L < 20D$

K_0 é um fator de correção dado na tabela 5

Condutância de cotovelo

A condutância de um cotovelo é dada pela condutância de um tubo de diâmetro D , usando o comprimento equivalente L_{eq} no lugar do comprimento normal L de um tubo.

L_{eq} é um valor entre:

$$(L_1 + L_2) < L_{eq} < (L_1 + L_2 + 1,33 D) \quad (29)$$

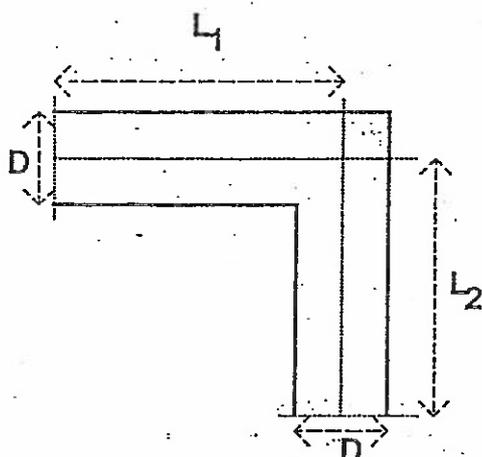


Figura 5.

6.0 BOMBEAMENTO DE UMA CÂMARA DE VÁCUO

Nesta seção vamos determinar qual a velocidade de bombeamento *efetiva* que devemos ter para evacuar um certo recipiente de volume V a uma determinada pressão P . Como temos regiões de vácuo diferentes o tratamento para baixo e alto vácuo são diferentes. Basicamente, tendo-se determinado a velocidade efetiva pode-se determinar a velocidade de bombeamento necessária da bomba de vácuo (equação 15), calculando-se a condutância total entre a bomba e a câmara a ser evacuada.

Baixo e médio vácuo (Regime viscoso)

Nesta região ($<10^{-3}$ Torr), a velocidade efetiva de bombeamento só depende da pressão final desejada, P , do volume da região a ser evacuada, V , e do intervalo de tempo, t , que se deseja para o bombeamento até a pressão final. Só é importante o gás contido no sistema.

Suposições: 1- Não há vazamentos

2- A velocidade de bombeamento, S_{ef} , é constante.

3- A pressão final desejada P , é maior que a pressão final possível de ser alcançada no recipiente, P_f .

A variação de pressão, $p(t)$, dentro da câmara é dada por:

$$dp/dt = -(S_{ef}/V)p \quad (30)$$

Em $t = 0$, pressão do recipiente é 760 Torr (pressão atmosférica)

Integrando a equação 30 de 760 até a pressão desejada tem-se:

$$S_{ef} = (V/t) \ln(760/p) \quad (40)$$

A razão $760/p$ é chamada de taxa de compressão, K .

A razão S_{ef} / V é chamada de *constante de tempo, τ* .

Podemos isolar o tempo t na equação 40:

$$t = (V / S_{ef}) \ln((760 / p))$$

Exemplo 5

Um recipiente de 500 litros deve ser evacuado até a pressão de 1 Torr em 10 minutos .
Qual a velocidade de bombeamento efetiva necessária em l/s?

Cuidado com unidades, nas equações!

Temos uma região de baixo vácuo, então podemos usar a equação 40.

$$t = 10 \text{ min} = 10 \times 60 \text{ seg} = 600 \text{ seg}$$

$$S_{ef} = (500 / 600) \ln(760/1) = 0,83 \times 6,63 = 5,5 \text{ l/s}$$

Normalmente, uma bomba de baixo vácuo (b. mecânica) é especificada em m^3/h .
Portanto, é conveniente sabermos converter litros $\Rightarrow \text{m}^3$, segundos \Rightarrow hora, ou
diretamente $\text{l/s} \Rightarrow \text{m}^3/\text{h}$

Temos:

$$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ litros}$$

$$1 \text{ hora} = 60 \times 60 \text{ segundos} = 3600 \text{ segundos}$$

$$\Rightarrow 1 \text{ m}^3/\text{h} = 1000 \text{ litros} / 3600 \text{ seg} = 0,278 \text{ l/s}$$

$$\Rightarrow 1 \text{ l/s} = 3,6 \text{ m}^3/\text{h}$$

A velocidade obtida de 5,5 l/s fica:

$$\begin{array}{l} \text{A plicando a regra de 3, tem-se :} \\ 1 \text{ l/s} \Rightarrow 3,6 \text{ m}^3/\text{h} \\ 5,5 \text{ l/s} \Rightarrow X \end{array}$$

$$\text{Então, } X = 5,5 \cdot 3,6 = 19,5 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Como a velocidade da bomba normalmente não é constante, na prática, deve-se
aumentar a velocidade de bombeamento efetiva obtida em pelos menos 20%.

$$\text{Então, } S_{ef} = 19,5 \times 1,2 = 23,4$$

Exemplo 6

Calcular o tempo necessário para se obter uma pressão de 10^{-1} Torr, apartir da
pressão atmosférica, numa câmara de vácuo de volume 1000 litros, sabendo-se que a
velocidade efetiva na câmara é de $180 \text{ m}^3/\text{h}$? Resp. 178seg

Alto e ultra-alto vácuo (Regime molecular)

Nesta região de vácuo ($P > 10^{-3}$ Torr), como já vimos, é importante o efeito molecular, ou seja, há poucas partículas soltas no recipiente. A superfície da câmara é importante, pois a bomba de alto vácuo, geralmente, uma difusora ou turbomolecular, tem que bombear os gases que se despreendem das paredes. Portanto, nesta região de vácuo é importante o tratamento das paredes internas dos recipientes a serem evacuados e principalmente os materiais usados.

As principais fontes de gases num sistema ~~em~~ à baixa pressão são:

- Vazamentos $\Rightarrow Q_L$ (vazamentos reais ou virtuais)
- Degaseificação $\Rightarrow Q_d$ (gases que se despreendem das materiais)
- Vapores $\Rightarrow Q_v$ (material se vaporiza à baixas pressões \Rightarrow pressão de vapor)
- Permeação $\Rightarrow Q_p$ (gases que atravessam os materiais)

Voltaremos a tratar desses fluxos de gases com mais detalhes na aula sobre materiais para vácuo. Por ora, basta considerar que existem várias fontes de gases que "carregam" o sistema e que devem ser bombeados pela bomba de alto-vácuo.

$$Q_T = Q = Q_L + Q_d + Q_v + Q_p$$

Experimentalmente, pode-se ter uma idéia do valor da vazão (evolução) total de gases dentro do sistema. Basta bombear o recipiente, por várias horas, para atingir a menor pressão possível, e então fechar a válvula entre o recipiente e bomba de vácuo. A quantidade de gás que aparece no sistema aumentando a pressão do mesmo é dada por:

$$Q = \Delta p \cdot V / t \quad (\text{Torr} \cdot \text{litros} / \text{seg}) \quad (41)$$

onde Δp (Torr) é a aumento de pressão no tempo t (s)
 V (l) é o volume do recipiente.

Se a vazão de gás Q e a pressão final P_f de uma câmara de vácuo são conhecidos, então a velocidade efetiva de bombeamento para manter a pressão final é calculada por:

$$S_{ef} = Q / P_f \quad (Q=PS) \quad (42)$$

.....//.....

Exemplo 7

Um recipiente de volume 500 litros tem uma superfície interna de aproximadamente 5 m^2 . Assumindo que existe uma vazão de gás de 2×10^{-4} Torr. litros/seg. m^2 , qual deve ser a velocidade efetiva de bombeamento para manter uma pressão de 1×10^{-5} Torr?

$$Q = 2 \times 10^{-4} \times 5 = 1 \times 10^{-3} \text{ Torr} \cdot \text{l/s}$$

$$\Rightarrow S_{ef} = 1 \times 10^{-3} / 1 \times 10^{-5} = 100 \text{ l/s}$$

.....//.....

Esta é a velocidade necessária só bombear os gases que aparecem no sistema através de vazamentos, degaseificação, etc

Caso não houvesse fontes extras de gases, portanto, somente os gases que originalmente estavam no sistema à pressão atmosférica, a velocidade efetiva de bombeamento poderia ser calculada usando a expressão 40, apenas alterando o valor da pressão inicial. Ou seja para o caso de baixo vácuo, as bombas partem da pressão atmosférica, 760 Torr. Para o caso de alto-vácuo as bombas partem de uma determinada pressão abaixo da pressão atmosférica. A expressão 40 deve então ser escrita de forma mais geral:

$$S_{ef} = (V/t) \ln(p_i/p_f) \quad (43)$$

onde p_i é a pressão inicial para a bomba de alto vácuo
 p_f é a pressão final que se deseja alcançar

.....//.....

Exemplo 8

No caso do exemplo anterior, qual seria, por exemplo, a velocidade efetiva para evacuar o sistema a $p = 1 \times 10^{-5}$ Torr em 5 minutos. Considerar uma bomba difusora que parte da pressão de 2×10^{-3} Torr?

$$V = 500 \text{ l}, \quad t = 5 \text{ min} = 5 \times 60 \text{ s} = 300 \text{ s}$$

$$\text{Então, } S_{ef} = (500 / 300) \ln(2 \times 10^{-3} / 1 \times 10^{-5}) = 9 \text{ l/s}$$

.....//.....

Verifica-se que, para manter a pressão final em 1×10^{-5} Torr $\Rightarrow S_{ef} = 100 \text{ l/s}$, enquanto que para atingir a mesma pressão em 5 minutos $\Rightarrow S_{ef} = 9 \text{ l/s}$.

Referências

- 1- A Roth, Vacuum Technology, North-Holland, 1982
- 2- Leybold-Heraeus, Vacuum Technology its Foundations, Formulae and Tables, 1974

Handwritten text at the top right corner.



CAPÍTULO 3 - BOMBAS DE VÁCUO

1 - Introdução

O propósito desta secção é dar os princípios básicos de funcionamento e utilização dos mais variados tipos de bombas de vácuo. Será dada ênfase principal sobre aquelas que têm, atualmente, maior utilização tecnológica, ou seja, as bombas mecânicas e difusoras.

Dependendo das necessidades de vácuo para uma determinada aplicação, existe um tipo de bomba de vácuo, ou um conjunto de bombas de vácuo que melhor se adapta. Embora exista tecnologia muito avançada para a fabricação de bombas de vácuo, não existe uma que possa ser usada para bombear desde a pressão atmosférica até as pressões na faixa de alto vácuo (10^{-6} - 10^{-7} Torr). Por isto, na verdade, é mais indicado falar em sistemas de bombeamento para caracterizar um determinado conjunto de bombas de vácuo utilizados em uma determinada aplicação. A não ser em sistemas de médio e baixo vácuo (10^2 - 10^{-3} Torr), onde é possível o uso de um único tipo de bomba de vácuo, ou seja, por exemplo, as bombas mecânicas, todos os outros sistemas de bombeamento fazem uso de um conjunto de bombas. Este conjunto de bombas consiste, normalmente, de uma bomba de pré-vácuo e de uma bomba de alto vácuo, que são assim classificadas:

1. Bombas de pré-vácuo; são aquelas que operam a partir da pressão atmosférica até produzir vácuo da ordem de 10^{-2} ou 10^{-3} Torr. Como exemplo existem as bombas mecânicas e as bombas de sorção.
2. Bombas de alto-vácuo; são aquelas que só operam, ou só podem começar a operar a partir de pressões mais baixas que a atmosférica (10^{-1} - 10^{-3} Torr). Como exemplo existem as bombas de difusão, as bombas turbomoleculares, as bombas iônicas e as bombas criogênicas.

Os sistemas de bombeamento podem ser classificados conforme a faixa de vácuo que eles atingem sendo:

- sistemas de baixo e médio vácuo (10^2 - 10^{-3} Torr);
- sistemas de alto vácuo (10^{-4} - 10^{-7} Torr);
- sistemas de ultra alto vácuo (10^{-8} - 10^{-13} Torr).

Entre estes, ainda pode-se destacar os sistemas de baixa e de alta vazão. Sistemas de baixo e médio vácuo, de vazão baixa ou moderada, em geral, nas aplicações industriais, fazem uso de bombas mecânicas rotativas de paqueta, enquanto que sistemas nesta faixa de vácuo, mas de alta vazão, fazem uso de bombas mecânicas tipo "Roots".

Na Fig.1 está dado um exemplo de um sistema de alto vácuo que é muito utilizado em aplicações industriais. Este é um sistema de bombeamento por bomba de difusão. Este sistema de bombeamento consiste de um conjunto formado por uma bomba de difusão, uma bomba mecânica e mais um conjunto de válvulas de vácuo. A bomba mecânica tem duas funções neste sistema: ela funciona como bomba de pré-vácuo e como bomba de retrobombeamento da bomba de difusão. Inicialmente as válvulas V1 e V3 permanecem fechadas e a válvula V2 é aberta, e a

bomba mecânica exerce sua função de pré-vácuo. Quando a pressão na câmara atinge cerca de 10^{-2} - 10^{-3} Torr, a válvula V2 se fecha e as válvulas V1 e V3 se abrem. Nestas condições, a câmara é bombeada pela bomba de difusão, e esta, por sua vez é retro bombeada pela bomba mecânica. Este tipo de sistema pode operar desta forma até atingir uma pressão final na câmara de vácuo na ordem de 10^{-5} - 10^{-7} Torr.

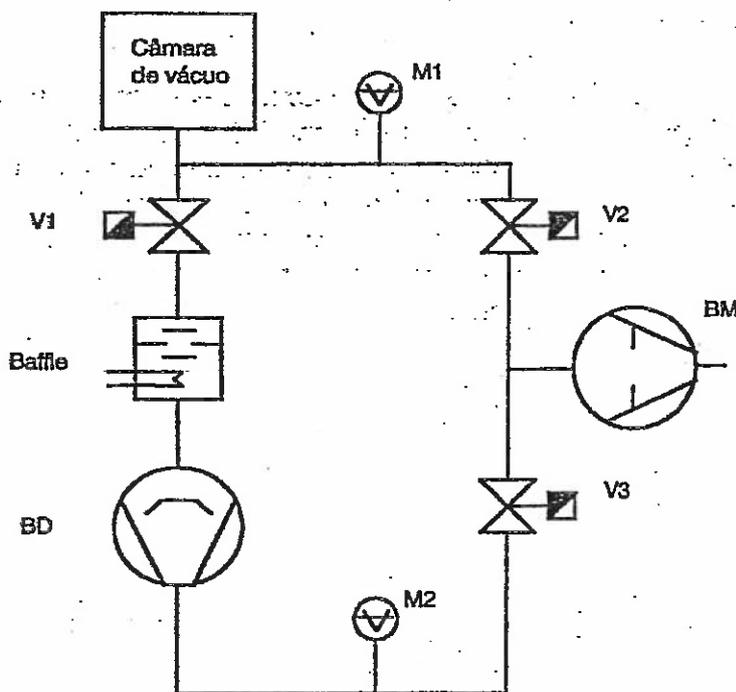


Fig. 1: Sistema de bombeamento de alto vácuo com bomba de difusão. BD - bomba de difusão; BM - bomba mecânica; V1, V2 e V3 - válvulas de vácuo; M1 e M2 - medidores de vácuo; Baffle -

Neste tipo de sistema fica bem caracterizada a necessidade de uma bomba de pré-vácuo, pois a bomba de difusão não pode, de forma alguma, ser exposta a uma pressão acima de 10^{-2} - 10^{-3} Torr. Por este mesmo motivo existe a necessidade da bomba de retro bombeamento. Em geral, as bombas de pré-vácuo são também usadas para o retro bombeamento.

Baseado nestes conceitos e na classificação exposta, serão estudados os vários tipos de bombas de vácuo.

2 - Bombas de pré-vácuo

2.1 - Bombas mecânicas

Existem pelo menos quatro tipos de bombas mecânicas, embora o princípio de funcionamento seja o mesmo. Na sequência será dada uma descrição das mais importantes.

Bombas mecânicas tipo pistão

O bombeamento do gás, neste tipo de bomba, é efetuado pelo movimento de um pistão que retira o gás da câmara a ser evacuada por expansão e o comprime para fora do sistema.

A Fig. 2 mostra as etapas do movimento do pistão. Na etapa A o gás entra na bomba de vácuo através de sua entrada e fica isolado na região sombreada, devido ao posicionamento do rotor. Na etapa B o pistão se movimenta expandindo o volume interno da bomba. Esta expansão de volume interno da bomba faz com que mais gás se transfira da câmara que esta sendo bombeada para o interior da bomba de vácuo. Na etapa C o movimento do pistão comprime este gás na região sombreada. O movimento do pistão continua comprimindo este gás, até que na etapa D a compressão do gás é suficiente para abrir a válvula e permitir a saída do gás. É importante ressaltar que em qualquer posição do movimento do pistão a entrada e a saída ficam isoladas uma da outra. Este movimento contínuo efetua o bombeamento.

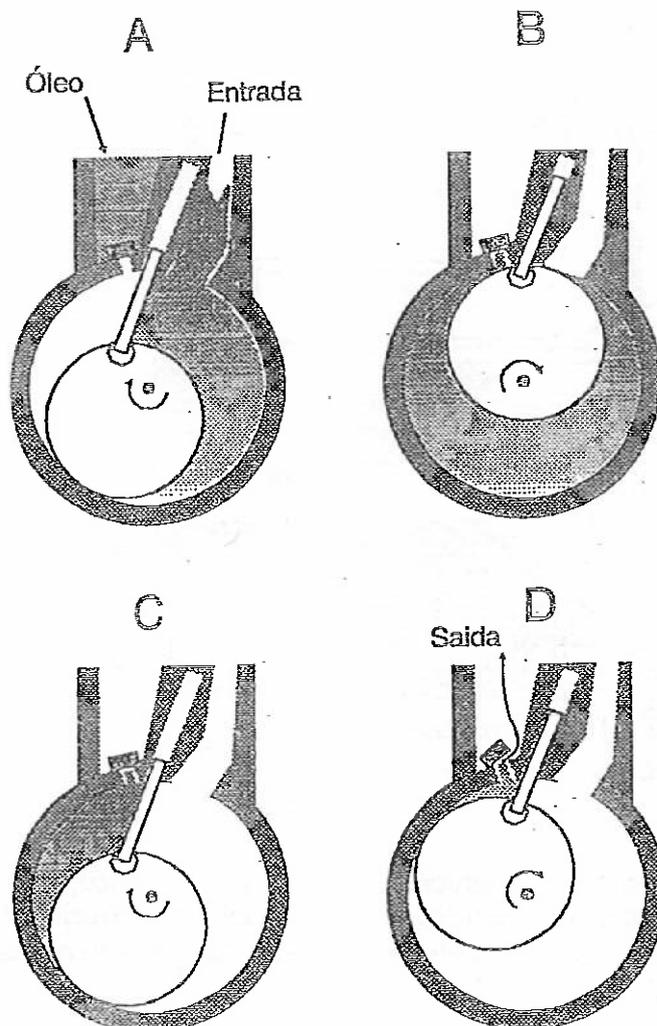


Fig. 2: Princípio de funcionamento de uma bomba mecânica de Pistão

As bombas tipo pistão são usadas em sistemas relativamente grandes de baixo e médio vácuo, sozinhas ou em conjunto com bombas roots. Elas são fabricadas em vários tamanhos, com velocidade de bombeamento entre 30 e 1500 m³/h.

Ela é um tipo de bomba bastante resistente e de construção mecânica relativamente simples, conforme mostrado no esquema da Fig. 3. O espaçamento

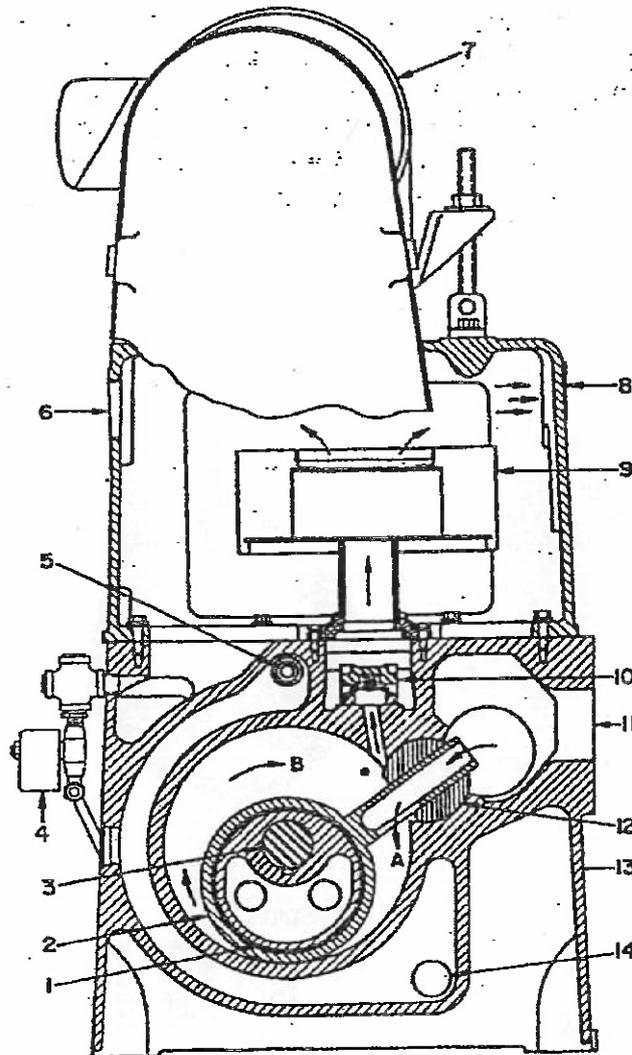


Fig. 3: Esquema de uma bomba mecânica de pistão. 1- excêntrico; 2- pistão; 3- eixo; 4- gás ballast; 5- entrada de água de refrigeração; 6- exaustão opcional; 7- motor; 8- exaustão; 9- separador de óleo; 10- válvula; 11- entrada; 12- barra do pistão; 13- corpo; 14- saída de água de refrigeração

mínimo entre o pistão móvel e a carcaça da bomba é tipicamente na ordem de 0,1 mm. Este espaçamento é relativamente maior que o espaçamento existente em bombas rotativas de palheta, e por isto, este tipo de bomba é mais tolerante à contaminação por partículas. Nestas bombas são usados óleos de baixa pressão de

vapor, que têm a dupla função de vedação e lubrificação entre as partes fixas e móveis da bomba.

Na Fig. 4 está mostrada uma curva típica da velocidade de bombeamento para uma bomba mecânica de pistão de um único estágio, mostrando o efeito do "gas ballast", e também é mostrado o consumo de potência em função da pressão. Embora a pressão final seja relativamente alta, é possível obter pressões mais baixas com bombas de duplo estágio.

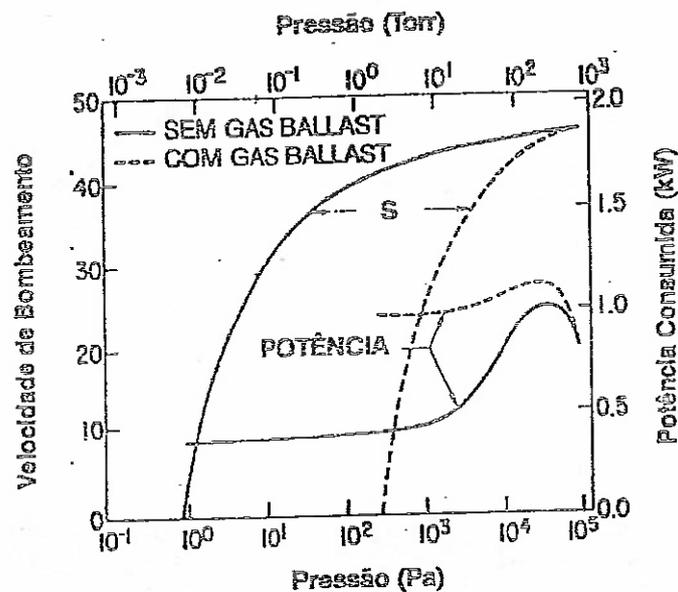


Fig. 4: Curva típica da velocidade de bombeamento de uma bomba mecânica de pistão

Bombas mecânicas rotativas de palheta

Este tipo de bomba também funciona através da expansão do gás no seu interior e posterior compressão do mesmo contra a sua saída. Neste caso, o pistão é substituído por um rotor com eixo fora de centro com relação ao corpo da bomba, no qual existem duas palhetas acopladas por uma mola, conforme mostra a Fig. 5. Esta mola comprime as palhetas contra a parede interna do corpo da bomba. Com o giro do rotor, as palhetas também giram. Na etapa A o gás é admitido dentro da bomba através de sua entrada, conforme mostra a região sombreada. Na etapa B, o movimento do rotor aumenta o volume interno da bomba causando a expansão que é responsável pela retirada de gás da câmara que está sendo evacuada. Na etapa C é mostrado o processo de compressão do gás, que culmina na etapa D, com a abertura da válvula e a expulsão do gás. Também neste caso é usado óleo de baixa pressão de vapor para a vedação e lubrificação entre as partes móveis e fixas da bomba.

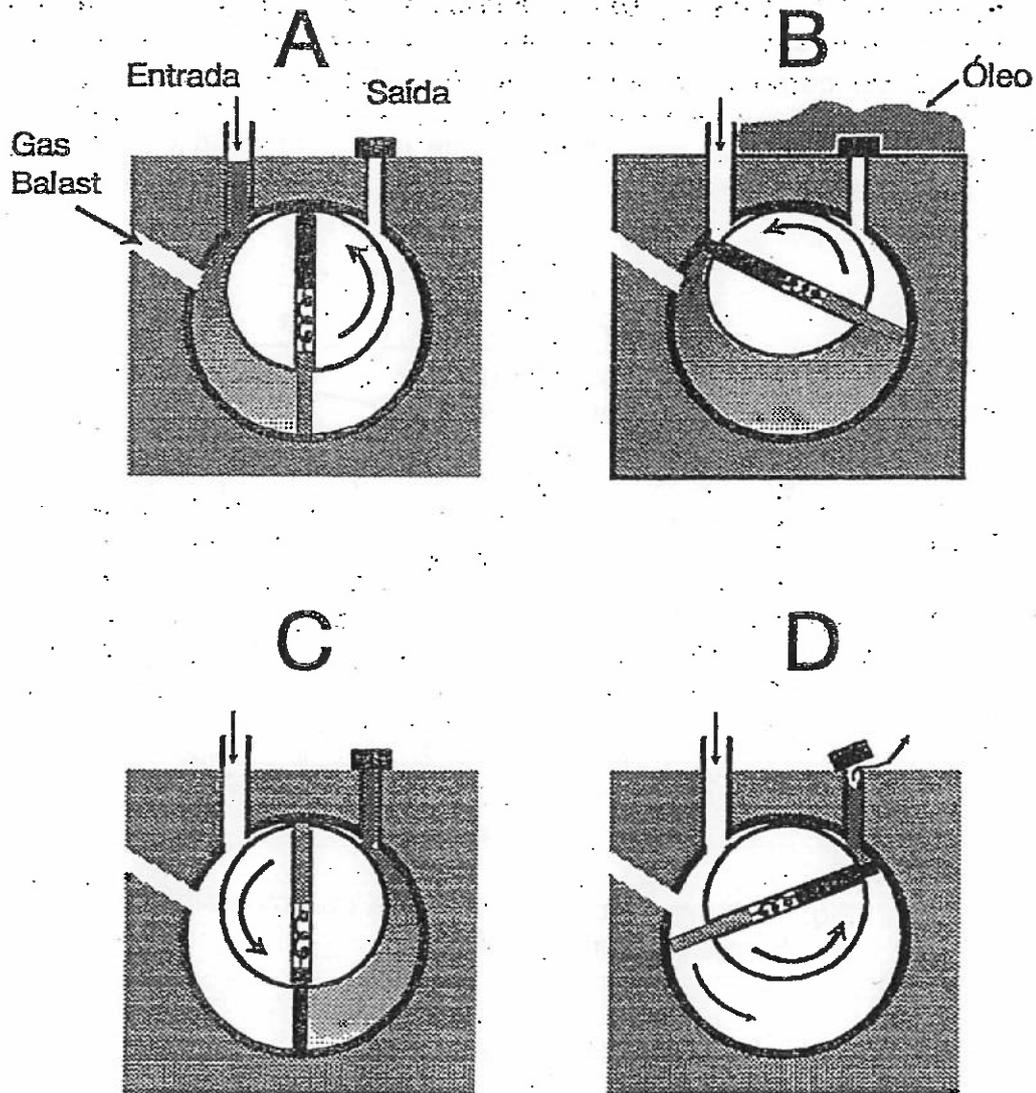


Fig. 5: Princípio de funcionamento da bomba rotativa de palhetas

Nesta figura também está indicada uma entrada de "gas balast", que é muito comum em bombas mecânicas. Na entrada de "gas balast", na verdade, existe uma válvula que deve ser aberta ou fechada caso se queira a operação ou não do "gas balast". Em bombas mecânicas é muito comum a condensação de vapor de água ou de outros gases condensáveis, durante o processo de compressão do gás. Esta água e outros condensados tendem a se misturar com o óleo, ao invés de serem expelidos através da saída, e também podem voltar ao sistema de vácuo, diminuindo o desempenho do sistema de bombeamento. Para diminuir este problema é que existe a entrada de "gas balast". Com a admissão de ar, de preferência seco, através desta entrada, aumenta-se a pressão interna nesta região, o que força a abertura da válvula antes do tempo normal, o que diminui a razão de compressão. Com a diminuição da razão de compressão estes vapores não se condensam e são expulsos através da saída. Com a abertura da válvula do "gas balast" o desempenho da bomba também diminui, mas esta válvula é aberta apenas quando se deseja fazer uma limpeza do óleo para libera-lo do vapor de água.

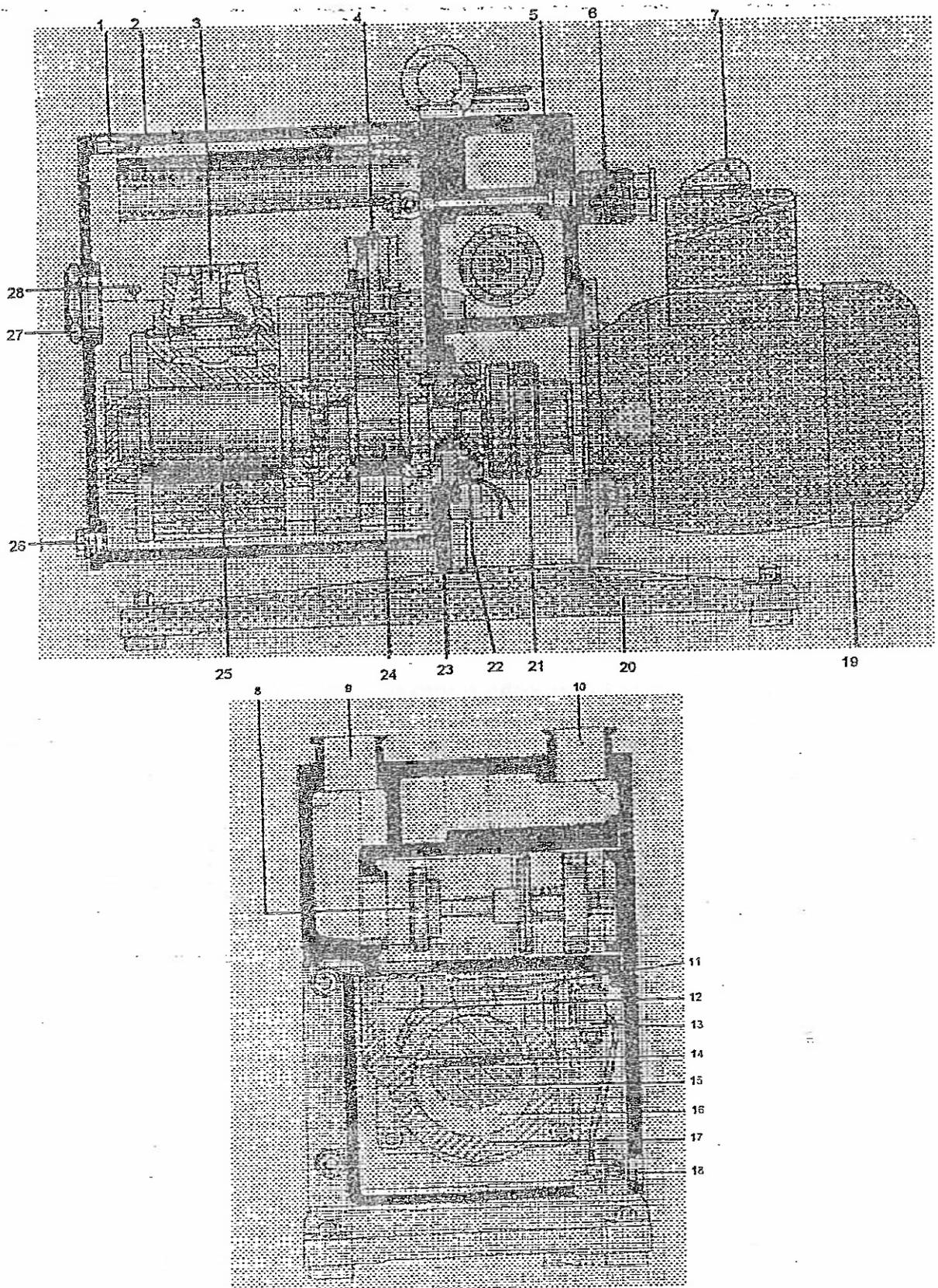


Fig. 6: Bomba mecânica rotativa de palhetas de duplo estágio

2. Corpo;	15. Rotor;
3. Válvula de alívio de pressão	16. Câmara;
4. Válvula de bombeamento;	17. Cilindro de bombeamento;
5. Suporte;	18. Conexão elétrica;
6. Válvula de gas ballast;	19. Motor;
7. Chave liga desliga do motor;	20. Base;
8. Válvula de vácuo;	21. Acoplamento;
9. Entrada;	22. Dínamo;
10. Exaustão;	23. Vedação do eixo;
11. mesmo que 4;	24. Estágio 2;
12. Canal de entrada;	25. Estágio 1;
13. Válvula solenóide;	27. Vidro de observação do óleo
14. Palhetas	28. Nível do óleo

As bombas mecânicas rotativas de palhetas são mais utilizadas que as bombas de pistão, principalmente em sistemas de bombeamento de pequeno e médio porte. Estas bombas são fabricadas para velocidades de bombeamento entre 10 e 200 m³/h. Bombas de um e de dois estágios são encontradas comercialmente. Nas bombas de dois estágios o segundo estágio é colocado adjacente ao primeiro e é acionado pelo mesmo eixo. A Fig. 6 mostra o desenho esquemático de uma bomba de dois estágios.

Os limites para o vácuo alcançado por este tipo de bomba está ligado a:

- vazamentos pelas folgas entre o roto e a carcaça;
- pressão de vapor do óleo;
- aquecimento da bomba durante o funcionamento;
- aumento da impedância de entrada da bomba com a diminuição da pressão.

A Fig. 7 mostra as curvas típicas de velocidade de bombeamento para bombas mecânicas rotativas de palheta, com um único estágio e com duplo estágio, e, também, com a válvula de "gas balast" aberta.

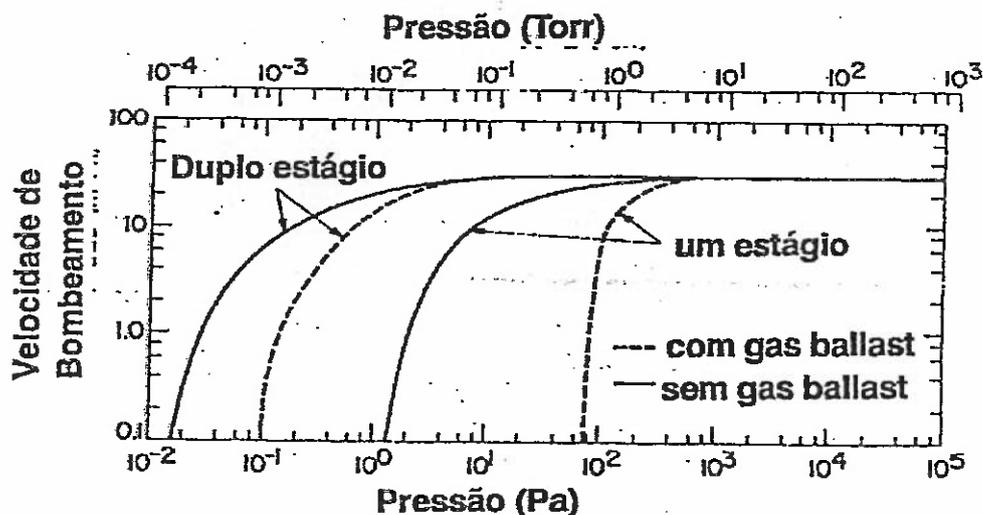


Fig. 7: Velocidade de bombeamento de bombas rotativas de palheta

Bombas mecânicas tipo "roots"

O princípio de funcionamento das bombas Roots é o mesmo dos outros dois tipos de bombas já descritos, apenas o tipo de rotor é que é diferente. Ela consiste de dois rotores em forma de "oito" que giram perpendicularmente entre si, conforme mostrado na Fig. 8.

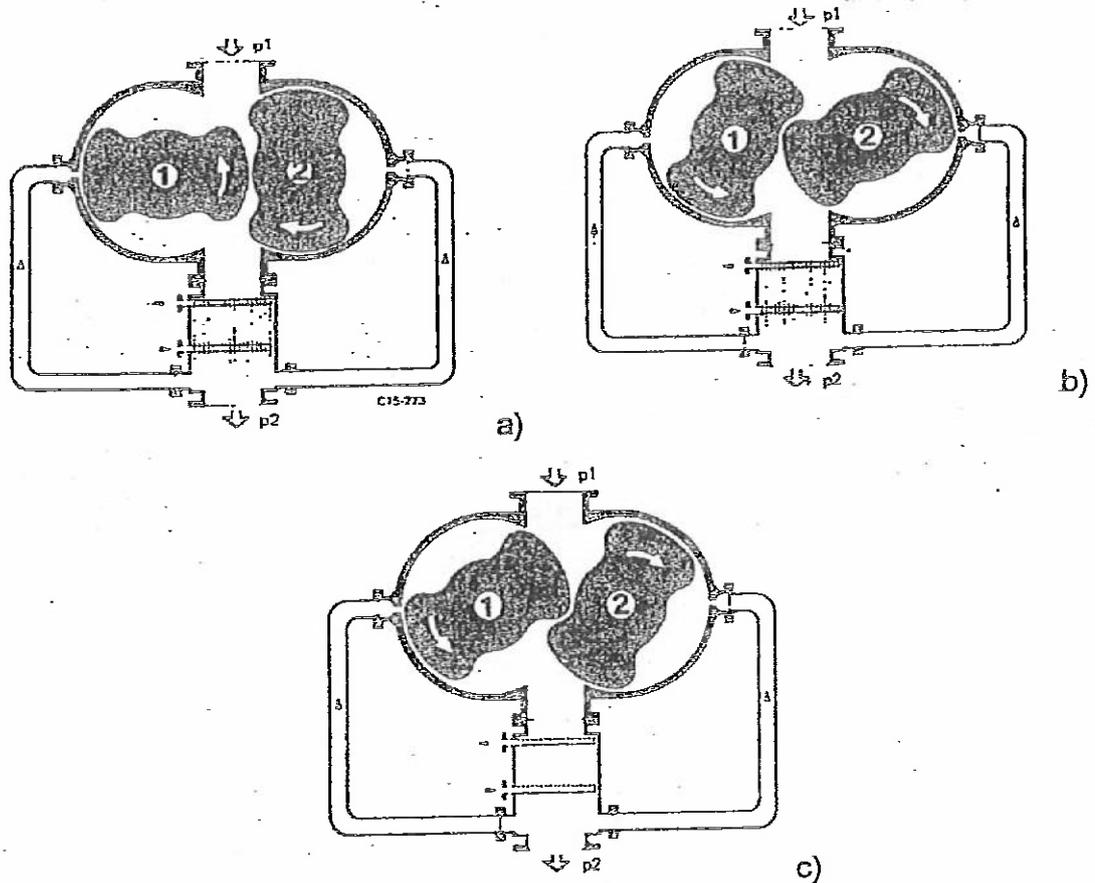
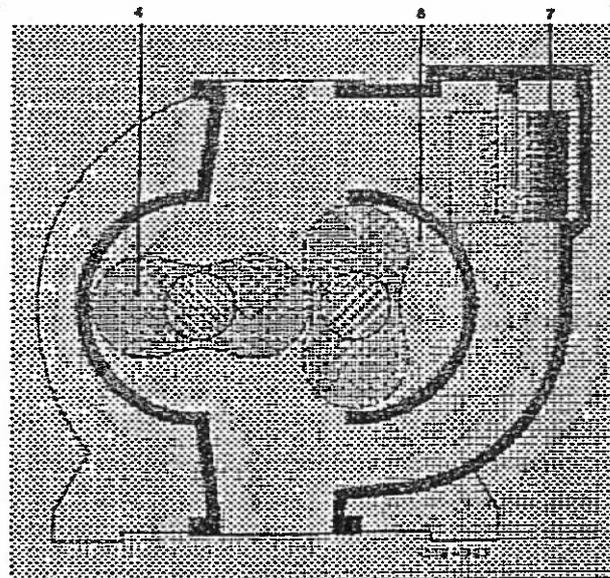
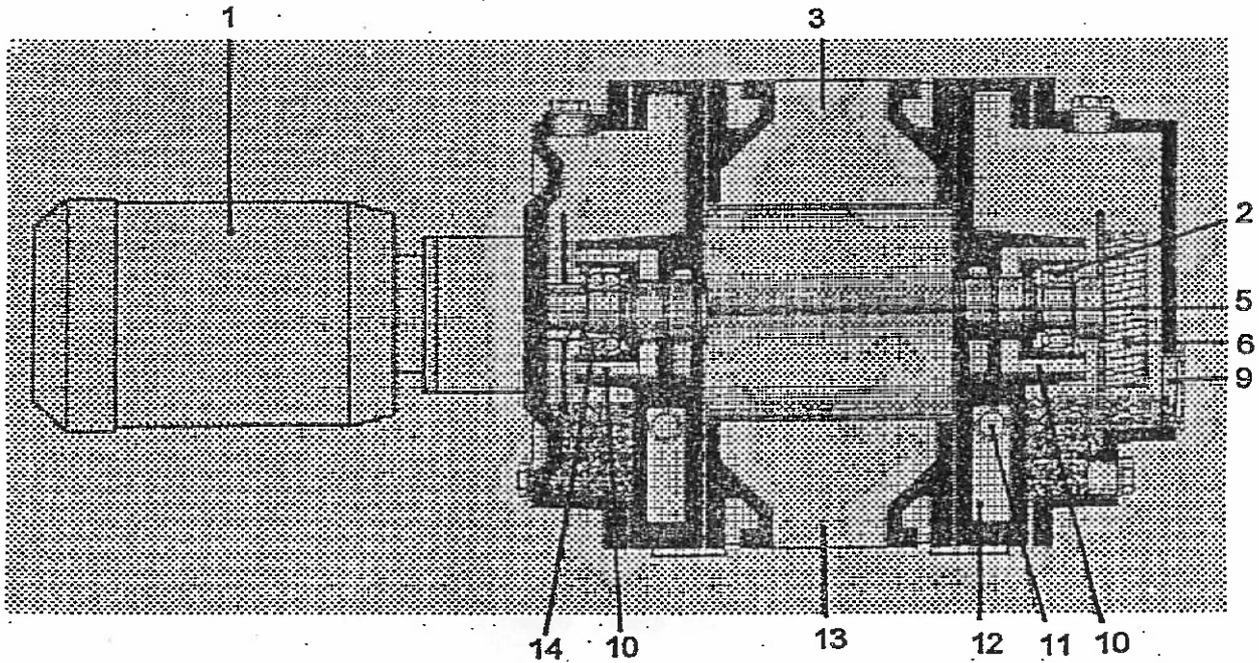


Fig. 8: Princípio de funcionamento das bombas Roots

Na utilização deste tipo de bombas, pode-se, também utilizar o "gas ballast" para melhorar a qualidade do vácuo pela eliminação do vapor de água. Pode-se usar, também um duplo estágio para melhorar quantitativamente o vácuo. Entretanto, devido ao princípio de uso destes lóbulos em forma de "oito", ao invés de um pistão ou palheta, a taxa de compressão (razão da pressão de entrada e da pressão de saída da bomba) é pequena, devido à distância entre os lóbulos entre si e a carcaça, ser relativamente grande. Isto devido a problemas de construção. Os rotores giram em sincronismo e em direções opostas, a velocidades entre 3000 e 3500 rpm. Estas velocidades são possíveis porque não é usado óleo para vedar entre os espaços entre o rotor e a carcaça.

A principal característica de bombas Roots é a capacidade de poder suportar altas vazões de gás. São fabricadas bombas para velocidade de bombeamento entre 250 e 25.000 m^3/h . No entanto, uma quantidade de calor considerável é gerada com o bombeamento de gás a alta pressão, o que causa a expansão dos rotores e pode danificar a bomba. Para evitar este problema, estas bombas vêm com uma especificação da máxima diferença de pressão a ser bombeada. Quando o

bombeamento é iniciado na pressão atmosférica, normalmente usa-se uma linha de "bypass" para o bombeamento da câmara de vácuo através de uma bomba de palhetas ou de pistão, até a pressão atingir um valor seguro para a operação da bomba Roots. Os sistemas Roots de grande porte já têm este "bypass" construído em seu próprio corpo, que é um sistema de retorno de gás que diminui a diferença de pressão.



- | | |
|---------------------------------|-----------------------------|
| 1. Motor; | 8. Câmara; |
| 2. Rolemã móvel; | 9. Sensor de nível do óleo; |
| 3. Entrada; | 10. Retorno de óleo; |
| 4. Rotor; | 11. Conexão de gás; |
| 5. Vedação do eixo; | 12. Câmara de aquecimento; |
| 6. Caixa de engrenagens; | 13. Saída; |
| 7. Válvula de retorno (bypass); | 14. Rolemã fixo. |

A Fig. 9 mostra um desenho esquemático de uma bomba Roots completa, mostrando alguns detalhes construtivos. Em particular, é mostrada a válvula de retorno (7), que impede que a bomba Roots bombeie diferenciais de pressão inaceitáveis para seu funcionamento.

Com uma bomba Roots pode-se obter altas vazões, mas com um vácuo final apenas na ordem de 10^{-1} Torr. No entanto, com o retro bombeamento por uma bomba de palhetas ou de pistão, pode-se obter altas vazões com pressões finais bem melhores. Neste esquema usa-se uma bomba mecânica com velocidade de bombeamento de cerca de 5 vezes menor que o da bomba Roots. O resultado é exemplificado na Fig. 10, onde são mostrados gráficos das velocidades de bombeamento de dois sistemas Roots - bomba de pistão. O primeiro sistema consiste de uma bomba Roots de $60 \text{ m}^3/\text{h}$ e uma bomba de pistão de $60 \text{ m}^3/\text{h}$. O segundo sistema consiste de uma bomba Roots de $500 \text{ m}^3/\text{h}$ e uma bomba de pistão de $100 \text{ m}^3/\text{h}$. Note que para o segundo sistema houve uma melhora considerável, enquanto que para o primeiro houve apenas uma pequena melhora. Um sistema como este é, em geral, mais barato que uma bomba mecânica de palhetas com capacidade semelhante.

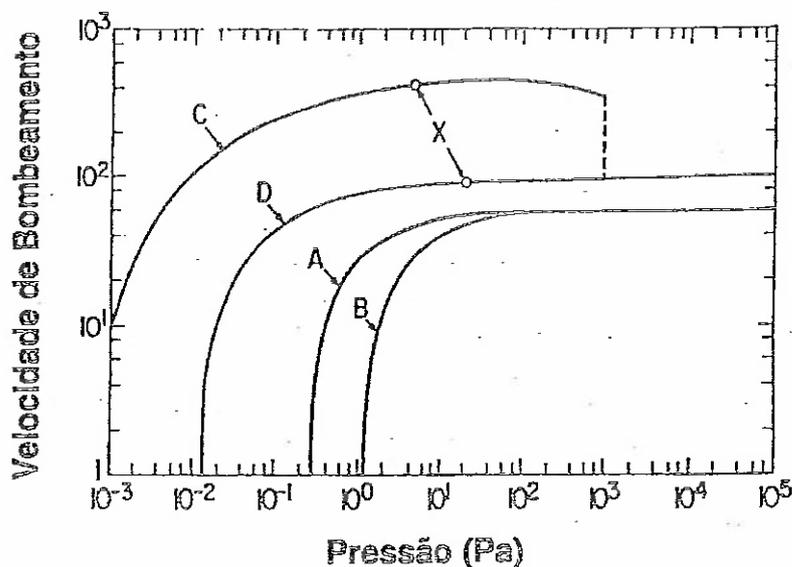


Fig. 10: Velocidade de bombeamento de conjuntos de bomba Roots. A - Roots $60 \text{ m}^3/\text{h}$ + pistão $60 \text{ m}^3/\text{h}$; B - apenas a de pistão $60 \text{ m}^3/\text{h}$; C - Roots $500 \text{ m}^3/\text{h}$ + pistão $100 \text{ m}^3/\text{h}$; D - apenas a de pistão de $100 \text{ m}^3/\text{h}$.

2.2 - Bombas de Sorção

As moléculas de um gás podem ser removidas de um recipiente por adesão a uma superfície sólida (adsorção) e por penetração dentro do sólido (absorção). O fenômeno de sorção é a junção dos fenômenos de adsorção e de absorção.

A bomba de sorção consiste de um recipiente que contenha dentro um material de grande área superficial efetiva, e grande capacidade de sorção de gases. Um bom exemplo deste tipo de material é o carvão ativado. Em geral, em bombas de sorção usa-se *zeólita sintética*, ou seja, silicato de cálcio e alumínio.

Estes silicatos cristalizam-se em forma cúbica, com uma moléculas de água aprisionadas em seu interior. A água aprisionada é evaporada por um processo de aquecimento, deixando um buraco em seu lugar. Este buraco é que poderá ser

ocupado pelo gás em uma bomba de sorção. O diâmetro destes buracos está na ordem de 3×10^{-10} a 10^{-9} m, sendo que a zeolita mais usada tem buracos na ordem de 5×10^{-10} m, ordem do diâmetro da molécula de nitrogênio.

As bombas de sorção só podem ser usadas em trabalhos com vácuo grosseiro e médio, pois não têm capacidade para reter as moléculas aprisionadas em seu interior em condições de alto vácuo.

Uma bomba de sorção necessita para a sua operação, além do recipiente com zeolita, de refrigeração com a cerca de -200 °C, que é feita com nitrogênio líquido. Um recipiente contendo 2 kg de zeolita pode bombear um sistema com 28 litros à pressão atmosférica, até atingir 10^{-1} Torr, em 15 minutos. A pressão final que pode ser atingida é de cerca de 2×10^{-2} Torr.

As principais vantagens deste tipo de bomba frente às bombas mecânicas é o fato de não produzir trepidação ou barulho, além de ser uma bomba limpa. A principal desvantagem é a necessidade do nitrogênio líquido para a refrigeração, uma estrutura que não é muito comum. Além disto ela tem baixa eficiência para o bombeamento de moléculas pequenas.

3 - Bombas de Alto Vácuo

3.1 - Bombas de difusão

A bomba de difusão já existe a mais de um século, e apesar do desenvolvimento de outras bombas de alto vácuo, como as bombas turbomoleculares, as bombas iônicas e as bombas criogênicas, ela ainda é a de uso mais disseminado. O nome de bomba de difusão não descreve o funcionamento da bomba de forma precisa. Uma bomba de difusão é uma bomba de jato de vapor que transporta o gás pela transferência de quantidade de movimento nas colisões com este jato. Um líquido, o elemento ativo desta bomba, que pode ser óleo ou mercúrio, é aquecido e evaporado. Este vapor sobe por uma espécie de chaminé e sai na forma de jato por algumas tubeiras. A Fig. 11 mostra um esquema de uma bomba de

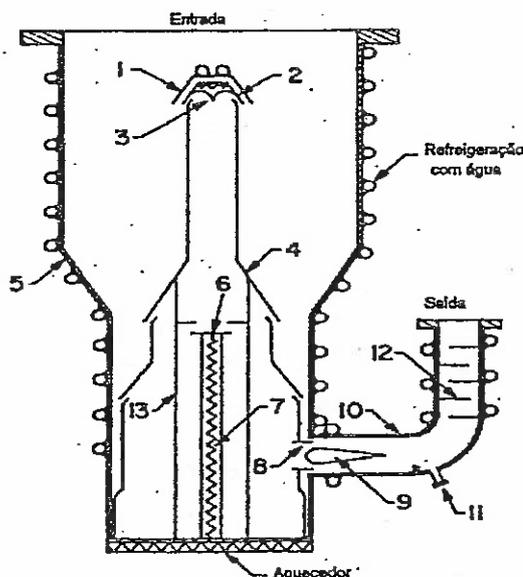


Fig. 11: Esquema de uma bomba de difusão

difusão. As tubeiras, são três neste esquema, direciona o jato de vapor para baixo e contra as paredes internas do corpo, que são refrigeradas. O vapor condensa nas paredes e escorre de volta para o evaporador. O jato de vapor é supersônico até atingir a parede. Os gases que se difundem nesta região do jato supersônico, ganham, em média, uma quantidade de movimento para baixo, sendo levados para uma região de pressão mais alta, caracterizando uma compressão. Bombas modernas possuem vários estágios de compressão, em geral de três a quatro. Cada estágio comprime sucessivamente o gás para regiões de pressão mais alta que no estágio precedente, sendo transportado em direção à saída. Na Fig. 12 abaixo fica mais claro o funcionamento descrito.

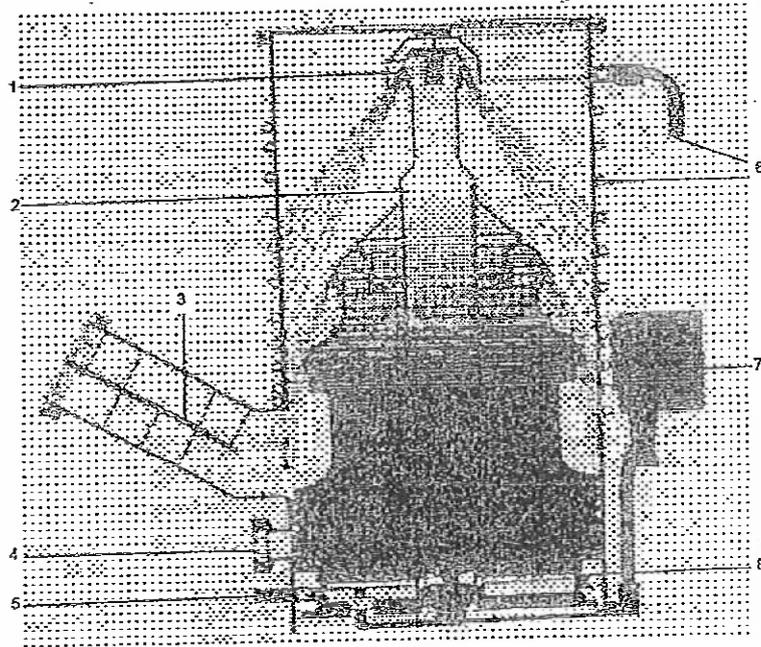


Fig. 12: Esquema do princípio de funcionamento de uma bomba difusora. 1- tubeira; 2- chaminé; 3- anteparo de saída; 4- visor do nível do líquido; 5- Entrada de ar comprimento pra refrigeração rápida; 6- tubulação de água para refrigeração; 7- chave de proteção térmica; aquecedor.

Como foi descrito anteriormente, uma bomba de difusão necessita de uma bomba mecânica de retro bombeamento. As moléculas que são comprimidas contra o fundo da bomba de difusão são retiradas pelo bombeamento pela bomba mecânica.

Embora as moléculas de óleo evaporadas em uma bomba de difusão a óleo sejam muito maiores e mais pesadas que as moléculas do gás a ser bombeado, a densidade do vapor é muito baixa, tornando este tipo de bomba ineficiente para pressões acima de 10^{-2} Torr.

Para evitar que o vapor de óleo suba ao sistema que está sendo evacuado, existe sempre a necessidade de uma refrigeração eficiente e, também, em geral, coloca-se um anteparo refrigerado sobre a entrada da bomba. Uma armadilha refrigerada à temperatura do nitrogênio líquido, entre a bomba de difusão e a câmara de vácuo, também é muito útil para melhorar a eficiência do sistema de bombeamento. Um sistema de bomba de difusão com uma armadilha de nitrogênio líquido pode atingir até cerca de 10^{-8} Torr.

Uma curva típica da velocidade de bombeamento de uma bomba difusora é mostrado na Fig. 13. As quatro regiões de operação de uma bomba difusora são indicadas e são a região de velocidade de bombeamento constante (S), a região de

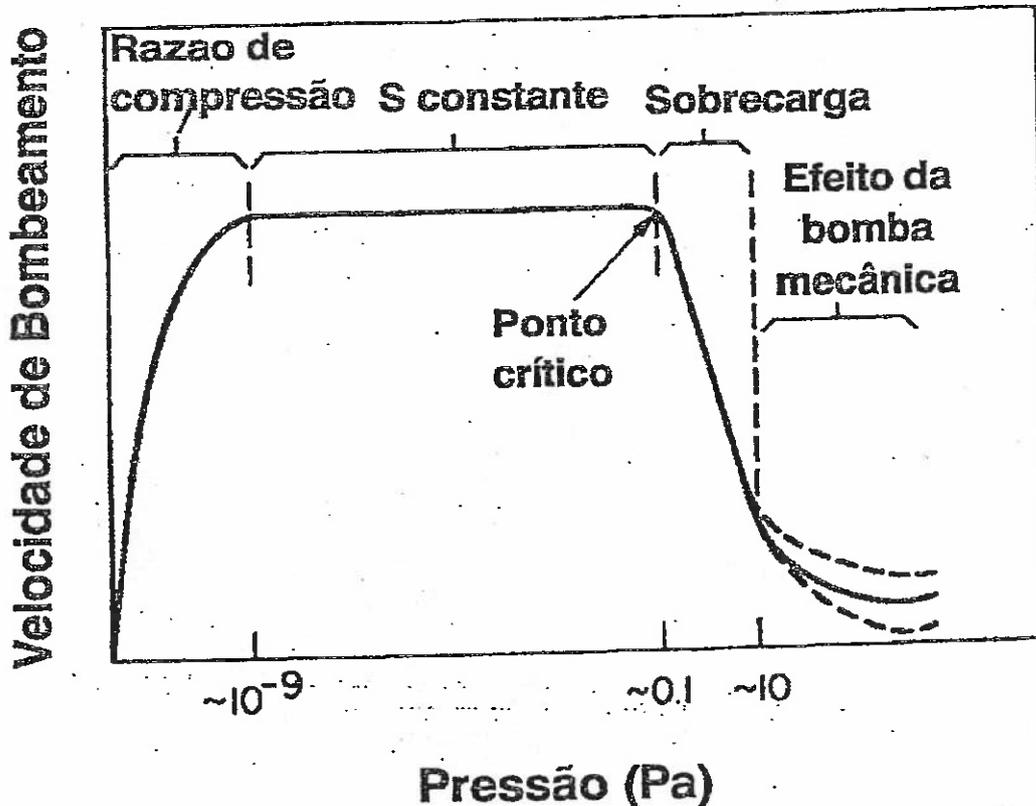


Fig. 13: Velocidade de bombeamento típica de uma bomba difusora

vazão constante (indicada como região de sobrecarga), a região da bomba mecânica e a região de razão de compressão. O ponto caracterizado como ponto crítico corresponde ao ponto em que a tubeira superior falha. Tipicamente, em uma bomba de difusão de 6 polegadas de diâmetro a tubeira superior fica instável em cerca de 10^{-3} Torr, a segunda tubeira fica instável a 3×10^{-2} Torr e a terceira tubeira fica instável a 4×10^{-1} Torr.

3.2 - Bombas Turbo-moleculares

As bombas turbo-moleculares foram introduzidas em 1958, no entanto, o seu desenvolvimento, devido à necessidade da velocidade de giro do rotor ser muito alta, e também devido a outros detalhes construtivos, elas ainda são menos utilizadas que as bombas de difusão. Isto apesar delas oferecerem um melhor desempenho, sem os inconvenientes de haver retorno de óleo para a câmara que está sendo bombeada.

A bomba turbo-molecular funciona em regime de escoamento molecular, com um tipo de turbina molecular formada por lâminas metálicas. Esta turbina compime o gás pela transferência de quantidade de movimento das lâminas, que giram em alta velocidade, para as moléculas. Estas bombas operam com o rotor girando a uma velocidade angular entre 24.000 e 60.000 rpm.

O funcionamento consiste em uma superfície metálica que está girando em alta velocidade com relação a uma outra superfície metálica que está fixa. Dentro de um espaço suficientemente pequeno entre as duas superfícies, as moléculas adquirem quantidade de movimento na direção de movimento da superfície móvel. Considere duas superfícies A e B, como mostrado na Fig. 14, onde a superfície A está em movimento, com velocidade v , e a B está fixa. Uma molécula que se choca com A e é adsorvida, permanece um certo intervalo de tempo aprisionada na superfície e, quando é liberada novamente, é lançada com quantidade de movimento na direção do movimento de A. Esta molécula atinge B e é refletida para A, que, por sua vez, a lança novamente. Este processo, ocorrendo sucessivamente, faz com que a molécula siga na direção do movimento. Num gás em regime molecular de escoamento, este efeito causa um diferencial de pressão.

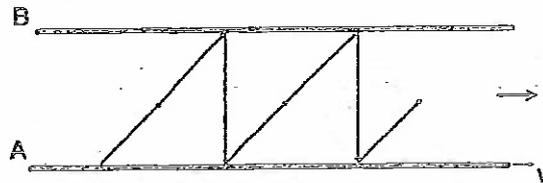


Fig. 14: Efeito de uma superfície em movimento sobre as moléculas de um gás em regime molecular

Em uma bomba turbo-molecular, as moléculas entram na região da turbina por difusão e, após se chocarem com as lâminas metálicas adquirem movimento na direção da saída da bomba. As lâminas desta turbina têm um ângulo tal que lançam as moléculas nesta direção, conforme representado na Fig. 15. Cada conjunto de lâminas provoca um determinado diferencial de pressão e, por isto, uma cascata deste conjunto de lâminas é necessário.

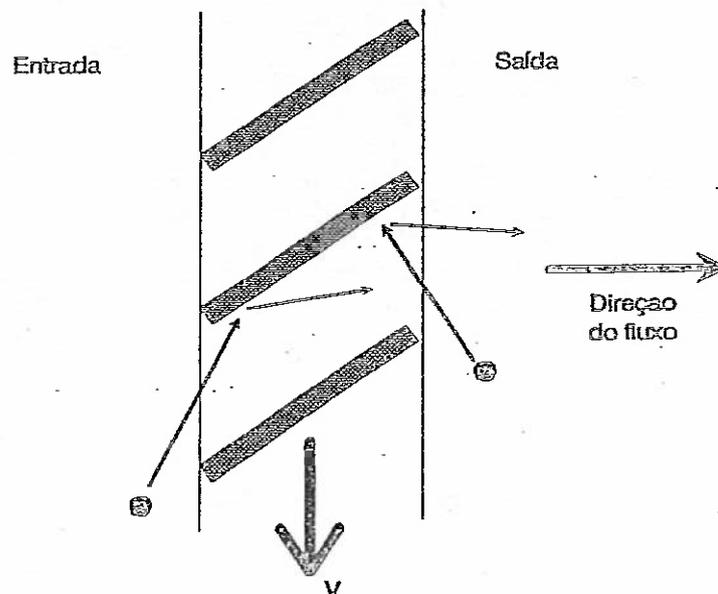
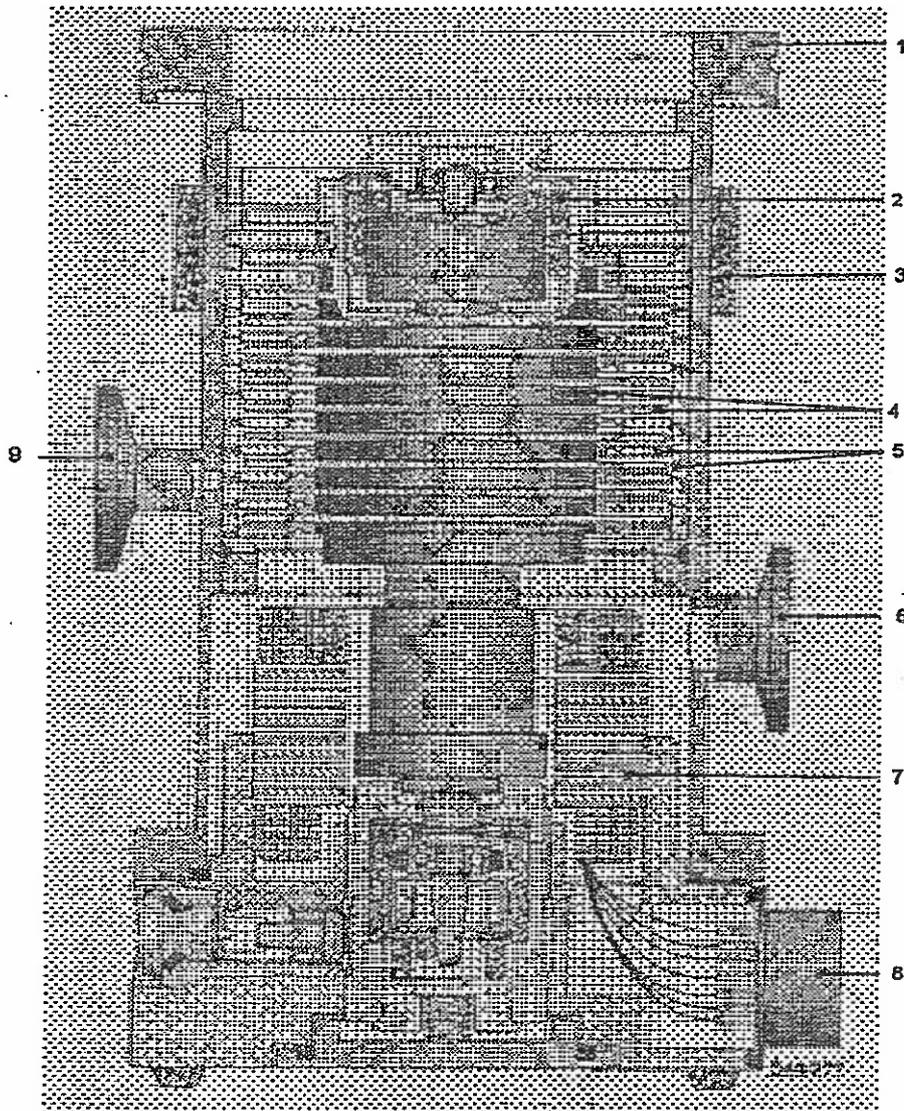


Fig. 15: Efeito das lâminas sobre as moléculas em uma bomba turbo-molecular

Uma bomba turbo-molecular típica é mostrada na Fig.16. Esta bomba turbo-molecular tem sua turbina girando em torno de um eixo vertical. As bombas mais recentes têm seu eixo rodando com acoplamento por levitação magnética. Existem também outros tipos de bomba turbo-molecular, cujo eixo da turbina gira em torno de um eixo horizontal. No entanto, estas últimas tendem a ter mais problemas de alinhamento, balanceamento e outros problemas mecânicos, o que leva a uma tendência de fabricação apenas das bombas de eixo vertical.



- | | |
|---------------------------------|----------------------------------|
| 1. Conexão de alto vácuo; | 6. Conexão de retro bombeamento; |
| 2. Rolamento de ímã permanente; | 7. Motor; |
| 3. Aquecedor; | 8. Conexão elétrica; |
| 4. Rotor; | 9. Conexão de areação. |
| 5. Estator; | |

Fig. 16: Bomba turbo-molecular

A grande vantagem deste tipo de bomba é que produz um vácuo limpo, sem vapor de óleo e alcança ultra alto vácuo. Uma curva típica de sua velocidade de bombeamento em função da pressão é mostrada na Fig. 17. Entretanto, sua manutenção e alinhamento é difícil, dependendo, em geral, de assistência técnica muito especializada.

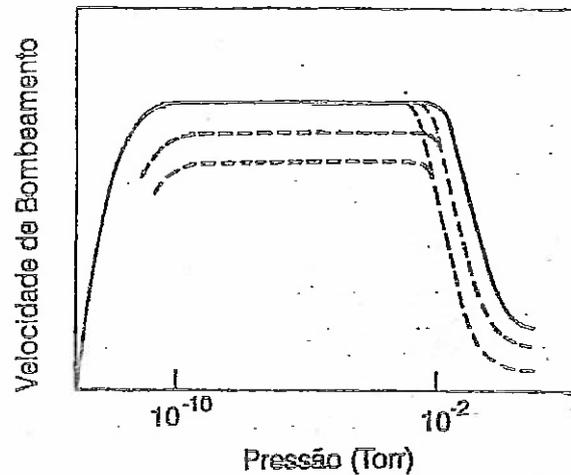


Fig. 18: Velocidade de bombeamento típica de uma bomba turbo-molecular

3.3 - Bomba iônica

A bomba iônica mais convencionalmente usada é a do tipo orbitron, que consiste de uma carcaça cilíndrica, com um anodo central feito de tungstênio e um catodo concêntrico. Em uma das extremidades é colocado um filamento aquecido que injeta elétrons na região entre o anodo e o catodo. Estes elétrons, colidindo com as moléculas do gás que está sendo bombeado, as ioniza. Estes elétrons circulam em torno do anodo, devido ao campo elétrico cilíndricamente simétrico, o que favorece uma maior taxa de ionização. Os íons gerados nestas colisões são atraídos para as superfícies do anodo e do catodo. As superfícies são recobertas com um material com propriedade de reter as moléculas que adsorvem na superfície, como por exemplo o titânio

Esta bomba necessita de um pré-vácuo da ordem de 10^{-4} Torr para evitar que ocorra uma descarga entre o anodo e o catodo. As bombas iônicas mais modernas podem alcançar um vácuo de até 10^{-14} Torr. Um esquema básico desta bomba é mostrado na Fig. 19.

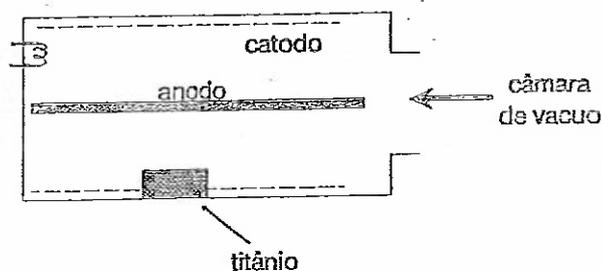
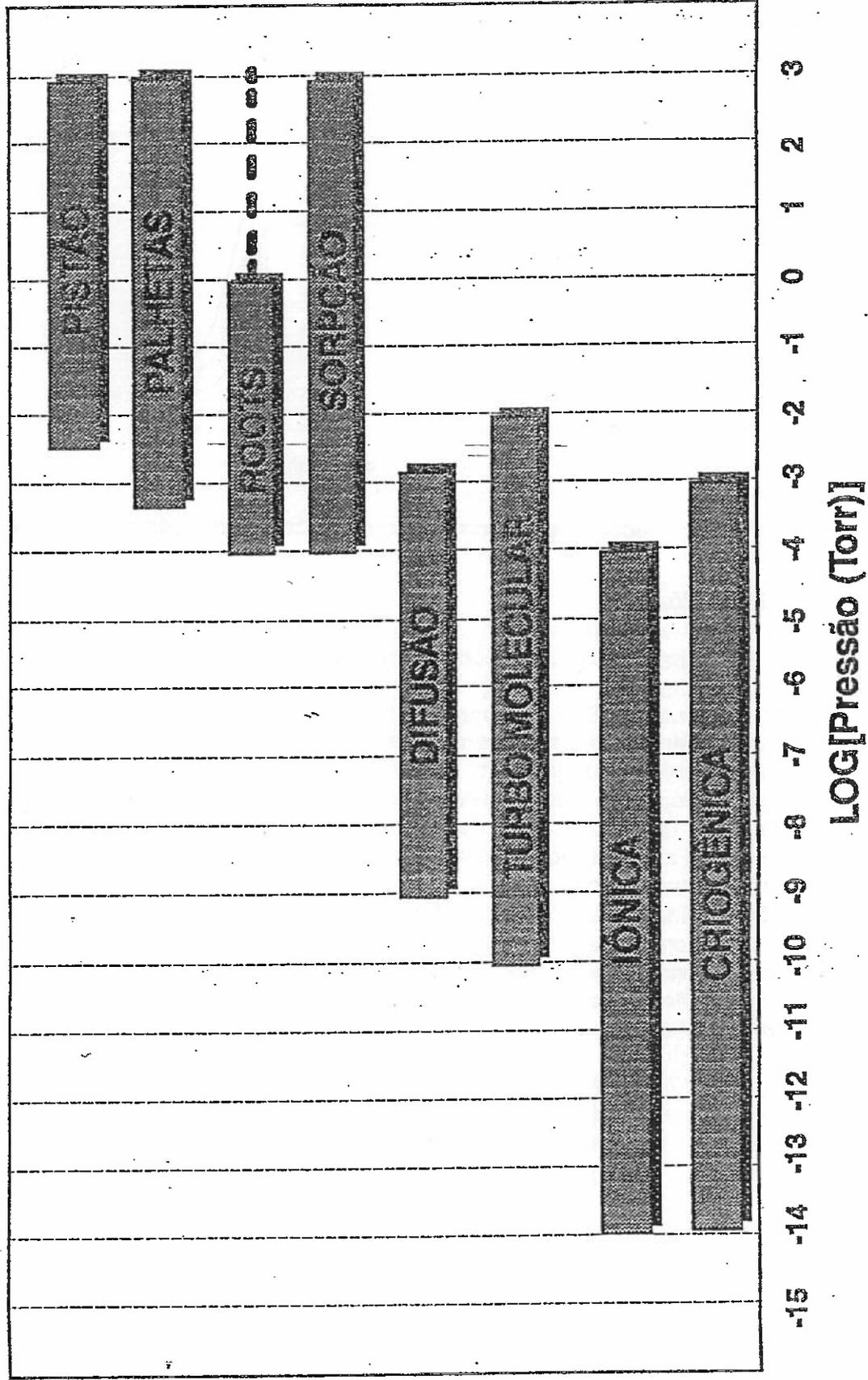


Fig. 19: Bomba iônica tipo orbitron

Resumo das bombas de vácuo e sua faixa de utilização



MEDIDORES DE VÁCUO

1 - Introdução

Existem mais de 20 tipos diferentes de medidores de vácuo, sendo que cada um é mais indicado para um determinado tipo de uso ou faixa de pressão a ser medida. Não existe um único medidor que possa ser usado desde a pressão atmosférica até a região de alto vácuo, e, em geral usam-se dois ou mais tipos diferentes de medidores em um sistema de vácuo.

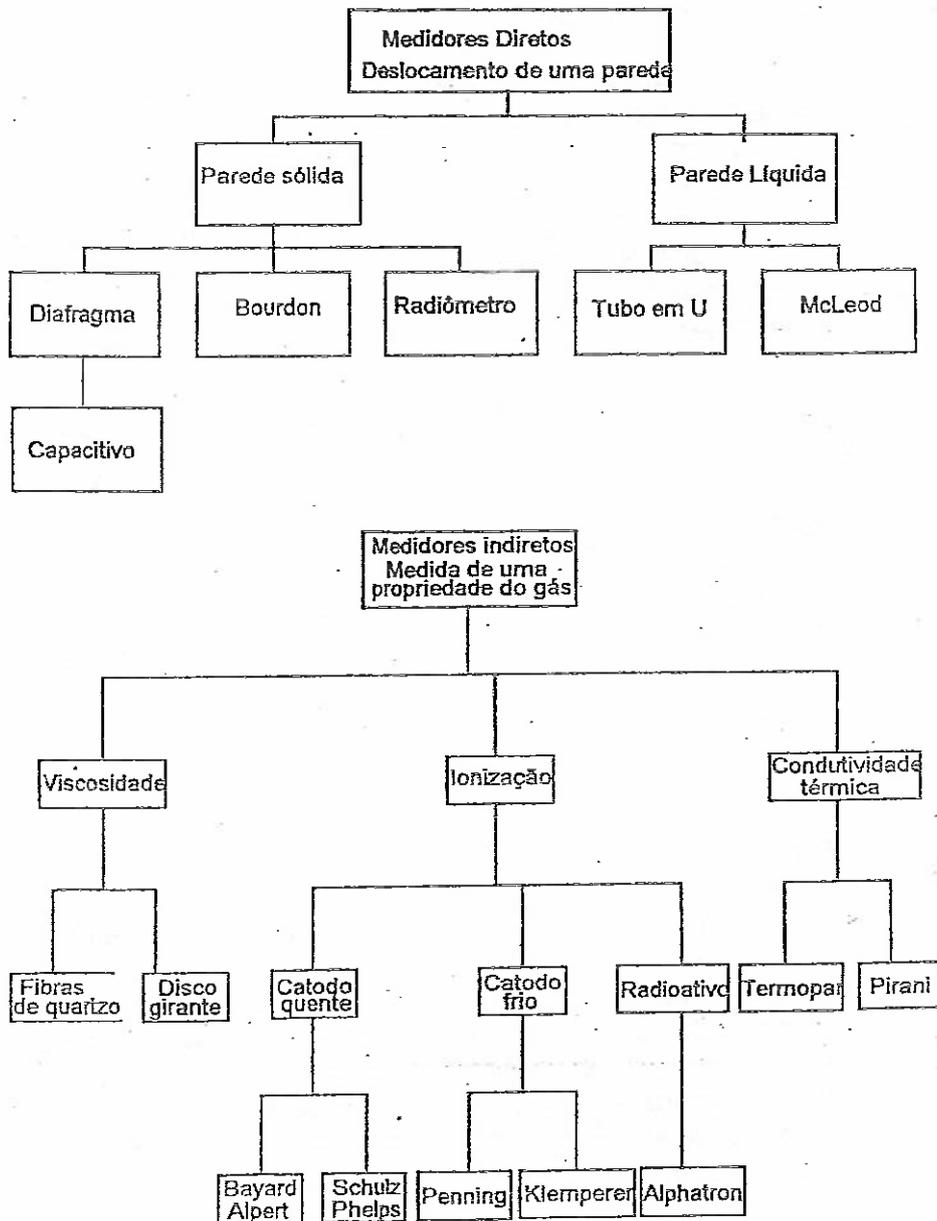


Fig. 1: Classificação dos medidores de pressão

A Fig. 1 mostra um resumo geral da classificação dos medidores de pressão. Os medidores se dividem basicamente em medidores diretos, que medem o deslocamento de uma parede devido à força exercida pela pressão; e medidores indiretos, que medem uma determinada propriedade do gás que depende de sua pressão, como a condutividade térmica ou a ionização. Dos medidores assim classificados, vamos descrever apenas aqueles de maior utilização.

2 - Medidores diretos

Medidores Bourdon e de Diafragma

O medidor Bourdon consiste basicamente de um tubo flexível recurvado, como mostrado na Fig. 2. Uma das extremidades do tubo é ligada ao sistema de vácuo enquanto a outra é fechada. O tubo é conectado por uma série de alavancas e engrenagens a um ponteiro. Quando há uma mudança de pressão no interior do tubo a sua curvatura se modifica o que causa uma mudança da indicação do ponteiro numa escala calibrada em unidades de pressão (em geral Torr ou mbar)

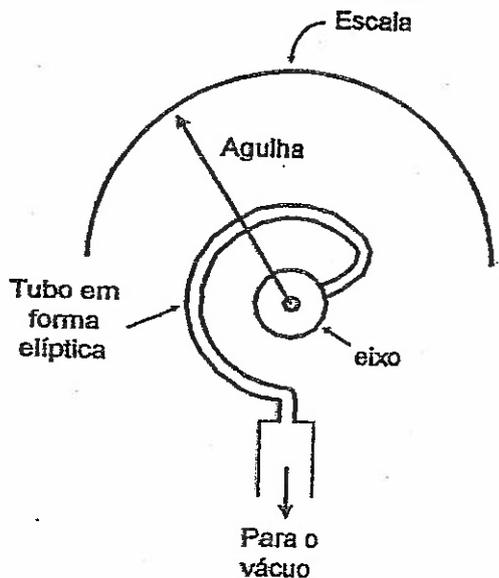


Fig. 2: Medidor tipo Bourdon

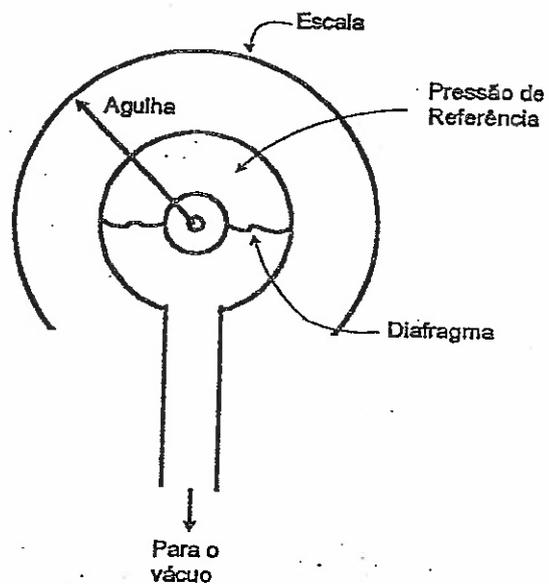


Fig. 3: Medidor de diafragma

No medidor de diafragma, ilustrado na Fig. 3, a pressão causa uma deformação no diafragma. Como no medidor Bourdon, o movimento de deformação do diafragma corresponde ao deslocamento de um ponteiro que se move sobre uma escala calibrada em unidades de pressão.

Os medidores de Bourdon e de diafragma são adequados para medidas num intervalo entre a pressão atmosférica e alguns décimos de Torr. A calibração da escala desses medidores independe do gás ou mistura de gases que está sendo medida.

Manômetros de Tubo Aberto e de Tubo Fechado

Um dos medidores de vácuo mais simples que se pode construir é o manômetro aberto em forma de U. Este instrumento consiste de um tubo de vidro recurvado no interior do qual se coloca uma certa quantidade de mercúrio, como mostrado na Fig. 4. Uma das extremidades do tubo é

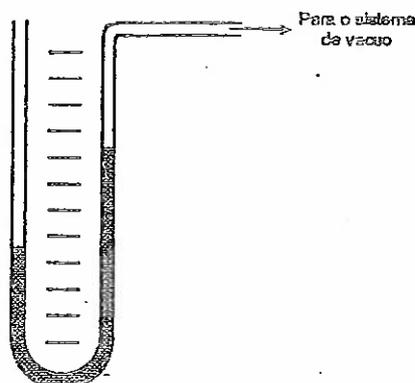


Fig. 4: Tubo em U aberto

conectada ao sistema de vácuo enquanto a outra é aberta à pressão atmosférica. Quando se estabelece o vácuo no sistema o nível de mercúrio no braço esquerdo sobe. A pressão do sistema é dada pela diferença h entre os níveis, sendo dada por

$$P_s = P_o - \rho gh$$

onde P_o é a pressão atmosférica, ρ é a densidade do mercúrio e g é a aceleração da gravidade.

O valor de h é lido em uma escala graduada colocada atrás do tubo. A precisão na leitura de P_s é limitada pela precisão da escala graduada. De um modo geral, a determinação de h com uma incerteza menor que 1 mm é difícil, motivo pelo qual a precisão deste tipo de instrumento é limitada em cerca de 1 torr.

Nos manômetros de tubo aberto tanto pode ser utilizado mercúrio como óleos de baixa pressão de vapor. Como os óleos tem valores de ρ de 7 a 15 vezes menores que o mercúrio, os manômetros de óleo são bem mais sensíveis. Porém estes últimos se aplicam a medidas que são apenas um pouco abaixo da pressão atmosférica, pois, caso contrário eles teriam que ter dimensões muito maiores que os de mercúrio, não sendo práticos.

Um aperfeiçoamento do manômetro descrito acima é o manômetro de tubo fechado, mostrado na Fig. 5. Neste manômetro o mercúrio é colocado com o tubo em vácuo. Desta forma a pressão do gás sobre o mercúrio, na extremidade fechada é desprezível se comparada com qualquer pressão a ser medida. Portanto a pressão que se quer medir será diretamente proporcional ao desnível de mercúrio entre os dois lados:

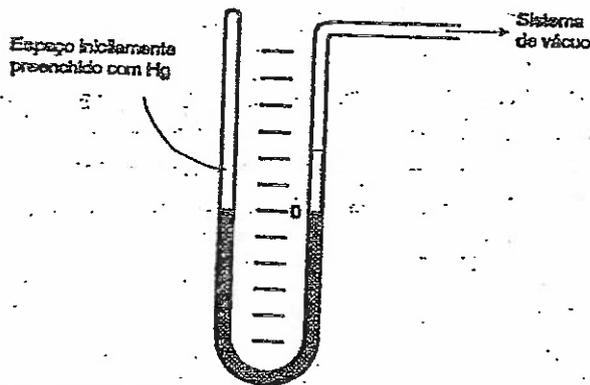


Fig. 5: Tubo em U fechado

$$P_s = \rho gh \quad (2)$$

A sensibilidade da leitura de P_s num manômetro de tubo fechado poderá ser aumentada se um de seus braços for inclinado de um ângulo α conforme mostra a Fig. 6. Neste caso

$$P_s = \rho gh \text{ sen} \alpha$$

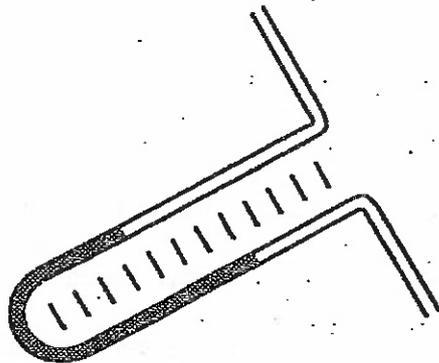


Fig. 6: Tubo em U inclinado

Manômetros tipo McLeod

Manômetros de mercúrio bem mais sofisticados são os manômetros tipo McLeod. Com estes instrumentos, pressões num intervalo entre 10 a 10^{-6} Torr podem ser medidas. Existe uma enorme variedade de desenhos destes manômetros que variam conforme o fabricante e o intervalo de pressão a ser medido.

O desenho da Fig. 7 representa uma construção das mais simples de um manômetro de McLeod. A extremidade superior do tubo é conectada ao sistema de vácuo, enquanto o mercúrio do reservatório está inicialmente à pressão atmosférica. Quando se faz vácuo no sistema, o mercúrio é empurrado para cima pela diferença de pressão e começa a encher o bulbo, de modo que o gás, inicialmente presente no seu interior, sofre uma

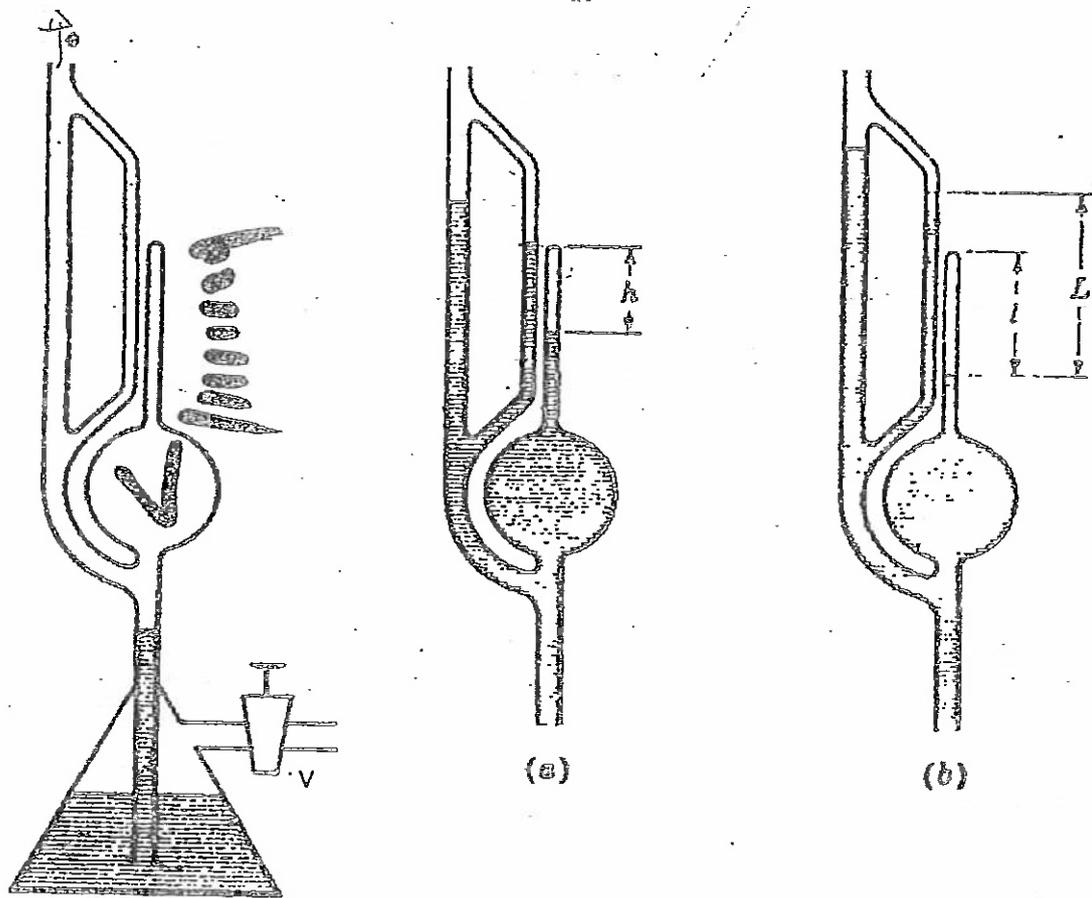


Fig. 7: Medidor tipo McLeod

compressão. Controlando a entrada de ar no reservatório, através da válvula V, pode-se fazer com que o nível de mercúrio do lado direito do braço duplo coincida com o topo do capilar associado ao bulbo (Fig. 7a). Neste caso, a pressão do gás (P_S) no tubo aberto, está relacionada com a pressão P_f do gás comprimido no bulbo, pela fórmula

$$P_S + \rho gh = P_f \quad (1)$$

onde ρ é a densidade do mercúrio e h é a diferença dos níveis. A pressão P_S está também relacionada com P_f através da equação de transformação à temperatura constante para um gás ideal

$$P_S V = P_f V_f \quad (2)$$

onde V é o volume do bulbo com o capilar e V_f é o volume de gás dentro do capilar após a compressão. Chamando de A a área da seção reta do capilar, temos

$$V_f = Ah \quad (3)$$

Substituindo a equação (3) em (2), e combinando a equação resultante com (1) resulta em

$$P_S = \frac{\rho Ah}{V - Ah} h^2$$

Nos medidores de McLeod $V \gg Ah$, o que implica que a pressão tem dependência quadrática com h .

Pode-se também operar o manômetro de McLeod de outra forma. Faz-se o mercúrio subir no capilar até uma altura pré-determinada l do topo (Fig. 7b). A diferença entre os níveis é L . Por uma dedução análoga à anterior pode-se concluir que

$$P_s = \frac{\rho g l A}{V} L,$$

ou seja, que a pressão a ser medida é diretamente proporcional a L .

É preciso ter um cuidado especial quando se trabalha com vapores em manômetros de McLeod. Durante o estágio da compressão no capilar, os vapores podem se condensar, o que resulta em valores errôneos na leitura da pressão.

Manômetro capacitivo (baratron)

Um manômetro capacitivo é simplesmente um medidor de diafragma no qual a deflexão do diafragma é medida pela observação da variação da capacitância entre este diafragma e outros eletrodos fixos.

A capacitância entre o diafragma e os eletrodos fixos depende da geometria do sensor, ou seja, de sua área e dos espaçamentos, e também, da constante dielétrica do gás que está sendo medido. A medida da variação da capacitância para a medida de pressão representa uma medida verdadeiramente absoluta, ou seja, a pressão pode ser calculada a partir da geometria e pela observação da variação da capacitância. Um medidor de uma única entrada, que tem a sua pressão de referência em vácuo, não depende da constante dielétrica do gás.

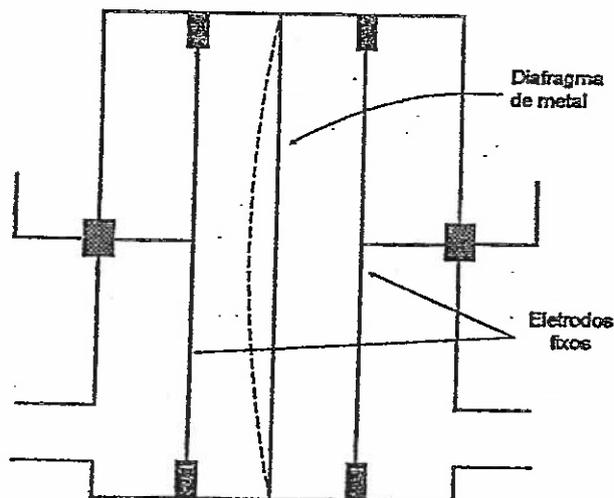


Fig. 8: Transdutor de um manômetro capacitivo

Medidores capacitivos modernos têm duas partes, um transdutor e um módulo eletrônico que converte a capacitância em um sinal linearmente proporcional à pressão. Um esquema comum do transdutor destes medidores capacitivos é mostrado na Fig. 8. O diafragma de metal que é soldado na carcaça do medidor, dividindo-o em duas câmaras, é flexível e se deforma de acordo com o diferencial de pressão entre as duas câmaras. Estando entre dois eletrodos fixos, sua deformação provoca a variação da capacitância.

3 - Medidores indiretos

Medidor Tipo Pirani

O princípio físico de funcionamento de um medidor de vácuo tipo Pirani é o da condutividade térmica dos gases. Um filamento é aquecido por uma corrente elétrica na atmosfera do gás cuja pressão se quer medir. Devido à presença do gás, o filamento irá dissipar energia térmica por condução. A dissipação será tanto maior quanto maior for a pressão. Conseqüentemente a temperatura do filamento é uma função da pressão, decrescendo monotonicamente com a mesma. Na Fig. 9 está mostrada uma

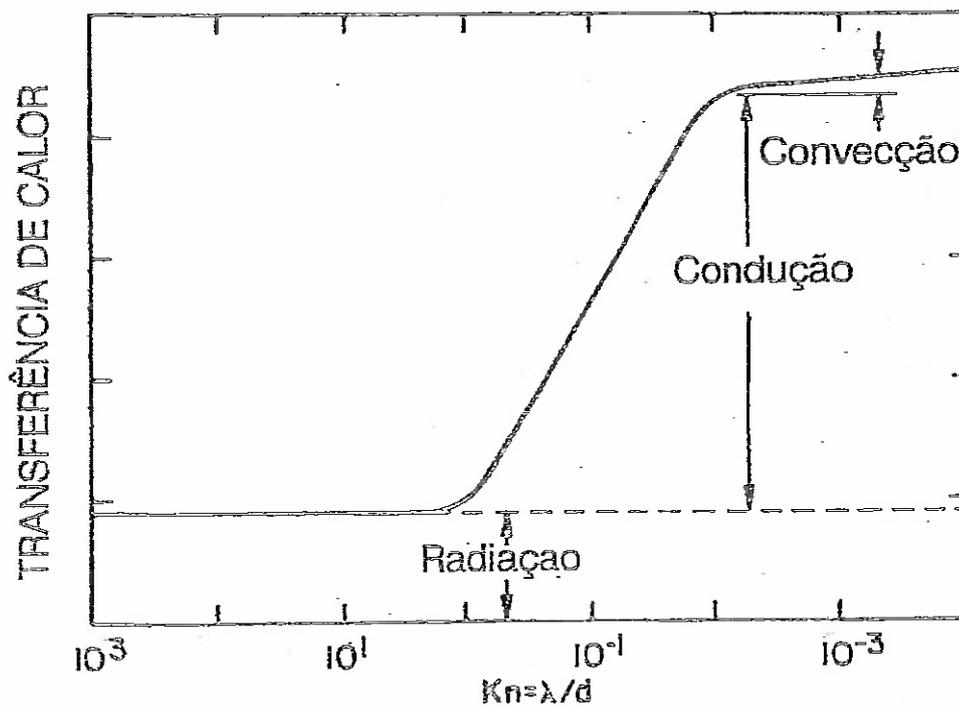


Fig. 9: Curva típica de transferência de calor por um gás

curva típica da transferência de calor por um gás, em função do número de Knudsen, a razão entre o caminho livre médio λ e uma distância típica do sistema d . Estão também especificados na figura os processos de transferência de calor dominantes. Note, por este gráfico, que um medidor baseado na condutividade térmica só tem sensibilidade na região onde a condução é o processo dominante de transferência de calor, ou seja, tem uma faixa limitada de operação.

Em princípio, para um determinado filamento e um dado gás poderemos determinar experimentalmente o gráfico $P \times T$, onde P é a pressão e T é a temperatura do filamento. A esse gráfico chamaremos de curva de calibração. De um modo geral, a curva de calibração de um medidor Pirani não é $P \times T$, mas P em função da resistência elétrica R do filamento. Esses dois gráficos são, na realidade, equivalentes, uma vez que a resistência elétrica de um condutor é uma função da sua temperatura.

A Fig. 10a mostra o sensor (ou cabeça de medição) de um medidor Pirani que consiste de um tubo contendo o filamento, e que se acopla ao

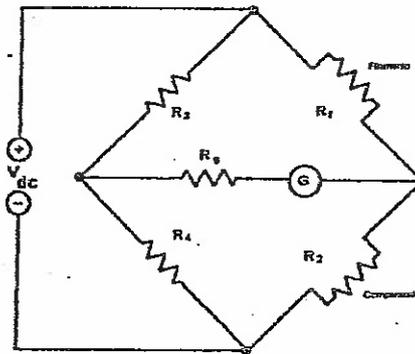
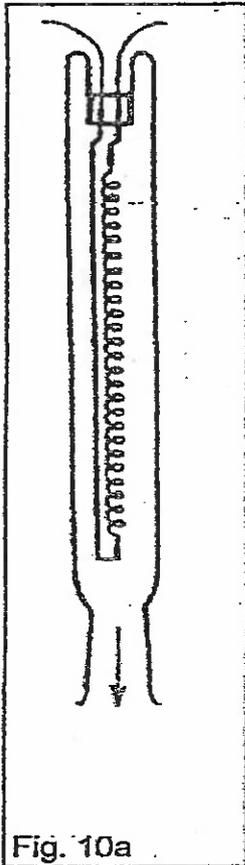


Fig. 10: Medidor tipo Pirani

sistema de vácuo. A Fig. 10b é o esquema do circuito elétrico de medida associado ao sensor. O filamento, de resistência R_f constitui um dos braços de uma ponte de Wheatstone. Os outros braços são R_2 , R_3 e R_4 . R_2 é um resistor idêntico a R_f , encapsulado a vácuo dentro de um tubo de vidro. Este tubo é colocado em posição adjacente a R_f de modo a compensar flutuações

de voltagem na ponte devidas a variações de temperatura na região onde se instala o sensor. R_3 e R_4 são resistores variáveis.

Uma maneira de se medir R_f (e consequentemente determinar P , quando se conhece a curva de calibração) é ajustar os valores de R_3 e R_4 de modo a "zerar" a corrente do galvanômetro G . Neste caso

$$R_f = \frac{R_2 R_3}{R_4}$$

Um outro método consiste em manter R_3 e R_4 constantes e medir a corrente no galvanômetro. A voltagem através da ponte deve ser agora mantida constante. O galvanômetro poderá ser zerado à pressão atmosférica. Consequentemente, a um aumento em R_f , o que ocorre quando a pressão diminui, corresponderá um aumento na corrente do galvanômetro, cuja escala poderá ser calibrada diretamente em unidades de pressão.

O fato de que a condutividade térmica varia conforme o gás implica em curvas de calibração distintas para diferentes gases. Exemplo desta calibração para diferentes gases é mostrado na Fig. 11. É claro que quanto maior for a condutividade térmica de um gás, menor será a temperatura do filamento para um mesmo valor de P . De um modo geral a escala de um medidor Pirani é calibrada para o nitrogênio.

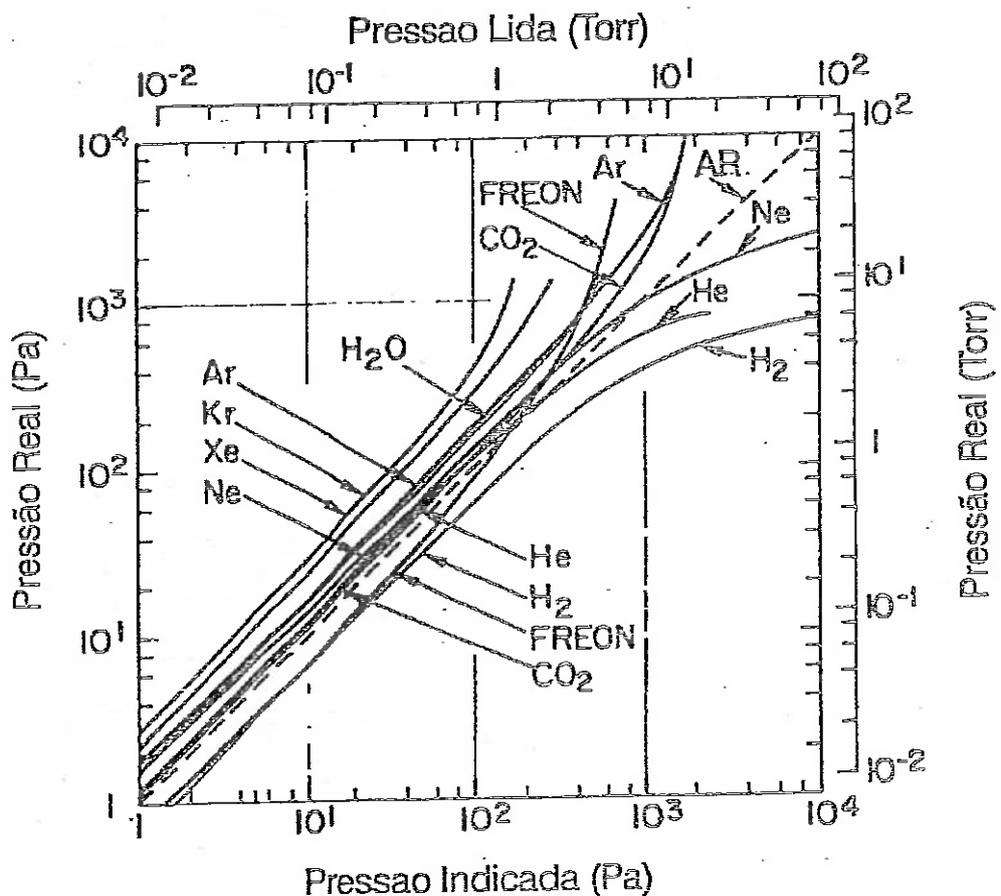


Fig. 11: Curvas de calibração de um medidor Pirani típico

O filamento de um medidor Pirani é, geralmente, feito de um fio de tungstênio, níquel ou platina, cujo diâmetro varia entre 0,005 e 0,1 mm, sendo enrolado numa espiral de diâmetro 0,5 a 2 mm, com um passo de pelo menos 10 diâmetros do fio. Uma configuração desse tipo proporciona trocas de calor com o gás com grande eficiência.

A escala de pressão dos medidores Pirani são comprimidas nos extremos devido a perda de linearidade. Em geral, a parte mais confiável da escala se estende de 5×10^{-3} até 5×10^{-1} Torr.

Medidor tipo Termopar.

Os medidores do tipo Termopar, como os medidores Pirani, funcionam segundo as variações de temperatura de um filamento, causadas pelas variações da pressão. Ou seja, também está baseado no princípio da condutividade térmica. Enquanto no medidor Pirani a determinação da

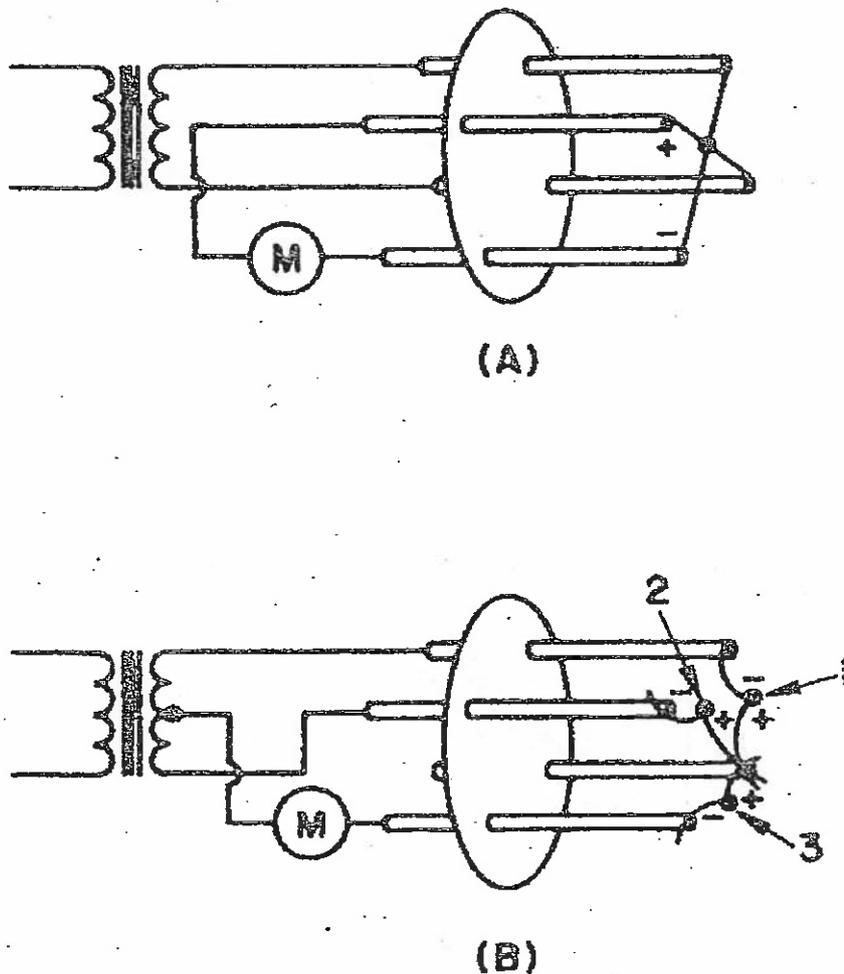


Fig. 12: Medidor tipo Termopar

pressão é feita em função da resistência do filamento, no medidor de Termopar a pressão é medida em função de uma voltagem gerada termicamente, por um par de fios de materiais diferentes, que formam um par termoelétrico, ou seja, um termopar. A voltagem gerada é medida com um milivoltímetro e sua escala é calibrada para a medida de pressão.

A Fig. 12a mostra esquematicamente o sensor de um medidor Termopar sem compensação, e a Fig. 12b mostra um medidor termopar com compensação. Esta compensação é feita por um segundo termopar que mede a temperatura ambiente.

Frequentemente, o filamento de um medidor Termopar é de platina ou de platina-irídio, na forma de uma tira fina e estreita. Os fios do par termoelétrico são, em geral feitos de ligas de "Nichrome", "Eureka" e "Advance". Medidores de Termopar comercialmente disponíveis podem medir pressões no intervalo entre 20 a 10^{-3} Torr.

Medidores de Ionização de Catodo Quente

Um dos medidores de ionização de catodo quente de construção mais simples é o medidor de Schulz e Phelps. Um esquema de seu princípio de funcionamento é mostrado na Fig. 13. Esse medidor consiste de duas

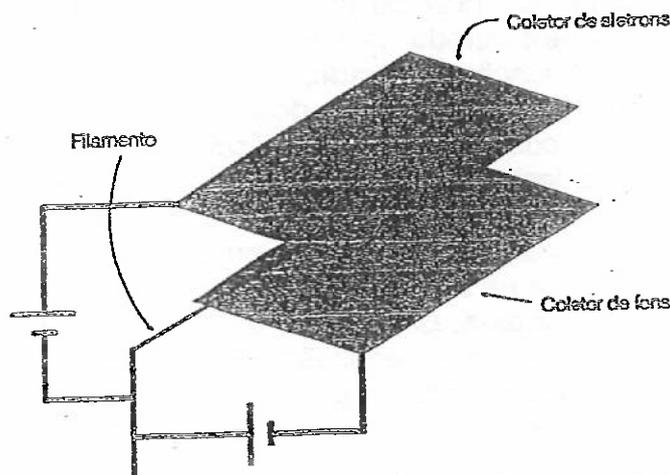


Fig. 13: Esquema de um medidor de Schultz - Phelps

pequenas placas metálicas e de um filamento reto (catodo) entre ambas. A placa superior, o coletor de elétrons, é mantida a um potencial positivo com relação ao filamento. O potencial da placa inferior, o coletor de íons, é negativo. O filamento é aquecido a uma temperatura muito alta por uma corrente elétrica de modo que emite elétrons, por emissão termiônica.

Devido ao campo elétrico, os elétrons provenientes do catodo são acelerados em direção à placa superior, causando, por um processo de colisões, a ionização das moléculas do gás. Os íons positivos assim formados, são então coletados na placa inferior. Pela medida da corrente i^+ dos íons coletados (o que pode ser feito através de um microamperímetro) se obtém a pressão P . A dependência entre i^+ e P é dada pela relação

$$i^+ = sP,$$

onde i^+ é a corrente de elétrons emitidos pelo catodo e s é um fator denominado de sensibilidade do medidor. s depende da geometria do medidor, isto é, tamanho e posição relativa das placas e filamento, bem como seus respectivos potenciais. s depende também da natureza do gás.

Tipicamente o intervalo de operação de um medidor de Schulz e Phelps está entre 10^{-5} e 1 Torr.

Um outro tipo de medidor de ionização de catodo quente, capaz de medir pressões no intervalo entre 10^{-3} e 10^{-8} Torr é composto de um filamento emissor de elétrons, de uma placa coletora de íons positivos e de uma grade interposta entre ambos. A grade consiste de um fio fino enrolado em forma helicoidal em torno do filamento, e o coletor de íons (ou anodo) é formado por uma casca metálica de forma cilíndrica. Estes são encapsulados dentro de um tubo, o qual se conecta ao sistema de vácuo. Valores típicos dos potenciais aplicados aos eletrodos são 30 V entre o filamento e o anodo, e 180 V entre o filamento e a grade. Com potenciais dessa ordem de grandeza, todos os elétrons emitidos pelo filamento irão atingir a grade. Muitos desses elétrons entretanto irão, primeiro, oscilar em torno da grade em trajetórias oscilatórias. Os íons positivos formados entre a grade e o anodo, serão coletados pelo anodo. A corrente iônica, i^+ , é diretamente proporcional à pressão. A função da grade, nesse tipo de medidor, é a de induzir um percurso mais longo na trajetória dos elétrons, aumentando, desta forma a probabilidade de colisão com as moléculas do gás. Disso resulta uma maior eficiência na ionização do gás. Conseqüentemente, pressões mais baixas poderão ser medidas.

Os medidores de ionização de catodo quente com anodo cilíndrico apresentam um limite inferior na leitura da pressão que é da ordem de 10^{-8} Torr, devido a emissão de raios-X. Esse efeito é causado pelos elétrons que ao atingirem a grade provocam a emissão de raios-X. Os raios-X, ao alcançarem o anodo, causam o efeito inverso, ou seja, a ejeção de elétrons, o que irá produzir uma corrente de anodo de mesmo sentido que a corrente dos íons coletados. A corrente de anodo, i_a^+ , pode, portanto, ser escrita como a soma de duas contribuições:

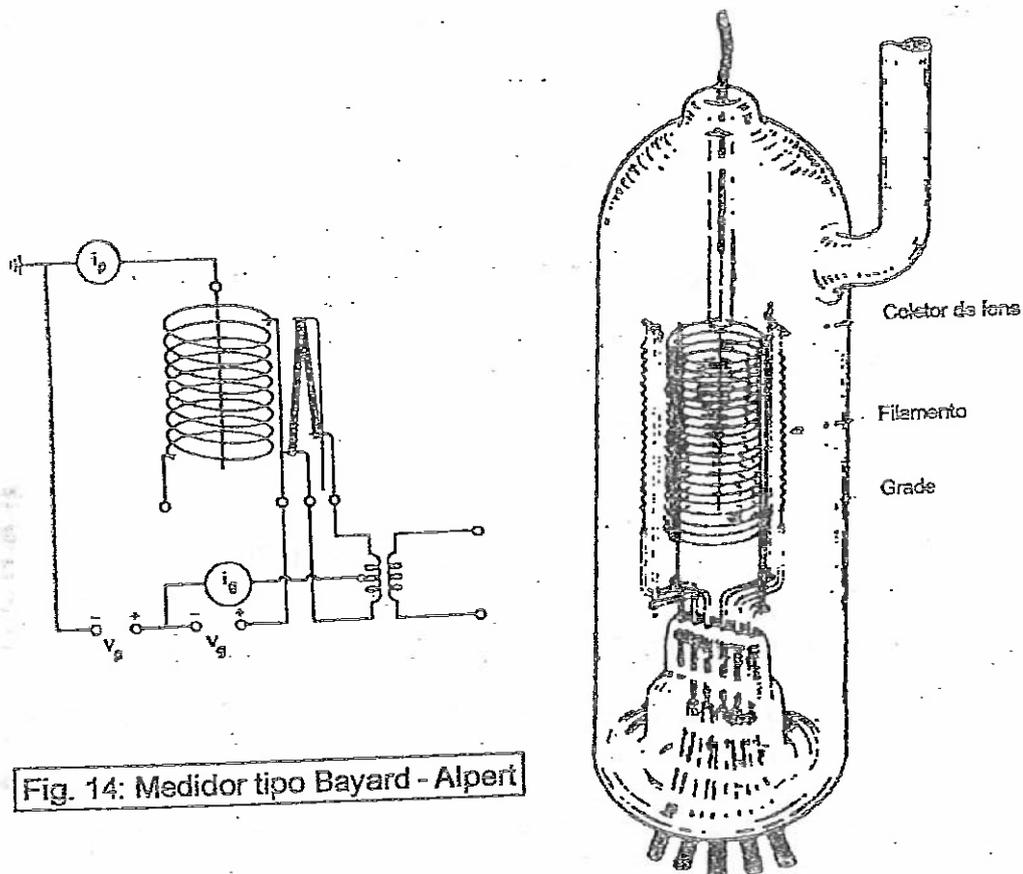
$$i_a^+ = i^+ + i_x^+$$

onde i^+ é a corrente devida somente aos íons positivos coletados e i_x^+ é a corrente devida aos raios-X. Valores típicos de i_x^+ correspondem, a pressões da ordem de 10^{-8} Torr.

Para minimizar o efeito de raios-X Bayard e Alpert construíram um medidor de ionização em que o coletor de íons é um fio muito fino (cerca de 0,01 cm de diâmetro) posicionado dentro da grade, enquanto o filamento (catodo) situa-se fora da mesma, como esquematizado na Fig. 14. O princípio de funcionamento é o mesmo do medidor descrito logo acima.

Como a corrente de raios-X é proporcional à área do coletor, com um fio de 0,01 cm de diâmetro pode-se obter valores de i_x^* cerca de 10^3 vezes menores que no medidor de anodo cilíndrico. Esses valores correspondem a pressões da ordem de 10^{-11} Torr.

Frequentemente os medidores do tipo Bayard-Alpert são equipados com dois filamentos, conforme mostra a Fig. b. A vantagem disso é ter um



filamento de reposição se o outro queimar.

Todos os medidores de ionização apresentam sensibilidades distintas para diferentes gases*. Esse efeito é devido a um parâmetro próprio de cada gás que chamaremos de eficiência de ionização, ϵ . Este parâmetro é definido como o número de íons produzidos por elétron (emitido do filamento) a uma dada energia, por centímetro da trajetória dos elétrons e por Torr. Existem curvas de ϵ para vários gases, em função da energia cinética dos elétrons ionizantes. Todas as curvas tem um máximo próximo de 100 eV. Por esse motivo os medidores de ionização operam, em geral, com potenciais tais que a energia cinética média dos elétrons esteja em torno de 100 eV.

Medidores de Ionização de Catodo Frio

O medidor de ionização de catodo frio utiliza uma combinação de um campo elétrico com um campo magnético para produzir a ionização do gás. O arranjo geométrico de um desses medidores é mostrado na Fig. 15. O campo elétrico é estabelecido entre o anel retangular R (anodo) e as duas placas P

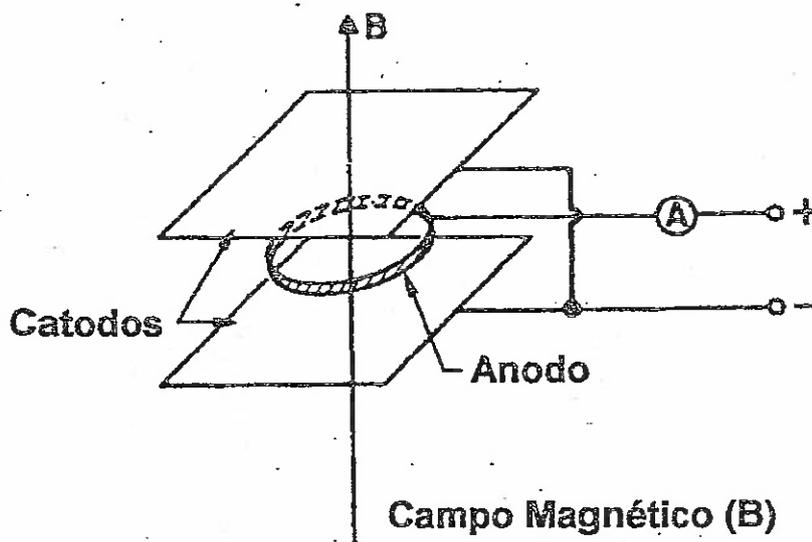


Fig. 15: Esquema de um medidor Penning.

e P_1 (catodos). A diferença de potencial entre o anodo e os catodos é de 2 kV. O campo magnético é fornecido por um ímã permanente. As placas são paralelas às faces das peças polares do ímã, de modo que campo magnético é perpendicular às mesmas. Os eletrodos são encapsulados dentro de um envelope de vidro que se conecta ao sistema de vácuo. Quando se estabelece a ionização do gás, os íons positivos são atraídos pelo catodo. Das suas colisões com o catodo resulta a emissão de elétrons secundários.

O campo magnético impede que os elétrons secundários se dirijam diretamente para o anodo. Ao invés disso, o campo magnético faz com que o movimento dos elétrons entre as placas seja oscilatório, em trajetórias helicoidais. Devido ao longo percurso dos elétrons, a probabilidade de colisão com as moléculas do gás é aumentada de tal forma que a ionização é detectável mesmo em pressões tão baixas quanto 10^{-5} torr. A corrente i^+ dos íons positivos coletados pelos catodos é lida em um microamperímetro, sendo uma função da pressão P .

A curva de calibração de i^+ em função de P depende da geometria interna do medidor. No medidor representado na Fig. 15 (configuração de Penning), i^+ é praticamente linear com P no intervalo entre 10^{-5} e 10^{-3} Torr.

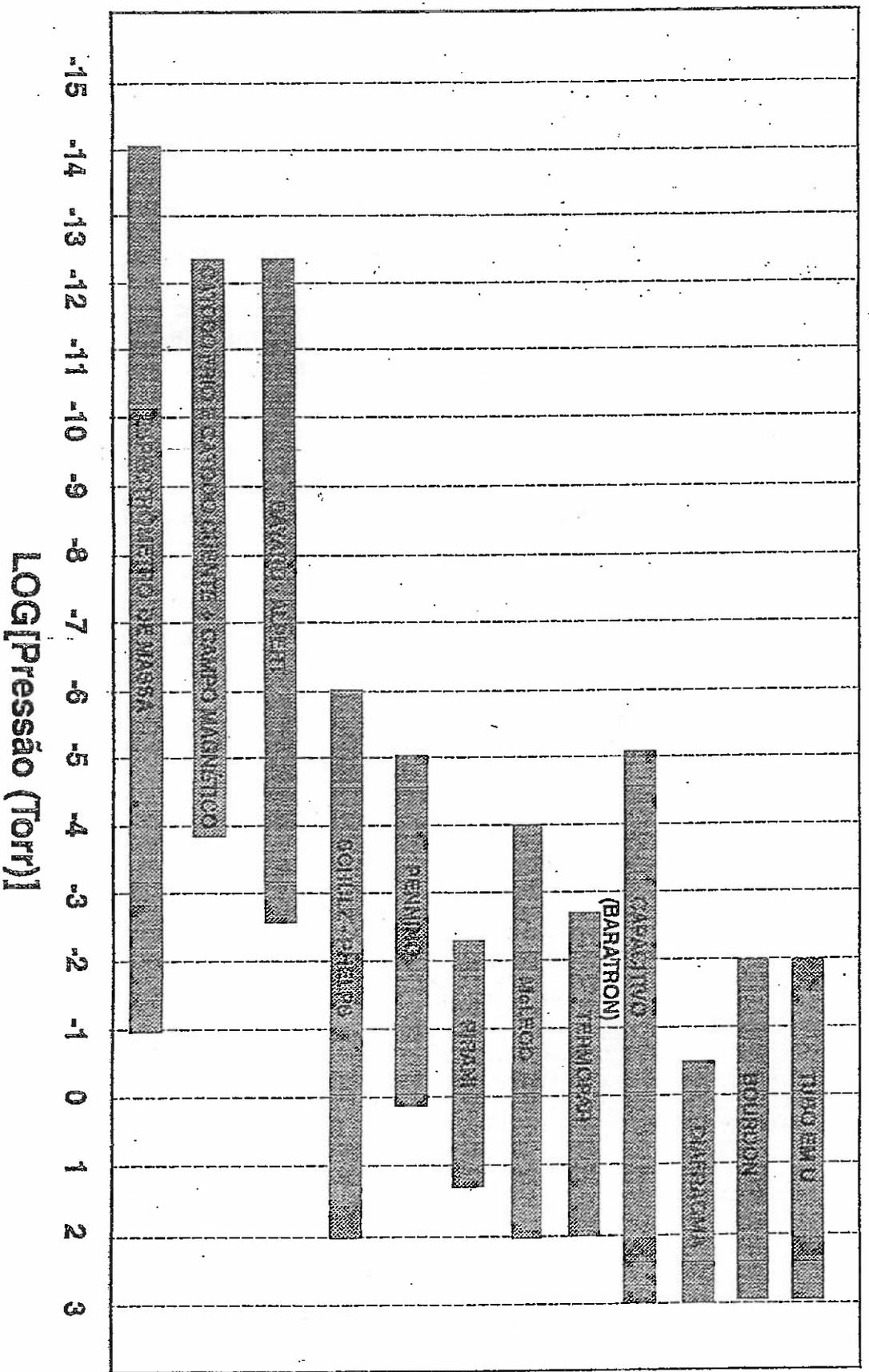
Existem várias configurações distintas de medidores de catodo frio. Klemperer desenvolveu um modelo substancialmente diferente do de Penning, cuja escala se estende a pressões da ordem de 10^{-7} Torr. Esse medidor consiste de um catodo cilíndrico e de um fio axial formando o anodo.

Neste caso o campo magnético é aplicado paralelamente ao anodo, por um ímã permanente que envolve o catodo. Para evitar a interferência de campos elétricos produzidos por cargas eletrostáticas nas paredes do envelope de vidro, o catodo é parcialmente fechado nas suas extremidades por dois diafragmas, com furos que permitem a passagem do anodo. O circuito elétrico de medida é basicamente o mesmo usado num medidor Penning.

Os medidores de ionização de catodo frio não tem, de um modo geral, sensibilidade suficiente para medir pressões menores que 10^{-7} torr. Por outro lado, apresentam outras desvantagens: instabilidade na indicação de i^+ causada por flutuações na carga espacial formada em torno dos eletrodos; a linearidade de i^+ com P não é sempre observada; falta de reprodutividade nas curvas de calibração.

Apesar desses fatores, a simplicidade de construção e de manutenção faz com que esses medidores sejam amplamente usados em sistemas de vácuo quando não for necessária uma determinação precisa pressão.

RESUMO DOS MEDIDORES DE VACUO E SUA FAIXA DE UTILIZAÇÃO



COMPONENTES AUXILIARES PARA SISTEMAS DE VÁCUO

1. INTRODUÇÃO

Essencialmente, um sistema de vácuo é constituído por uma bomba de vácuo, uma câmara onde será retirado o gás para se produzir vácuo e medidores de pressão. Entretanto, existem vários outros componentes auxiliares que desempenham papéis fundamentais na qualidade do vácuo e na pressão final que se deseja alcançar. Como exemplo de componentes auxiliares têm-se: válvulas, filtros, materiais para a câmara, armadilhas para gases, conexões, passadores de corrente, soldagem, óleo de bombas, graxas, seladores, etc.

Para um técnico em vácuo, é importante ter um conhecimento não só dos componentes essenciais de um sistema de vácuo, mas também, dos componentes auxiliares. Nesta apostila, serão apresentados alguns dos principais componentes auxiliares acima citados.

Cada componente de um sistema de vácuo tem uma determinada função. Atualmente, é tamanha a variedade de componentes existentes para se montar um sistema de vácuo, que mesmo um técnico experiente encontra dificuldades em especificá-los corretamente. Entretanto, seguindo algumas linhas gerais básicas e usando o bom senso pode-se montar um sistema de vácuo sem muitas dificuldades. Estas linhas gerais são:

- definir a região de vácuo que se deseja trabalhar
- especificar a qualidade do vácuo
- operacionalidade do sistema
- segurança do sistema
- orçamento disponível

A definição prévia das cinco linhas gerais descritas, define o grau de complexidade que se deve ter no sistema de vácuo e permite especificar com mais precisão, tanto as bombas de vácuo e medidores, como também os componentes auxiliares necessários.

De maneira geral, através da pressão final desejada, pode-se ter uma idéia dos materiais que podem ser empregados para a confecção da câmara de vácuo, do tipo de conexões e vedações que se deve utilizar. Pela qualidade do vácuo pode-se prever o tipo de bomba a ser empregada, o tipo de óleo e graxa a serem usados e a necessidade ou não de armadilhas e filtros para os gases. Pela operacionalidade pode-se, por exemplo, definir o grau de sofisticação das válvulas (manuais, pneumáticas, eletromagnéticas, etc). A segurança do sistema determina o tipo de material, as proteções elétricas e a necessidade de tubulações e bombas especiais para gases perigosos. O item custo (orçamento disponível) influencia todos os demais itens e é, sem dúvida, o fator predominante na maioria dos casos, mesmo não sendo um fator técnico.

2. MATERIAIS PARA A CÂMARA DE VÁCUO

Atualmente, maioria absoluta dos sistemas de vácuo são construídos com materiais metálicos, As propriedades que normalmente são levadas em consideração na escolha do metal a ser utilizado são:

- Facilidade de se trabalhar em tornos, fresas, etc
- Facilidade de soldagem
- Resistência à corrosão
- Baixa pressão de vapor na temperatura de trabalho
- Resistência mecânica
- Custo
- Disponibilidade no mercado
- Peso

Resistência dos materiais

Primeiramente, uma câmara de vácuo, assim como as tubulações devem possuir resistência mecânica suficiente para não implodirem quando forem evacuados. O cálculo estrutural de uma câmara pode ser bastante complexo e está fora dos objetivos desta apostila. De qualquer maneira, neste caso, o bom senso e a experiência devem prevalecer e ditar as regras na escolha do material, do formato da câmara e da espessura mínima das paredes. Existem livros básicos de resistência dos materiais que podem auxiliar na determinação das dimensões, geometria e espessura do material a empregado na confecção de uma câmara de vácuo.

Degaseificação

Conforme já visto, os materiais constituintes de uma câmara de vácuo e também das tubulações não são muito importantes nas regiões de baixo vácuo, onde as partículas a serem bombeadas são aquelas que inicialmente fazem parte do volume do sistema. Entretanto, na região de alto-vácuo e ultra alto-vácuo as moléculas a serem bombeadas são aquelas: que se despreendem das paredes do recipiente (degaseificação); que se vaporizam devido a pressão de vapor dos materiais; que se difundem através das paredes sólidas e alcançam a região de vácuo (permeabilidade), etc. Desta forma, quando se deseja obter pressões baixas, é fundamental que se tenha cuidado na escolha e no tratamento das superfícies dos materiais a serem utilizados no sistema de vácuo.

Estas fontes de gases na região de baixas pressões, recebem o nome genérico de evolução de gases no sistema, ou vazão (fluxo) de gases, e é denotado pela letra Q. Já vimos que: $Q=PS$, ou rearranjando, $P=Q/S$. Portanto, a pressão final num recipiente é proporcional à evolução dos gases no sistema e inversamente proporcional à velocidade efetiva de bombeamento. Assim, para se atingir uma pressão-final baixa, deve-se minimizar as fontes de gases e maximizar a velocidade efetiva de bombeamento:

Baixa pressão \Rightarrow minimizar Q e maximizar S

Portanto, um bom sistema de vácuo deve possuir uma baixa taxa de degaseificação, caso contrário eles vão liberar muitas moléculas para o sistema e pressão final não irá ser baixa, a não ser que se aumente excessivamente a velocidade de bombeamento efetiva.

Cada material apresenta taxas de degaseificação diferentes, que são determinadas experimentalmente. As tabelas existentes, fornecem a taxa de degaseificação específica, q_d , em Torr.litros/s.cm². Para se conhecer a taxa de degaseificação total deve-se multiplicar pela área do material considerado, exposto ao vácuo.

As Tabelas 1 e 2 apresentam uma coletânea de valores de taxas de degaseificação para vários materiais metálicos importantes em tecnologia de vácuo. A Figura 1, apresenta os níveis de degaseificação para vários materiais com diferentes tratamentos de superfícies. Os dados apresentados nestas tabelas e figura são importantes, não só para a uma seleção prévia do material, mas também para o cálculo (dimensionamento) de um sistema de vácuo, onde como já foi visto é fundamental conhecer a taxa de degaseificação dos materiais que compõem o sistema.

A taxa de degaseificação depende da temperatura em que se encontra o material e do tempo de bombeamento a que o mesmo está exposto. A Figura 2 mostra uma variação típica da taxa de degaseificação em função do tempo de bombeamento, com e sem aquecimento da superfície. Como pode-se verificar o aquecimento da superfície do recipiente inicialmente aumenta a taxa de degaseificação, mas na seqüência faz diminuir a degaseificação. Portanto, o aquecimento da paredes é um fator que normalmente tem que ser levado em conta na especificação dos materiais de vácuo.

Pressão de vapor

A pressão de vapor é definida como sendo a pressão do gás no qual as fases gasosa e líquida (ou sólida) estão em equilíbrio. Ou seja, é a pressão na qual uma substância na fase líquida ou sólida começa a evaporar. Cada substância possui valores diferentes de pressão de vapor. A pressão de vapor é função da temperatura do material. Quanto mais alta a temperatura, mais fácil as moléculas se vaporizam, portanto, aumentando a pressão de vapor.

A vaporização dos materiais num sistema de vácuo, é uma fonte de gases, que deve ser bombeada da mesma forma que a taxa de degaseificação. Em muitos casos a vaporização dos materiais é um evento desejado, como por exemplo em evaporadoras para produção de filmes finos. Na maioria dos casos, a taxa de evaporação só é significativa à temperaturas elevadas. A Tabela 3 apresenta alguns dados sobre a pressão de vapor para maioria dos elementos metálicos. Na coluna 1, tem-se a o peso atômico, na coluna 2, tem-se a temperatura na qual a pressão de vapor é 10^{-5} microns (1micron = 10^{-3} Torr), na coluna 3, tem-se a temperatura na qual a pressão de vapor é 10 microns (0,01Torr), e na coluna 4, tem-se a temperatura de liquefação.

Material	Condition	Outgassing Rate, Torr l/sec cm ²			Source
		1 Hour	10 Hours	100 Hours	
Mild steel	shot-blasted		6 X 10 ⁻¹¹		Bears, Greer, Nighth-gale Vol. 1, Advances in Vacuum Sci., 1960.
"Araldite D" Neoprene PVC		3 X 10 ⁻¹¹	1.5 X 10 ⁻¹¹	3 X 10 ⁻⁷	
Stainless steel	cleaned in detergent	2 X 10 ⁻¹¹	2 X 10 ⁻¹¹	1.3 X 10 ⁻⁷	
Aluminum	anodized		1 X 10 ⁻¹¹		
Brass	cast, washed		3 X 10 ⁻¹¹		
"Mylar"	outgassed as received	2 X 10 ⁻¹¹			Banteler, Vac. Symp. Trans., 1958.
Neoprene	"	2 X 10 ⁻¹¹			
Silicone rubber	"	3 X 10 ⁻¹¹			
"Teflon"	"	5 X 10 ⁻¹¹			
PVC	"	9 X 10 ⁻¹¹			
"Tartolite"	"	7 X 10 ⁻¹¹			
"Mylar"	"	3 X 10 ⁻¹¹			
Stainless steel	polished, vap. degr.		1.4 X 10 ⁻¹¹		Dayton, Vac. Symp. Trans., 1959.
Mild steel	polished, vap. degr.	5 X 10 ⁻¹¹	5 X 10 ⁻¹¹		
Nickel-plated steel	"	5 X 10 ⁻¹¹	1 X 10 ⁻¹¹		
Chrome-plated steel	"	1 X 10 ⁻¹¹	9 X 10 ⁻¹¹		
Aluminum	anodized		1 X 10 ⁻¹¹		
Copper		2.3 X 10 ⁻¹¹			
Nickel		6 X 10 ⁻¹¹			
Molybdenum		7 X 10 ⁻¹¹			
Tantalum		9 X 10 ⁻¹¹			
Zirconium		1.3 X 10 ⁻¹¹			
Tungsten		2 X 10 ⁻¹¹			
Sliver		6 X 10 ⁻¹¹			
Butyl rubber		1.5 X 10 ⁻¹¹			Dayton, Vac. Symp. Trans., 1959.
"Kel F"	outgassed	4 X 10 ⁻¹¹			
"Plaxiglas"		1 X 10 ⁻¹¹			
Polyethylene		2.6 X 10 ⁻¹¹			
Nylon		1.2 X 10 ⁻¹¹			
Porcelain	glazed	6.5 X 10 ⁻¹¹			
Stearite		9 X 10 ⁻¹¹			

Material	Condition	Outgassing Rate, Torr l/sec cm ²			Source
		1 Hour	10 Hours	100 Hours	
"Epon 828"	degassed	6.7 X 10 ⁻¹¹	6.9 X 10 ⁻¹¹	9.4 X 10 ⁻¹¹	Marley, Roman, Vosecek, Vac. Symp. Trans., 1961.
Mild steel		5.3 X 10 ⁻¹¹	1 X 10 ⁻¹¹	1.9 X 10 ⁻¹¹	
Aluminum		1.7 X 10 ⁻¹¹	2.7 X 10 ⁻¹¹	4.6 X 10 ⁻¹¹	
"Teflon"		4.6 X 10 ⁻¹¹	2.1 X 10 ⁻¹¹	9 X 10 ⁻¹¹	
Copper, 450°C	none	1.6 X 10 ⁻¹¹			Elekten, Koller, Vac. Symp. Trans., 1961.
"	degassed, pickled	2.6 X 10 ⁻¹¹			
"	degassed	1.4 X 10 ⁻¹¹			
Aluminum	none	1.3 X 10 ⁻¹¹			
S/S	"	6.4 X 10 ⁻¹¹			
"	degassed	4 X 10 ⁻¹¹			
"	annealed	5.3 X 10 ⁻¹¹			
Mild steel	none	4.2 X 10 ⁻¹¹			
"	degassed	3.6 X 10 ⁻¹¹			
S/S	none	7.6 X 10 ⁻¹¹		1.1 X 10 ⁻¹¹	Das, AF 49 (600)-923 Oct., 1961
"	bake 24 hr 200°C		1.2 X 10 ⁻¹¹		
"	bake 12 hr 400°C		1.5 X 10 ⁻¹¹		
"			9.3 X 10 ⁻¹¹		
"	400°C		1.4 X 10 ⁻¹¹		
Al 6061-T6			2.5 X 10 ⁻¹¹		
Al 6061-T6			4.5 X 10 ⁻¹¹		
Al 6061-T6	200°C		3.7 X 10 ⁻¹¹		
Al 6061-T6	Bake 13.5 hr 200°C		1.4 X 10 ⁻¹¹		Das, AF 49 (600)-923 Oct., 1961.
Al 6061-T6	300°C		1.6 X 10 ⁻¹¹		
Al 6061-T6	bake 15 hr 300°C		1.9 X 10 ⁻¹¹		
Mild steel	none		1.9 X 10 ⁻¹¹	4 X 10 ⁻¹¹	
"	"		8.6 X 10 ⁻¹¹	4.3 X 10 ⁻¹¹	
"	200°C				
"	baked 15 hr 200°C		8.4 X 10 ⁻¹¹		
"	400°C		1.2 X 10 ⁻¹¹		

Material	Outgassing Rates, Unbaked				Outgassing Rates After Bakeout	References	Remarks
	1 hour	1 hours	10 hours	10 hours			
Copper - OFHC - as-received surface removed	2×10^{-9}	8×10^{-10}	1.5×10^{-10}	4×10^{-11}		12	
Copper - OFHC - as-received surface not removed	2×10^{-8}	7×10^{-9}	1×10^{-9}	3×10^{-10}		12	
Copper - not OFHC - as-received, surface removed	4×10^{-9}	1.5×10^{-9}	3.5×10^{-10}	9×10^{-11}		12	
Copper - not OFHC - as-received, surface not removed	4×10^{-8}	1.5×10^{-8}	4×10^{-9}	8×10^{-10}		12	
Aluminum - anodized	2×10^{-6}	6×10^{-7}	1×10^{-7}	3×10^{-9}		12	
Aluminum - clean, but with some oxide	1×10^{-8}	3×10^{-9}	1×10^{-9}	3×10^{-10}		12	
Stainless steel - only degreased	2×10^{-9}	1×10^{-9}	2.5×10^{-10}	8×10^{-11}	4×10^{-12} 4×10^{-12}	7 9	150°C - 24 hr bake 300°C - 25 hr bake
Stainless steel - Varian standard cleaning	3×10^{-9}	5×10^{-10}	1.5×10^{-10}	4×10^{-11}	4×10^{-13}	9	150°C - 24 hr bake

Tabela 2. Taxa de degaseificação

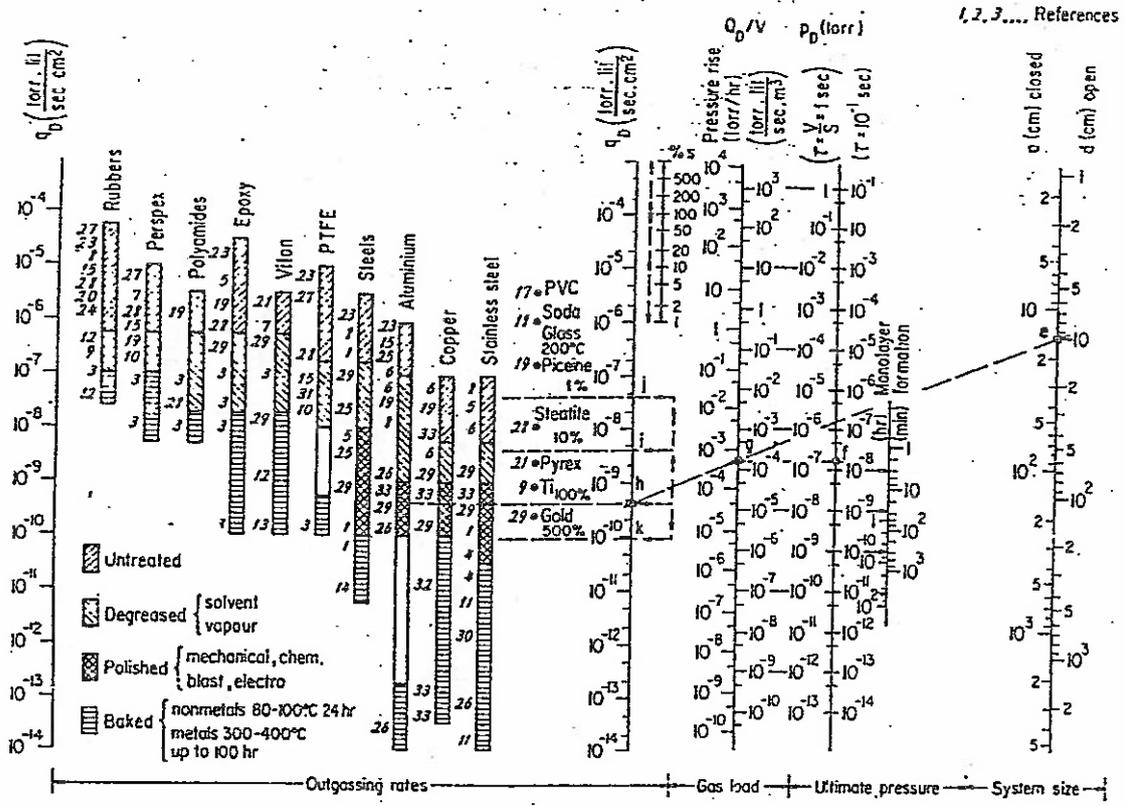


Figura 1. Níveis da taxa de degaseificação para diversos materiais com diferentes tratamento de superfície

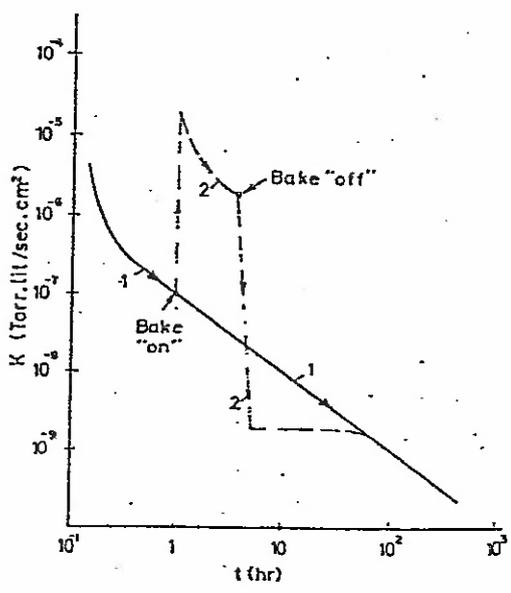


Figura 2. Variação típica da taxa de degaseificação em função do tempo, com e sem aquecimento

Alguns elementos ou substâncias apresentam pressões de vapor muito altas, como por exemplo a água. A Tabela 4 apresenta a pressão de vapor para a água e para o mercúrio em Torr. Verifica-se por exemplo, que na temperatura ambiente (20°C) a pressão de vapor da água é 17,54Torr, ou seja em um recipiente com pressão de 17,54Torr a água entra em ebulição a 20°C. Isto significa que, a presença de água (estado líquido) num recipiente, limita a pressão a valores da ordem de 17Torr. Para baixar a pressão é necessário eliminar a água do sistema. A Figura 3 mostra a variação da pressão de vapor da água até a temperatura de 100°C, no qual a pressão de vapor é igual a pressão atmosférica (ponto de ebulição, nas condições normais de pressão e temperatura). A tabela 5 fornece a pressão de vapor para alguns materiais não metálicos.

Reduzindo a temperatura das superfícies dos materiais dentro de uma câmara de vácuo, reduz a pressão de vapor dos vapores presentes no sistema. Este é princípio de funcionamento das armadilhas frias e bombas criogênicas.

Resumo

Basicamente, usa-se aço inoxidável na confecção das câmaras de vácuo, pois apresenta grande resistência mecânica, excelente resistência à corrosão, baixa taxa de absorção de hidrogênio, baixa taxa de degaseificação. Nas tubulações de pré-vácuo, têm-se usado cada vez mais cobre, pois é facilmente usinável, fácil de soldar, tem baixa corrosão e é encontrado facilmente em vários tamanhos e formatos.

A tabela 6 fornece um guia prático para a seleção de materiais para várias faixas de pressão, desde a pressão atmosférica até ultra alto-vácuo.

3. VEDAÇÕES

As vedações, cuja função é assegurar a estanquidade do sistema de vácuo, podem ser classificadas da seguinte maneira:

- Desmontáveis: Elastômeros
(selo) Metálicas
- Permanentes: Pastas e colas
Soldas: metal/metál
vidro/metál
cerâmica/metál

Os selos (ou vedações desmontáveis) são necessárias para garantir a estanquidade nas junções desmontáveis do sistema, tanto na parte de baixo vácuo como na parte de alto vácuo. Essas vedações são em geral feitas de anéis de elastômeros ou metálicas, pressionadas por flanges. Os materiais usados como elementos vedadores devem ser mais moles do que as flanges, desta forma, eles se amoldam perfeitamente às superfícies dos flanges com a pressão exercida pelos mesmos.

Vapor Pressure of Metals

Metals	At. wt. ^c	t(°C) at 10 ⁻⁵ μ ^a	t(°C) at 10μ ^b	m.p.(°C) ^b
Aluminum	27.0	670	~ 1000	660
Barium	137.4	290	629	717
Beryllium	9.0	700	1246	1284
Cesium	132.9	-18	153	29
Copper	63.5	730	1273	1083
Gold	197.2	775	1465	1063
Iron	55.8	820	1447	1535
Lead	207.2	340	718	328 ←
Lithium	6.9	225	514	179
Magnesium	24.3	185	443	651 +
Mercury	200.6	-75	45 ^a	-39 ^c
Molybdenum	96.0	1580	2533	2622
Nickel	58.7	920	1510	1455
Niobium	92.9	-	(VP = 1μ at m.p.)	2500
Palladium	106.7	930	1566	1555
Platinum	195.2	1290	2090	1774
Silver	107.9	570	1047	961
Tantalum	180.9	1950	(VP=1μ at 2820C)	2996
Tin	118.7	660	1189	232 ←
Titanium	47.9	1070	1546	1727
Uranium	238.1	1130	1898	1132
Wolfram	183.9	2090	3309	3382
Zinc	65.4	120	343	419 ←
Zirconium	91.2	1460	2001	2127

Tabela 3. Pressão de vapor para vários metais

Vapour pressure of water (ice), and mercury (Torr).

Temperature (°C)	Water	Mercury	Temperature (°C)	Water	Mercury
-183	1.4×10^{-22}	3.48×10^{-32}	30	31.82	2.8×10^{-3}
-150	7.4×10^{-16}	—	40	55.32	6.1×10^{-3}
-140	2.9×10^{-10}	—	50	92.51	1.27×10^{-2}
-130	6.98×10^{-5}	—	60	149.3	2.52×10^{-2}
-120	1.13×10^{-7}	—	70	233.7	4.82×10^{-2}
-110	1.25×10^{-6}	—	80	355.1	8.88×10^{-2}
-100	1.1×10^{-5}	2.39×10^{-11}	90	525.7	1.58×10^{-1}
-90	7.45×10^{-5}	—	100	760	2.72×10^{-1}
-80	4.1×10^{-4}	2.38×10^{-6}	150	3570.4	2.80
-70	1.98×10^{-3}	1.68×10^{-5}	200	11 630	17.28
-60	8.1×10^{-3}	9.89×10^{-5}	250	29 817	74.37
-50	2.9×10^{-2}	4.94×10^{-7}	300	64 432	246.8
-40	9.7×10^{-2}	2.51×10^{-6}	400	—	1574.0
		(-38.9°C)			
-30	2.9×10^{-1}	4.78×10^{-6}	500	—	7691
-20	7.8×10^{-1}	1.81×10^{-5}	600	—	22.8 atm
-10	1.95	6.06×10^{-6}	700	—	52.5 atm
0	4.58	1.85×10^{-4}	800	—	103.3 atm
10	9.2	4.9×10^{-4}	900	—	180.9 atm
20	17.54	1.2×10^{-3}	1000	—	290.5 atm

Tabela 4. Pressão de vapor da água e mercúrio

Vapor Pressure of Non Metals

Material	$p(\mu)$ at 25 C	$t(^{\circ}\text{C})$ at $10^{-7} \mu^a$
Apiezon L grease	10^{-7} b	--
Apiezon Q compound	10^{-1} b	--
Apiezon W wax	10^{-5} b	--
Argon	(b.p. -185.7°C) ^d	-249
Carbon	$10(2681\text{C})^d$	1680 ($10^{-5} \mu$)
Glass	$< 10^{-6}$ g	--
Glyptal (red)	10^{-3} e	--
Torrseal epoxy resin	10^{-5} f	--
Helium	(b.p. -268.9°C) ^d	-272 (100 μ)
Hydrogen	(d.p. -252.7°C) ^d	-270
Neoprene	10^{-6} e	--
Nitrogen	(b.p. -195.8°C) ^d	-252
Oxygen	(b.p. -183.0°C) ^d	-248
Polyethylene	10^{-4} e	--
Silicon	$10(1343\text{C})^c$	920 ($10^{-5} \mu$)
Teflon	10^{-5} e	--
Water	3×10^4 a	-143

Tabela 5. Pressão de vapor para materiais não metálicos

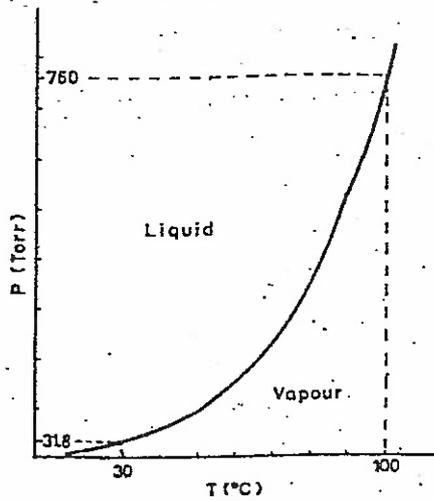


Fig.2.2 Vapour pressure curve (water).

Figura 3. Curva da pressão de vapor da água

Material	Pressure (Torr)				
	760-1	1-10 ⁻²	10 ⁻² -10 ⁻⁵	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ -10 ⁻²⁸
Iron, steels	good	good	good	only after degassing	only stainless steels
Cast iron, copper or aluminum	good	good	bad	bad	bad
Rolled copper or alloys	good	good	good	only after degassing	only OFHC copper
Nickel and alloys	good	good	good	good	good
Aluminum	good	good	only after degassing		not recommended
Glass, quartz	good	good	good with degassing	good	only thick-walled
Ceramics	good	good	only with vitreous coating		only special types
Mica	good	good	only after strong degassing		not recommended
Rubbers	good	good	only degassed	bad	bad
Plastics	good	only special types		only Teflon, Araldite	not recommended

Tabela 6. Guia de uso de alguns materiais em função da faixa de pressão

Além da propriedade de amoldar-se às superfícies, os elementos vedadores devem possuir outras propriedades desejáveis como por exemplo: baixa pressão de vapor, baixa taxa de degaseificação, baixa permeabilidades, suportar temperaturas elevadas, ter resistência a gases corrosivos, etc.

A escolha do tipo e do elemento de vedação depende da aplicação do sistema de vácuo. Pode-se, entretanto, estabelecer algumas linhas gerais de aplicação em função da pressão de trabalho:

a) Baixo e médio vácuo

Usa-se quase que exclusivamente elementos de borracha de baixo custo, tipo Neoprene.

b) Alto vácuo

Utiliza-se elementos de borracha de melhor qualidade, tipo Viton, ou materiais metálicos moles, tipo estanho.

c) Ultra alto vácuo

Normalmente, utiliza-se elementos metálicos com baixa taxa de degaseificação e próprios para suportar altas temperaturas, como por exemplo o cobre.

A taxa de degaseificação para os tipos de elastômeros mais comuns usados como elementos de vedação de vácuo é dado na Tabela 7.

Tabela 7. Taxa de degaseificação para elementos de vedação

Material	Degaseificação (10^{-8} Torr.l/s.cm ²)
Neoprene	5,4
Borracha Silicone	0,44
Teflon	2,5
Borracha Butyl	1,1
Viton A	2,0
Borracha Natural	2,2

Existem várias maneiras de se alojar um anel de vedação para ser comprimido pelos flanges. As mais comuns são mostradas nas Figura 4.

Para se efetuar uma vedação mais perfeita os anéis de borracha são normalmente usados com uma camada bem fina de algum tipo especial de graxa. Desta forma, todas imperfeições da superfície dos flanges e dos anéis são preenchidos pela graxa, propiciando uma perfeita vedação. Existe uma imensa variedade de tipos de graxas, cada uma com características próprias, que definem a sua aplicação. As Tabela 8, 9 e 10 apresentam algumas das propriedades das principais graxas de vácuo disponíveis no mercado. Em função da taxa de degaseificação e da temperatura de trabalho, pode-se selecionar os tipos mais apropriados.

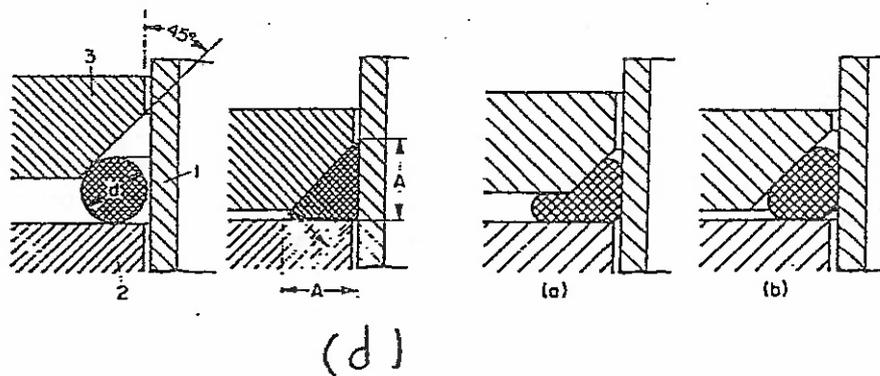
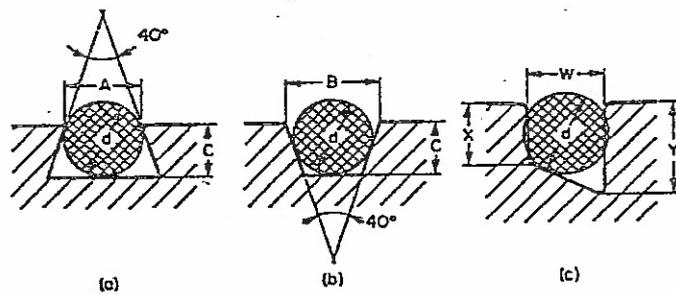
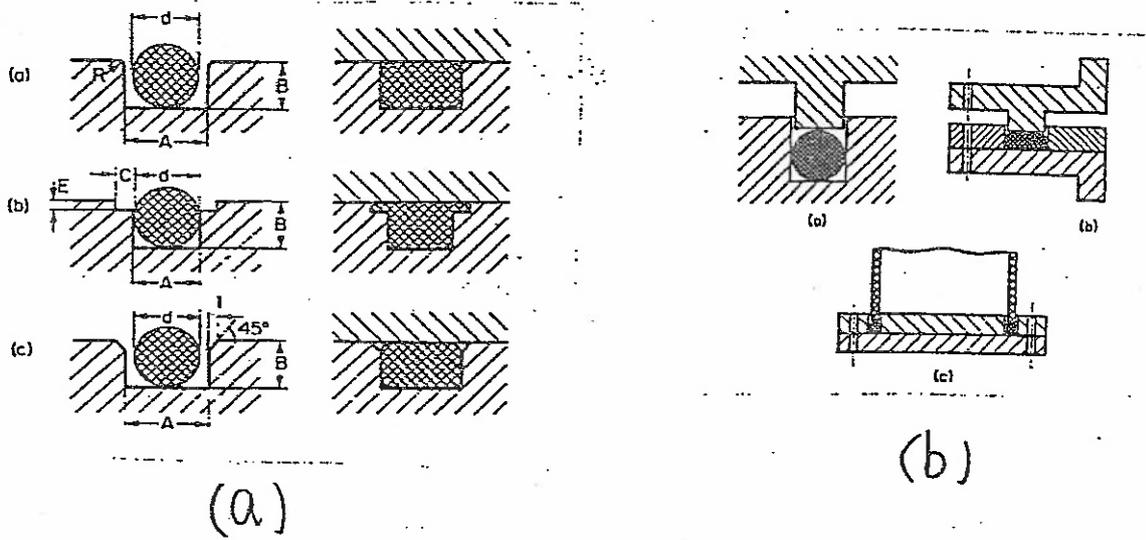


Figura 4. Tipos de acomodação de anéis de borracha. (a) Canaletas retangulares, (b) diversos (canaleta fechada, canaleta desmontável, topo) (c) canaleta trapezoidal, (d) compressão cônica.

(a) Vacuum greases.

Designation	Max. service temp. (°C)	Dropping (melting) point (°C)	Vapour pressure (Torr)		Remarks	Supplier
			at 25°C	at higher temp.		
Vacuum grease P	25	55	10^{-2}	10^{-4} (100°C)	10^{-3} (25°C) degassed 2 hr at 90°C	Leybold
Grease PB 1	—	—	—	—	light	Comp. Gen. Radiologie
Ramsay grease	25-30	56	10^{-2}	10^{-4} (38°C)	—	Leybold
Apiezon L	30	—	10^{-3}	10^{-4} (135°C)	only temporarily in wellfitting joints	—
Apiezon M	30	—	10^{-3}	10^{-4} (30°C)	—	Edwards Shell
Apiezon N	30	—	10^{-2}	—	for tapered joints	—
Vacuum grease R	30	65	$5 \cdot 10^{-3}$	—	10^{-3} (25°C) degassed	Leybold
Grease PB 2	(30)	—	—	—	for large joints	Comp. Gen.
Grease PB 3	(30)	—	—	—	heavy	Radiologie
Lubri Seal	30	40	—	—	for glass metal	CENCO
Vacuseal light	50	—	10^{-3}	—	—	CENCO
Joint grease DD	58	120	—	—	for rotary seals	Leybold
Vacuseal heavy	60	—	10^{-3}	—	—	CENCO
Celvacene light	—	90	10^{-6}	—	—	CVC
Celloseal	—	100	10^{-3}	—	soluble in chloroform	Fischer
Apiezon T	110	—	10^{-4}	—	light m.p. grease	Edwards Shell
Celvacene medium	—	120	$< 10^{-4}$	—	—	CVC
Cello grease	—	120	$< 10^{-6}$	—	—	Fischer
Lithelen	150	210	very low	—	lithium soap	Leybold
Silicone stopcock grease	200	—	10^{-2}	10^{-4} (170°C)	—	Dow Corning
Silicone high vacuum grease	200	250	10^{-2}	10^{-4} (170°C)	useful down to -40°C	Edwards

Tabela 8. Principais graxas utilizadas em tecnologia de vácuo.

(C) Vapor Pressure of Apiezon Compounds

Compound	Vapor Pressure after Evolution of Dissolved Air (mm Hg at 20° C)	Melting Point (° C)	Temp. to Which Sealing Media Should Be Raised to Apply	Safe Max. Temp. for Use (° C)
Apiezon Grease L	10 ⁻⁵ at 300 10 ⁻⁵ to 10 ⁻²² at 20	47	Room temp.	30
Apiezon Grease M	10 ⁻⁵ at 200 10 ⁻⁵ to 10 ⁻⁵ at 20	44	Room temp.	30
Apiezon Grease N	10 ⁻⁵ at 250 10 ⁻⁵ to 10 ⁻⁵ at 20	43	Room temp.	30
Apiezon Grease T	10 ⁻⁵ (approx) at 20	125	Room temp.	110
Apiezon Sealing Compound Q	10 ⁻⁵ at 20	45	Room temp.	30
Apiezon Wax W	10 ⁻⁵ at 180	85	100° C	80
Apiezon Wax W100	10 ⁻⁵ at 180	55	80° C	50
Apiezon Wax W40	10 ⁻⁵ at 180	45	40-50° C	30

Tabela 9. Propriedades das graxas tipo Apiezon

(b) Comparison of Vacuum Greases⁴³

Trade Name	Melting Point (° C)	Vapor Pressure at 20° C (mm Hg)
Lubriscal	40	<10 ⁻⁵
Vacuseal Light	50	10 ⁻⁵
Vacuseal Heavy	60	10 ⁻⁵
Celvacene Light	90	10 ⁻⁵
Celvacene Medium	120	<10 ⁻⁵
Celvacene Heavy	130	<10 ⁻⁵
Stopcock grease	215	<10 ⁻⁵
Apiezon L	47	10 ⁻¹¹
Apiezon M	44	(10 ⁻² at 300° C) 6 · 10 ⁻⁷ (10 ⁻³ at 200° C)

Tabela 10. Comparação entre algumas graxas

Os elementos vedantes metálicos podem ser utilizados da mesma forma que os anéis de borracha, principalmente os mais moles. Entretanto, o principal uso de anéis metálicos se verifica em ultra alto vácuo e a forma básica de utilizá-los é através da compressão com flanges tipo facas, conforme ilustrado, esquematicamente na Figura 5.

Com relação às selagens permanentes as soldas são o tipo mais comuns, embora exista a possibilidade de se usar resinas adesivas para unir partes de um sistema de vácuo.

A parte de soldas é um assunto bastante extenso e com muitos detalhes tecnológicos que foge dos objetivos deste curso introdutório. Portanto, um projeto correto das junções que utilizam soldas deve ser executado com o auxílio de técnicos experientes em soldas. Apenas para dar uma noção básica, a Figura 6 mostra alguns exemplos de junção com solda tipo arco, utilizadas para soldar flanges em tubos. A Figura 7 mostra alguns tipos de soldas em arco para várias junções. Os tipos de soldas mostrados nas figuras 6 e 7 são os mais empregados na junção de peças de aço para câmara e tubulação de vácuo. O princípio básico de uma boa solda é não deixar formar bolsões de ar entre a solda e região de vácuo, evitando assim, vazamentos virtuais. Por esta razão, é que sempre que possível, as soldas devem ser feitas do lado da região que vai ser evacuada.

As selagens permanentes com resinas adesivas são feitas normalmente em casos de emergência ou para bloquear algum vazamento existente. A Tabela 11 apresenta uma lista de adesivos irreversíveis usados em vácuo com suas propriedades mais importantes. A Tabela 12 apresenta as principais propriedades das resinas adesivas tipo epoxy e suas aplicações.

4. CONEXÕES

Diversos componentes, tais como, tubos, redutores, adaptadores, cotovelos, curvas, cruzetas, tubos flexíveis entre outros são utilizados nas montagens de linhas de vácuo. Hoje em dia, a tendência é utilizar conexões em alumínio ou em aço inoxidável, embora outros materiais sejam disponíveis. As conexões devem ser todas flangeadas com vedações apropriadas, evitando-se ao máximo o uso de roscas nas regiões de vácuo.

Sempre que se projetar e construir um sistema de vácuo é aconselhável utilizar os padrões internacionais de flanges para vácuo. A escolha de um ou outro padrão vai depender da aplicação desejada. Basicamente, existem quatro tipos de flanges: KF, SC, ISO, CF, usadas para as interligação de tubos, conexões, válvulas, medidores, bombas e etc. A Figura 8 mostra, esquematicamente, as diferenças entre os quatro padrões de flanges.

Padrão KF - "Klein Flansch"

Bastante difundido para o uso em pequenas flanges. Utiliza anéis de borracha com centralizadores e é preso por abraçadeiras metálicas. Em geral este sistema é empregado para médio e alto vácuo. (Figura 8.a)

Irreversible adhesives.

Lacquer or sealant	Composition	Max. safe temperature (or range °C)	Characteristics	Remarks (Supplier)
Sealing lacquer	Mixture of high polymers in solvents	-20 80	After drying insoluble in oils, petroleum, water	(Leybold)
Glyptal lacquer	Alkyd resin, formed by condensation of phthalic anhydride, glycol	100	Vapour pressure 10^{-2} Torr (-25°C), 2×10^{-4} (25°C), 10^{-1} (70°C). Soluble in acetone, xylol or benzine. Insoluble in mineral oils, alcohol, water.	Good fluidity and wetting, also Al, and Plexiglass; Drying 8 hr at room temp. Polymerizes 1-2 hr at 140°C . (Comp. Gen. Radiologic)
Helmitin sealing compound	Polyester to be mixed with hardener (600°C) (Hardener irritant of mucose!)	100	Soluble in methylene chloride, methanol, water. Insoluble organic solvents, Tensile strength 5 kg/mm^2 (25°C)	Hardens: 1 hr - (18°C), 15-20 (20°C) (Leybold)
Desmodur	Ester of diisocyan acid. Two solutions are to be mixed max. 3 hr before use.	110		Seals glass, metals ceramics, rubber. Needs pressure 3-4 atm for 2 hr at $90-130^{\circ}\text{C}$ or 8-10 hr at room temperature. (I.G. Farben)
Anaerobic permafil	Polymer of polyglycol dimethacrylate	—	Sets by exclusion of oxygen (vacuum)	Applied by brushing on the outside of porous walls. (Gen. Electric)
PVA solution sealant	Polyvinil acetate (1pbw) solution in toluol (10 pbw) or PVA in acetone	65	Vapour pressure 1×10^{-2} Torr (25°C)	After drying the coated surface is heated for 30 min at 150°C .
Loctite sealant	Thin liquid	-40 150	Liquid soluble in trichlorethylene. Sets by exclusion of air.	Bonds metal, glass ceramics, 4-12 hr (25°C), 10 min (100°C) 5 min (180°C) (Amer. Sealants)
Natural rubber sealant	Natural rubber (1 pbw), in benzol (2 pbw)	70	Applied on rough surfaces.	8 hr drying, then pressed
Silicone rubber sealant	RTV 102 silicone rubber adhesive	-60 150	Air cure at room temp; first forms a surface skin; completely cured 24 hr (3 mm layer) (Gen. Electric)	

Tabela 11. Adesivos mais comuns utilizados em vácuo e suas propriedades

Epoxy adhesives.

Resin	Hardener	Parts by weight of hardener to 100 pbw of resin	Recommended joint thickness (mm)	Curing time (min) at temp. (°C)						Recommended uses and remarks
				20	40	70	100	150	180	
Araldite 101	931	5-6	0.1-0.2	24hr	--	--	10	--	--	For bonding small metal surface More heat resistant Curing only at 60°C for 2.5 hr
	930	6-7	max. 0.5	24hr	--	--	--	--	3-5	
	936	6.5	--	--	--	--	--	--	--	
Araldite 102	931	6-7	0.05-0.15	24hr	--	--	--	5	3	Bonding porous materials Curing only at 60°C for 2.5 hr
	936	6	--	--	--	--	--	--	--	
Araldite 103	931	7-8	0.05-0.2	16hr	14hr	3hr	60	20	10	For bonding metals, ceramics, rubber; large surfaces. Hard joints
	930	6-10	0.2-0.5	24hr	14hr	2hr	60	20	10	
Araldite 105	960	6-10	3	24hr	--	--	--	10	--	Filling up cracks
Araldite 106	931 U	80	--	7hr	3hr	1hr	10	5	--	Resistant to vibration
Araldite 121	931	4-4.5	0.1-3	36hr	14hr	2hr	30	10	5	Bonding ceramics, synthetic resins to themselves and to metals; low expansion or heat sensitive materials
	930	2.5-5	0.1-0.5	36hr	14hr	2hr	30	10	5	
Araldite 123	931	5.5-6	0.1-3	36hr	14hr	1hr	15	5	3	Bonding large, metal ceramic surfaces
	930	3-6	0.1-1.5	36hr	14hr	1hr	15	5	3	
Araldite I (Natural)	one part, rods	--	0.05-0.2	--	--	--	--	3hr	55	Bonding nonferrous metals, ceramics
Araldite VIII (Natural)	paste	--	0.05-0.5	--	--	--	--	4hr	1hr	
Epon IX	one part paste	--	--	--	--	--	--	--	90	Bonding metal to metal; Max. service temp. 150°C
Epon 901	B-1	23	--	24hr	--	--	1hr	--	--	Max. service temp. 120°C Max. service temp. 160°C
	B-3	11	--	--	--	--	--	--	1hr	
Epon 907	B	80	--	24hr	--	1hr	--	--	--	Max. service temp. 80°C
Epon 929	one part paste	--	--	--	--	--	--	2hr	15(200°C)	Max. service temp. 250°C
Gen Epoxy M 180	Versamid 140	100	--	--	--	3hr	--	20	--	Bonding metals Bonding metals, rubber, PVC, Polyester
	Versamid 125	65-40	--	--	--	2hr	--	10	--	
Gen Epoxy 190	Versamid 125	100-60	--	24hr	--	2hr	--	10	--	Bonding metals, rubber, PVC, Polyester Bonding metal, ceramic, glass, or sealing up leaks; service up to 10 ⁻³ Torr and 100°C
	Hardener	equal squeezed length	--	24hr	--	80	--	--	--	

Tabela 12. Propriedades e aplicações das resinas tipo epoxy

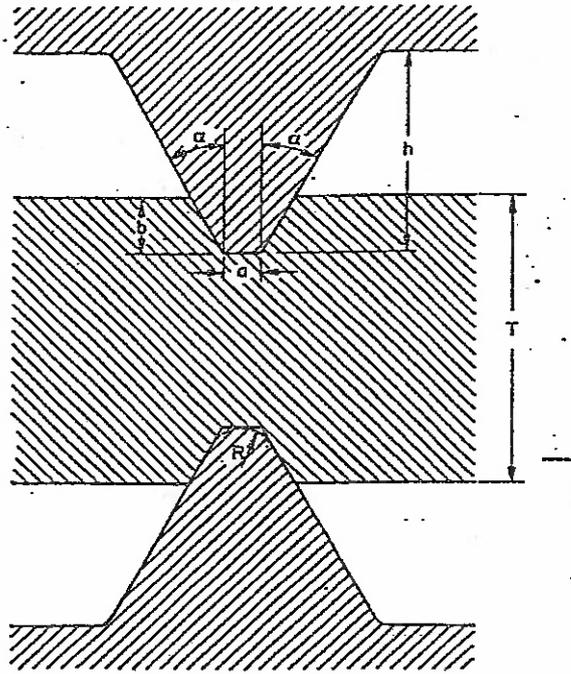


Figura 5. Princípio básico da selagem com anéis metálicos usando flanges tipo faca.

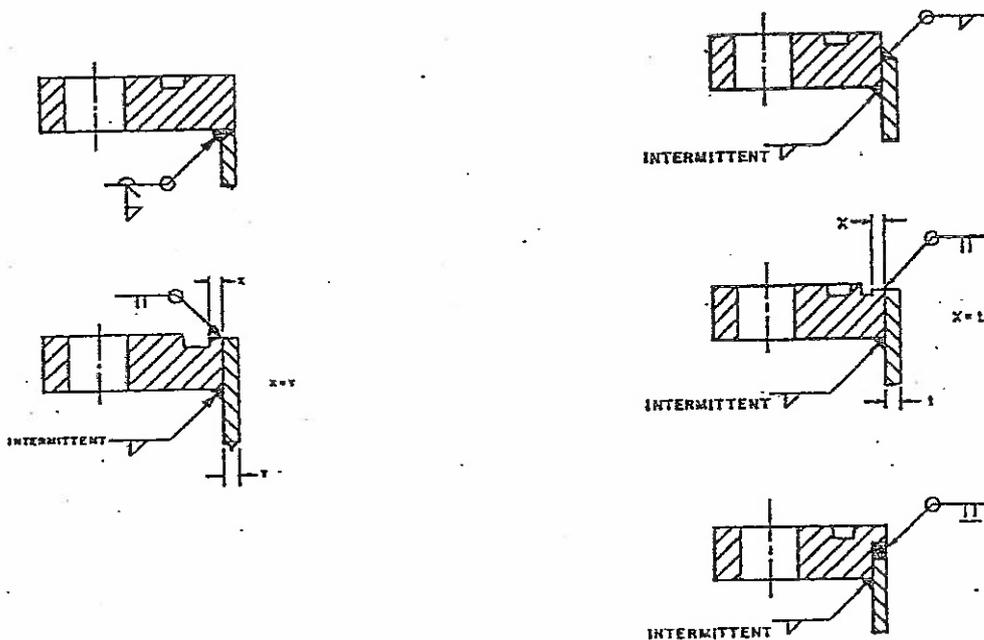


Figura 6. Tipos de solda: flanges com tubos

Type	A. Butt	B. Lap	C. Tee	D. Corner	E. Edge
Vacuum	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
Connect	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
Connect	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)

Figura 7. Tipos de solda: diversas geometrias

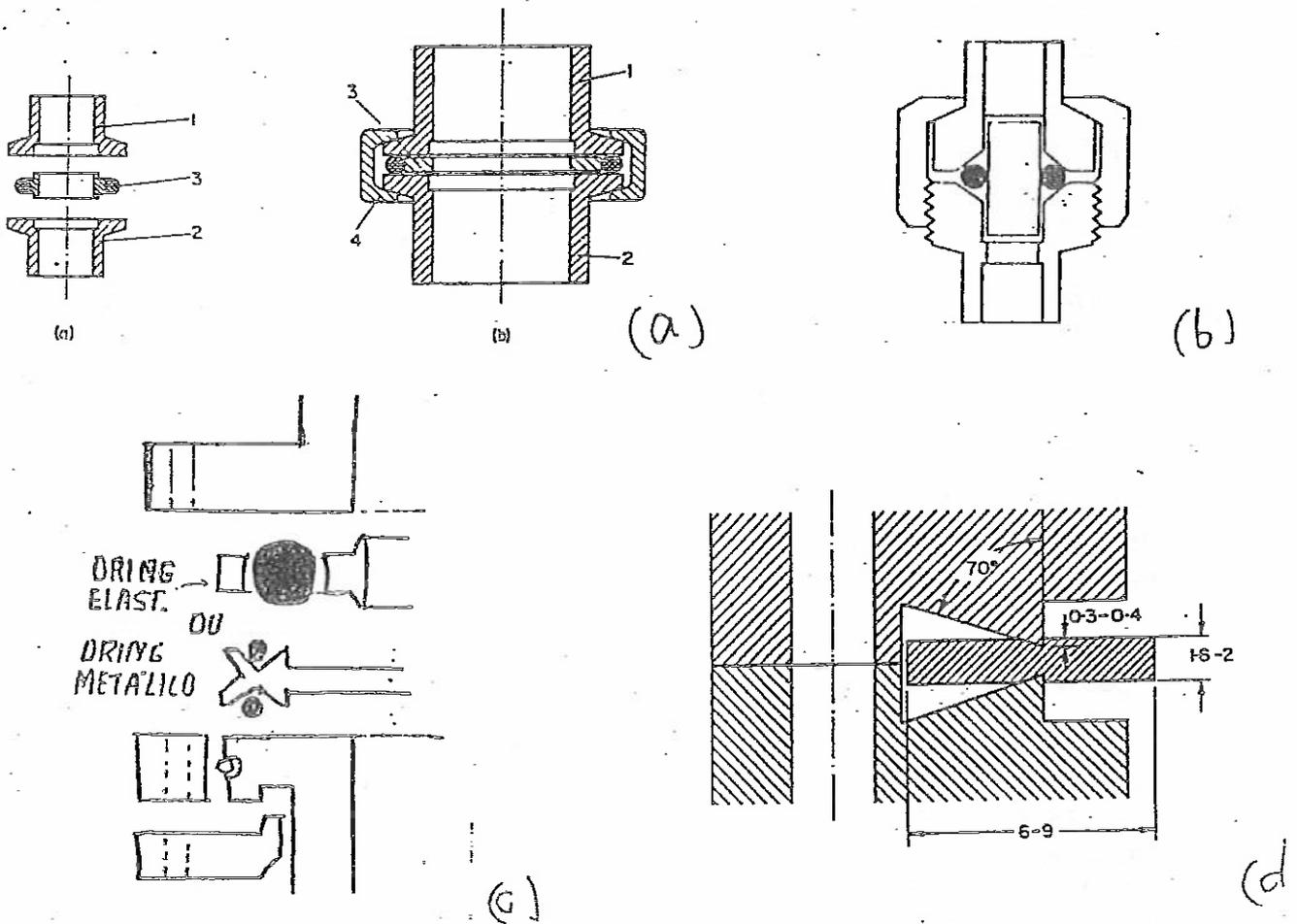


Figura 8. Padrões de flanges usadas para conexões em vácuo, (a) padrão KF, (b) padrão SC, (c) padrão ISO-K, (d) padrão CF

Padrão SC - "Screwed Coupling"

Atualmente, sendo substituído pelos flanges KF. É utilizado em pequenos flanges. Utiliza anéis de borracha com centralizador, que são presos por anéis rosqueados nas partes externas do flange. Empregado em médio e alto vácuo. (Figura 8.b)

Padrão ISO-K - "Clamping Flange Fitting"

Para uso com anéis de borracha ou metálicos. São usados em flanges de bitola grande. A união dos flanges é feita com grampos. São bastante práticas e fáceis de se confeccionar. São empregadas em alto vácuo. (Figura 8.c)

Padrão CF - "Conflat Flange"

Utiliza anéis de metal, geralmente cobre OFHC, pressionados entre flanges com extremidades em forma de facas, que penetram no cobre. Para uso em ultra alto vácuo.

Com relação aos tubos é importante destacar os do tipo fole, conforme mostrados na Figura 9. Estes foles, geralmente feitos de aço inoxidável, são muito empregados nas construções de válvulas de vácuo, para conectar tubos fora de alinhamento e para amortecer vibrações. São encontrados em todos padrões de flanges, sendo porém os do tipo KF os mais utilizados.

5. VÁLVULAS

As válvulas são dispositivos utilizados para ajustar ou estancar o fluxo de gases entre as partes de um sistema de vácuo.

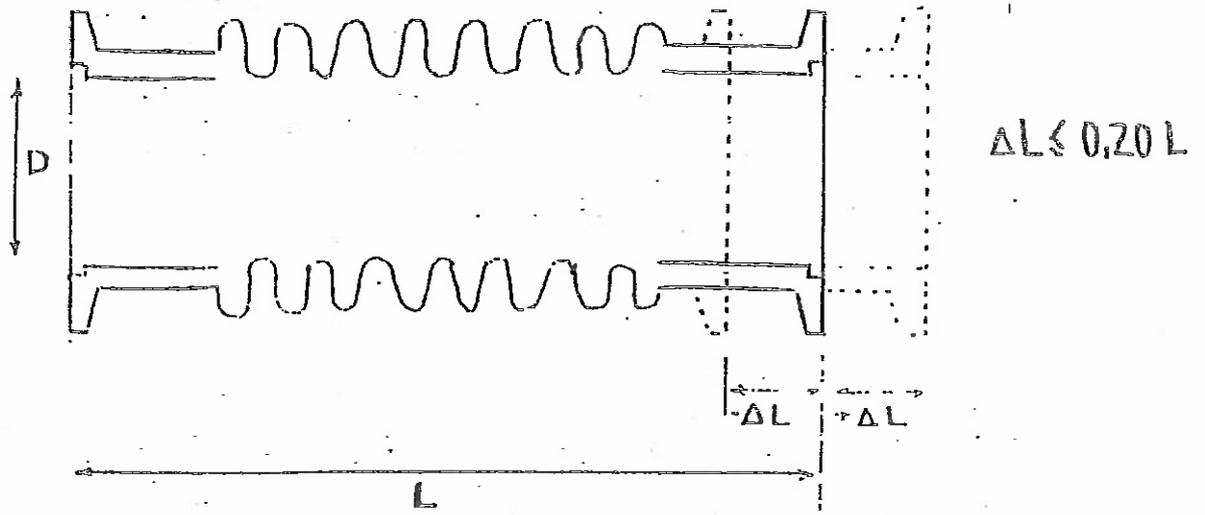
Pode-se classificar as válvulas em três categorias bastante ampla, conforme o nível de pressão que elas operam:

- Válvulas de pré-vácuo
- Válvulas de alto vácuo
- Válvulas de admissão de ar

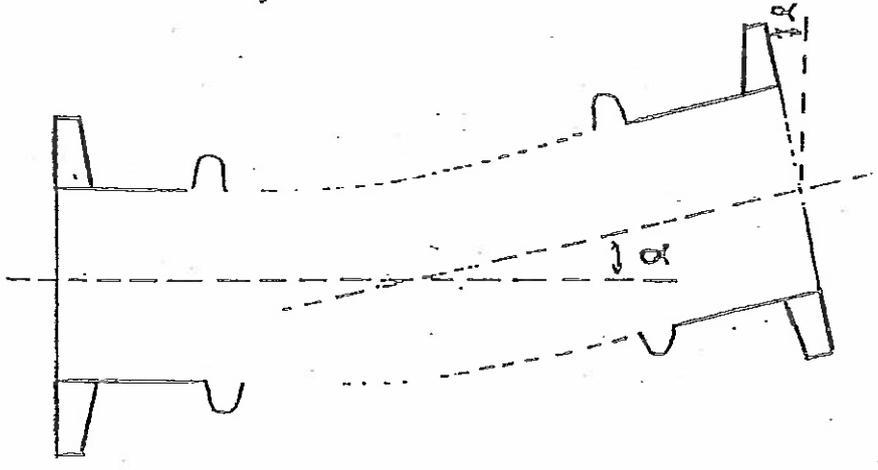
Entretanto, um agrupamento mais preciso e utilizado, é quanto a forma como o fluxo de gás é bloqueado ou regulado:

- Gaveta (gate), figura 10.e
- Placa (flap ou plate), figuras 10.b, 10.a
- Êmbulo, figura 10.f
- Plug, figura 10.c
- Globo (esfera), figura 10.h
- Borboleta, figura 10.g
- Cone, figura 10.d
- Diafragma, figura 11.c
- Agulha, figura 11.d
- Disco (disk): reta, angular; figuras 11.a e 11.b

Comprimento e deslocamento linear.



Deflexão angular.



Deslocamento paralelo entre flanges.

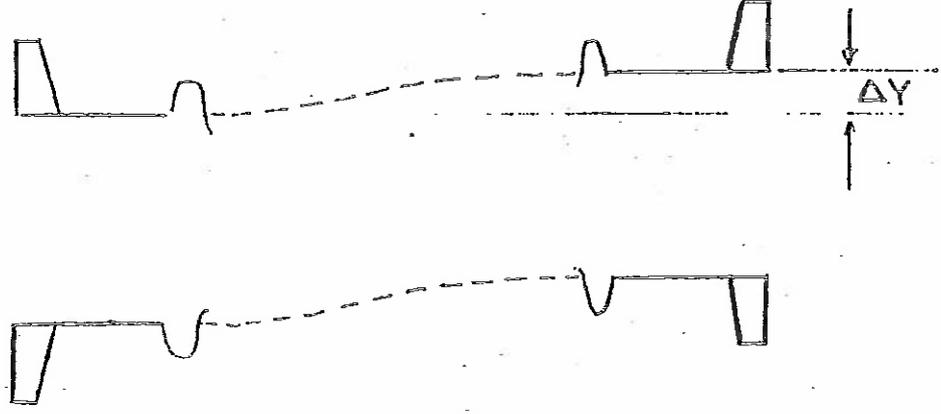


Figura 9. Tubo de conexão tipo fofo

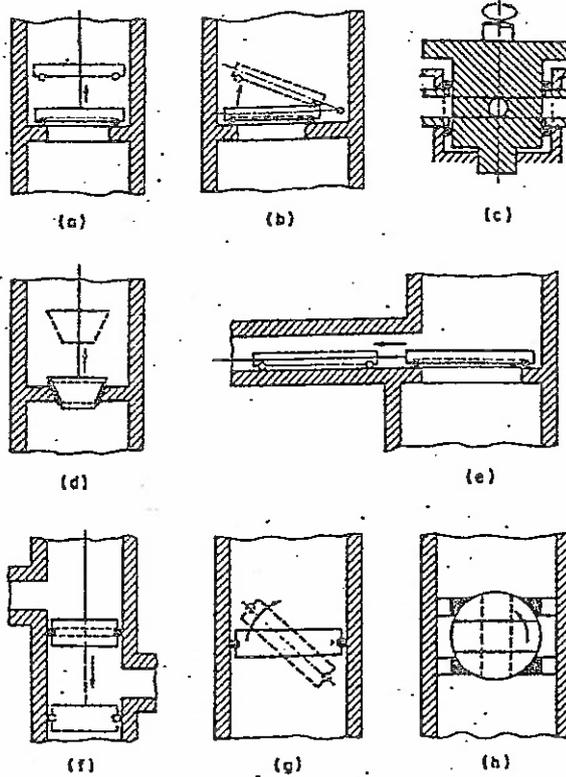


Fig. 7.62 Closing systems of vacuum valves using gasket seals. (a) plate valve; (b) flap valve; (c) plug valve; (d) cone valve; (e) gate valve; (f) plunger valve; (g) butterfly valve; (h) ball valve. After Roth (1966).

Figura 10. Tipos de válvulas de vácuo

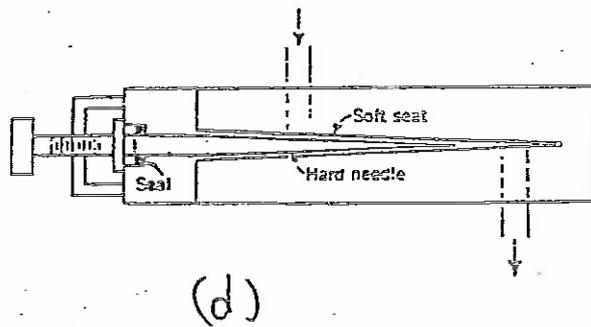
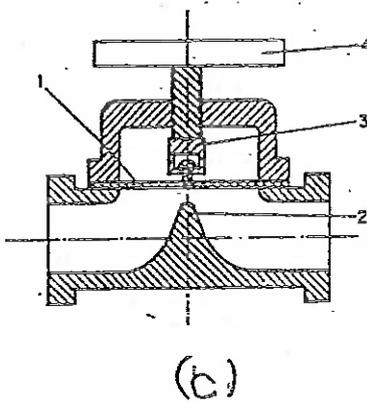
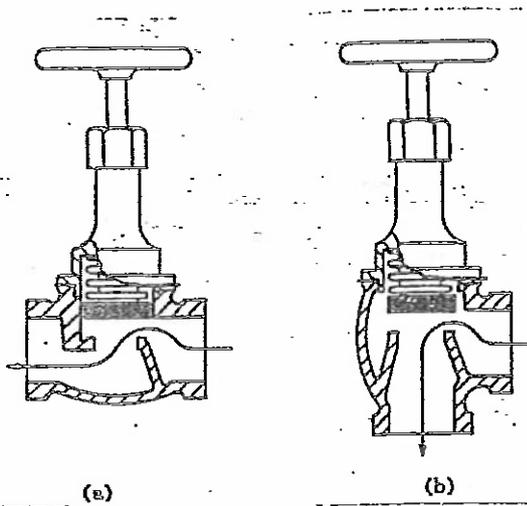


Figura 11. Tipos de válvulas de vácuo.

Estes tipos básicos de válvulas são mostradas nas Figuras 10 e 11. A especificação de uma válvula é dada através dos seguintes itens:

- Tipo de passagem (reta, ângulo)
- Diferencial e sentido de pressão
- Vazamento da válvula quando fechada
- Acionamento (manual, pneumática, eletromagnética, etc.)
- Pressão de trabalho (vedação, etc)
- Condutância da válvula em aberto
- Estanqueamento ou regulagem de fluxo

6. ANTEPAROS E ARMADILHAS

A finalidade de uma anteparo é bloquear a passagem direta de fluxos de gases de uma região para outra, normalmente condensando os gases em sua superfície. A utilização mais comum de anteparos é na boca das bombas difusoras para impedir que os vapores quentes do óleo da bomba atinjam outras partes do sistema. Normalmente, um anteparo é constituído por uma superfície fria para facilitar a condensação dos gases. Quando o anteparo é volumétrico e resfriado por um líquido, normalmente nitrogênio líquido, denomina-se armadilha. A Figura 12 mostra alguns tipos armadilhas utilizadas entre a bomba difusora e a câmara de vácuo.

É importante observar que os anteparos e ou armadilhas podem reduzir em até 50% a velocidade de bombeamento de uma bomba difusora, devido a redução da condutância. Entretanto, ela é muito útil pois evita a contaminação da câmara de vácuo pelo óleo da difusora. Por outro lado, devido ao efeito de condensação das moléculas pelo efeito criogênico, as armadilhas funcionam como uma bomba de vácuo.

Na maioria dos sistemas de bombeamento atuais, uma armadilha de nitrogênio líquido já vem incorporado na boca da bomba difusora, juntamente com uma válvula tipo gaveta ou borboleta.

7. PASSADORES

Um importante componente de vácuo são os passadores, que fazem a ligação entre o meio evacuado e a pressão atmosférica. Basicamente, pode-se agrupar os passadores de acordo com a sua finalidade, da seguinte forma:

- Alimentação elétrica (Figura 13.a)
- Transmissão de movimento (Figura 13.b)
- Passagem de luz (visores)

A Figura 13 mostra alguns dos tipos de passadores mais empregados. Na Figura 13.a tem-se um exemplo de passador empregado para a passagem de corrente elétrica isolado por vidro, em 13.b tem-se um exemplo de transmissão de movimento circular através de um diafragma, em 13.c têm-se vários modelos de movimento linear ou passagem de corrente elétrica que utiliza barras cilíndricas

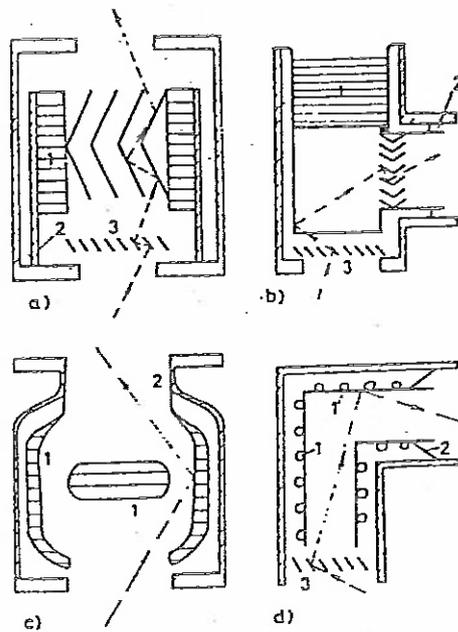
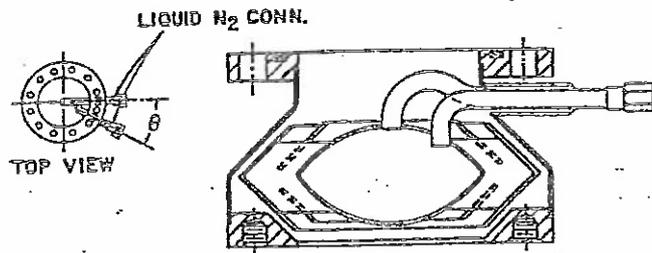
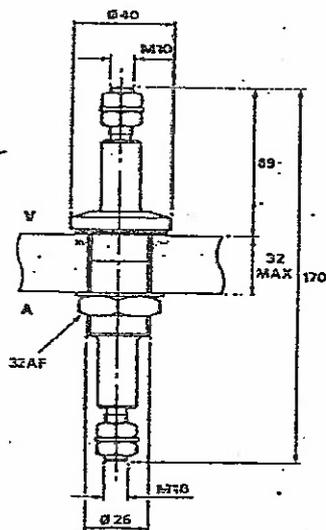
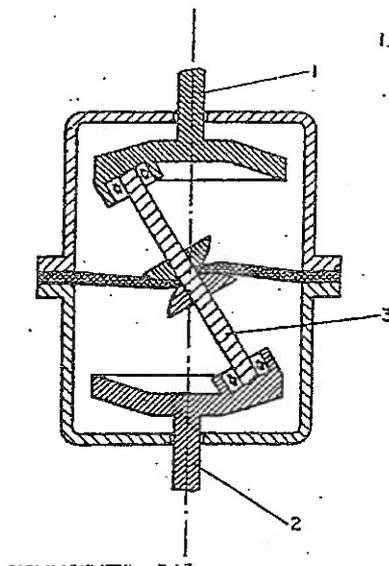


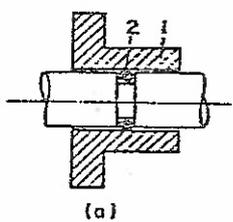
Figura 12. Tipos de armadilhas (frias)



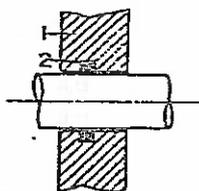
(a)



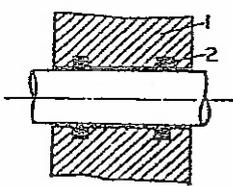
(b)



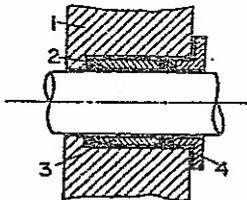
(a)



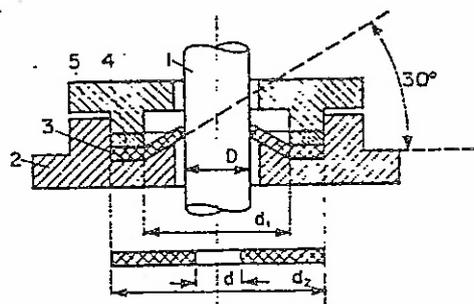
(b)



(c)



(d)



(d)

(c)

Figura 13- Tipos de passadores usados em vácuo. (a) corrente elétrica, (b) transmissão de movimento, (c) deslizamento, (d) selagem de Wilson

deslizando no interior de anéis de borracha, e em 13.d tem-se um tipo muito comum de passador denominado "selagem de Wilson".

8. FLUIDO PARA BOMBA DIFUSORA

Para um bom funcionamento de uma bomba difusora é necessário que o fluido utilizado tenha algumas características básicas:

- Baixa pressão de vapor
- Baixa viscosidade para voltar rapidamente para a câmara de ebulição
- Peso molecular grande para aumentar a probabilidade de colisão com as partículas a serem bombeadas
- Termicamente estável para não se decompor
- Não corrosivo
- Não tóxico

A Tabela 13 apresenta as propriedades dos principais fluidos para bombas difusoras.

Diffusion pump fluids.

Fluid	Chemical name	Molecular weight	Vapour pressure 25°C (Torr)	Boiling point at 10 ⁻² Torr (°C)	Viscosity at 25°C (centistokes)	Ref.
Amoil S	i-diamyl sebacate	343.3	10 ⁻⁸	111	—	(1)
Octoil	d-2-ethyl hexyl phtalate	390.3	3 × 10 ⁻⁷	122	75	
Octoil S	d-2-ethyl hexyl sebacate	426.3	3 × 10 ⁻⁸	1435	—	
Apiezon A	hydrocarbon	414	2 × 10 ⁻⁵	—	—	(2)
" B	"	468	4 × 10 ⁻⁷	110	—	
" C	parafinic hydrocarbon	574	4 × 10 ⁻⁸	125(265*)	295	
Silicone DC 702	Methyl poly-siloxanes	530	10 ⁻⁹	160	28	(3)
DC 703	"	570	10 ⁻⁷	200	58	
DC 704	Phenyl poly-siloxanes	484	10 ⁻⁸	216*	47	
DC 705	"	546	5 × 10 ⁻¹⁰	243*	170	
Santovac 5/ Conwalex 10	Mixed 5-ring polyphenil ether	447	1 × 10 ⁻⁸	288*	2500	(4)
Fomblin 425/9	Perfluoro-polyether	2600	5 × 10 ⁻⁸	252**	180	(5)

Data on Diffstak and diffusion pump fluids

	Apiezon					Silicone			Santovac 5	Fomblin 18/8	Edwards L9
	AP201	A	B	C	AP301	702	704EU	705			
Ultimate vacuum achievable at 20°C (typical) mbar	6.5 × 10 ⁻⁸	6.5 × 10 ⁻⁸	1.3 × 10 ⁻⁸	1.3 × 10 ⁻⁷	1.3 × 10 ⁻⁷	6.5 × 10 ⁻⁸	6.5 × 10 ⁻⁸	1.3 × 10 ⁻⁸	1.3 × 10 ⁻⁸	2.7 × 10 ⁻⁸	5 × 10 ⁻⁸
True vapour pressure (mbar) at 20°C	5 × 10 ⁻⁸	10 ⁻⁸	5 × 10 ⁻⁸	4 × 10 ⁻⁸	4.8 × 10 ⁻⁸	6.5 × 10 ⁻⁷	1.3 × 10 ⁻⁸	2.6 × 10 ⁻¹⁰	2.6 × 10 ⁻¹⁰	2.7 × 10 ⁻⁸	7.8 × 10 ⁻¹⁰
100°C	2.4 × 10 ⁻⁷	4 × 10 ⁻⁷	4.6 × 10 ⁻⁷	5 × 10 ⁻⁷	3.3 × 10 ⁻⁷	1.3 × 10 ⁻⁷	2.6 × 10 ⁻⁷	1.3 × 10 ⁻⁸	6.5 × 10 ⁻⁷	2.6 × 10 ⁻⁷	2.6 × 10 ⁻⁷
150°C	6.5 × 10 ⁻⁷	1.6 × 10 ⁻⁷	2.4 × 10 ⁻⁷	2.6 × 10 ⁻⁷	1.6 × 10 ⁻⁷	<10 ⁻¹	1.3 × 10 ⁻⁷	<10 ⁻²	4 × 10 ⁻⁷	1.2 × 10 ⁻⁷	2.3 × 10 ⁻⁷
Boiling temperature at 1.3 mbar (°C) (approximate)	160	190	220	255	225	185	223	254	295	240	251
Molecular weight (average)	310	354	420	479	584	530	484	546	446	2650	407
Viscosity cSt at 20°C (30°C)	34	59	142	283	23.7*	55	47	240	2400	190	71.3
100°C	5.0	4.5	7.0	10.6	4.78	4.9	4.3	7.9	12	9	5.6
150°C	2.7	2.2	3.0	4.0	—	2.4	2.2	3.3	4.5	—	1.2
Pour point °C (approximate)	-30	-7	-9	-15	-40	< -20	< -20	-10	+5	-42	-5
Flash point °C	196	210	243	246	277	193	221	243	288	None	241
Fire point °C (approximate)	204	232	263	293	305	275	275	275	350	None	281
Auto ignition point °C (approximate)	305	370	405	420	450	500	500	500	590	None	370
Specific heat cal/g/°C	0.46	0.46	0.49	0.46	0.45	0.42	0.41	0.42	—	0.24	0.46
Latent heat cal/g	69	50	55	52	50	40.9	52.7	51.6	49.2	—	42
Specific gravity at 25°C (20°C)	0.862	0.862	0.869	0.872	0.965†	1.07	1.07	1.09	1.195	1.89	0.901
Coefficient of expansion per deg C	0.0007 (10-30°C)	0.0007 (10-30°C)	0.0007 (10-30°C)	0.0007 (10-30°C)	0.0007 (20-40°C)	0.0008 (25-50°C)	0.0008 (25-50°C)	0.0005 (25-50°C)	0.0008 (10-30°C)	0.0009 (25°C)	0.00042 (10-50°C)
Refractive index at room temperature	1.4760	1.4780	1.4815	1.4830	1.453	1.516	1.557	1.579	1.6306 (N _D 25)	1.30	1.5154 (25°C)

Tabela 13. Fluidos para bomba difusora