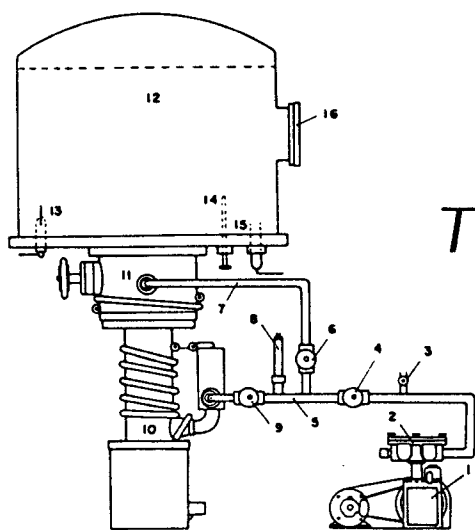


UNIVERSIDADE DE
SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA



*CURSO DE
TECNOLOGIA
DO VÁCUO*

B O M B A S

BOMBAS DE VÁCUO

As bombas de vácuo podem ser divididas em duas classes:

- 1) Bombas de pré-vácuo - são as bombas que começam a operar a pressão atmosférica e produzem vácuo de 10^{-2} - 10^{-3} torr, **p.ex.**, bombas mecânicas e bombas de sorção.
- 2) Bombas de alto-vácuo - são aquelas que só podem começar a operar em pressões mais baixas que a atmosférica e atingem pressões de 10^{-6} a 10^{-10} torr, **p.ex.**, bomba de difusão, bomba iônica, bomba criogênica e bomba turbo-molecular. Estas bombas precisam de uma auxiliar da classe (1) para fazer o pré-vácuo.

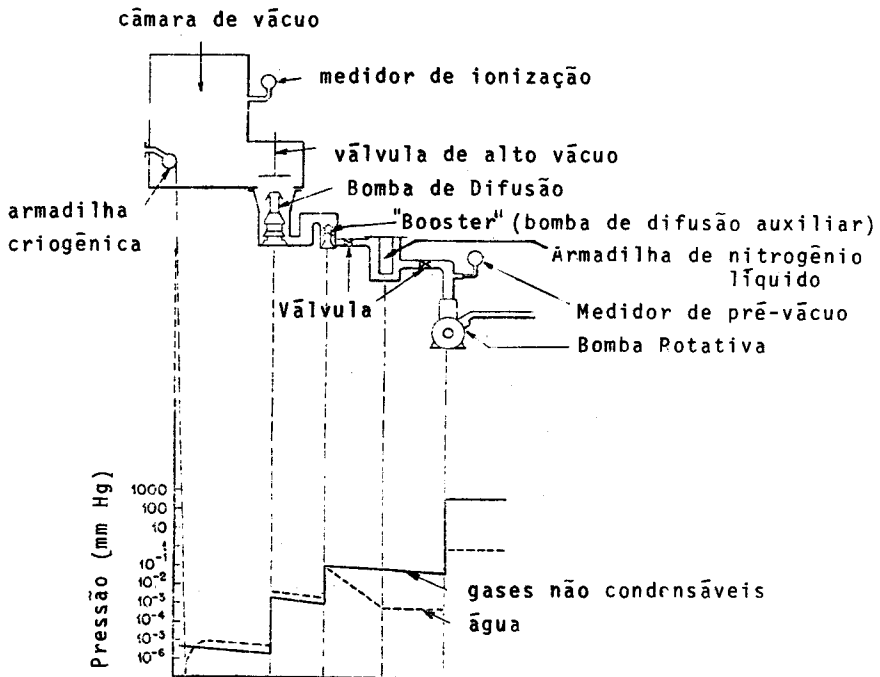


Fig. 1 - Distribuição de pressões em um sistema de vácuo com Bomba Mecânica (rotativa) mais Bomba de Difusão

Em geral, para atingir um alto vácuo usam-se duas bombas em série, uma de pré-vácuo e outra de alto vácuo ligada no sistema a ser evacuado. Neste laboratório, vamos usar somente para pré-vácuo bomba mecânica e, para alto vácuo, bombas de difusão.

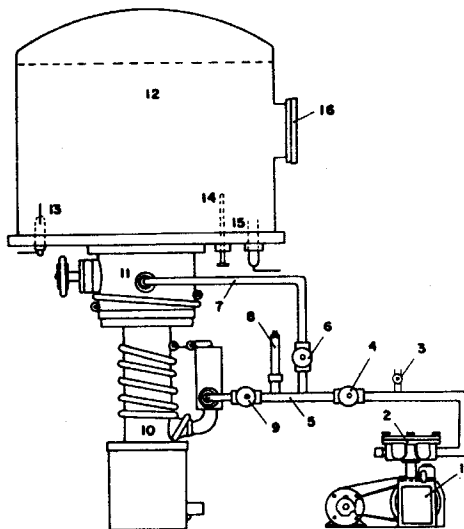
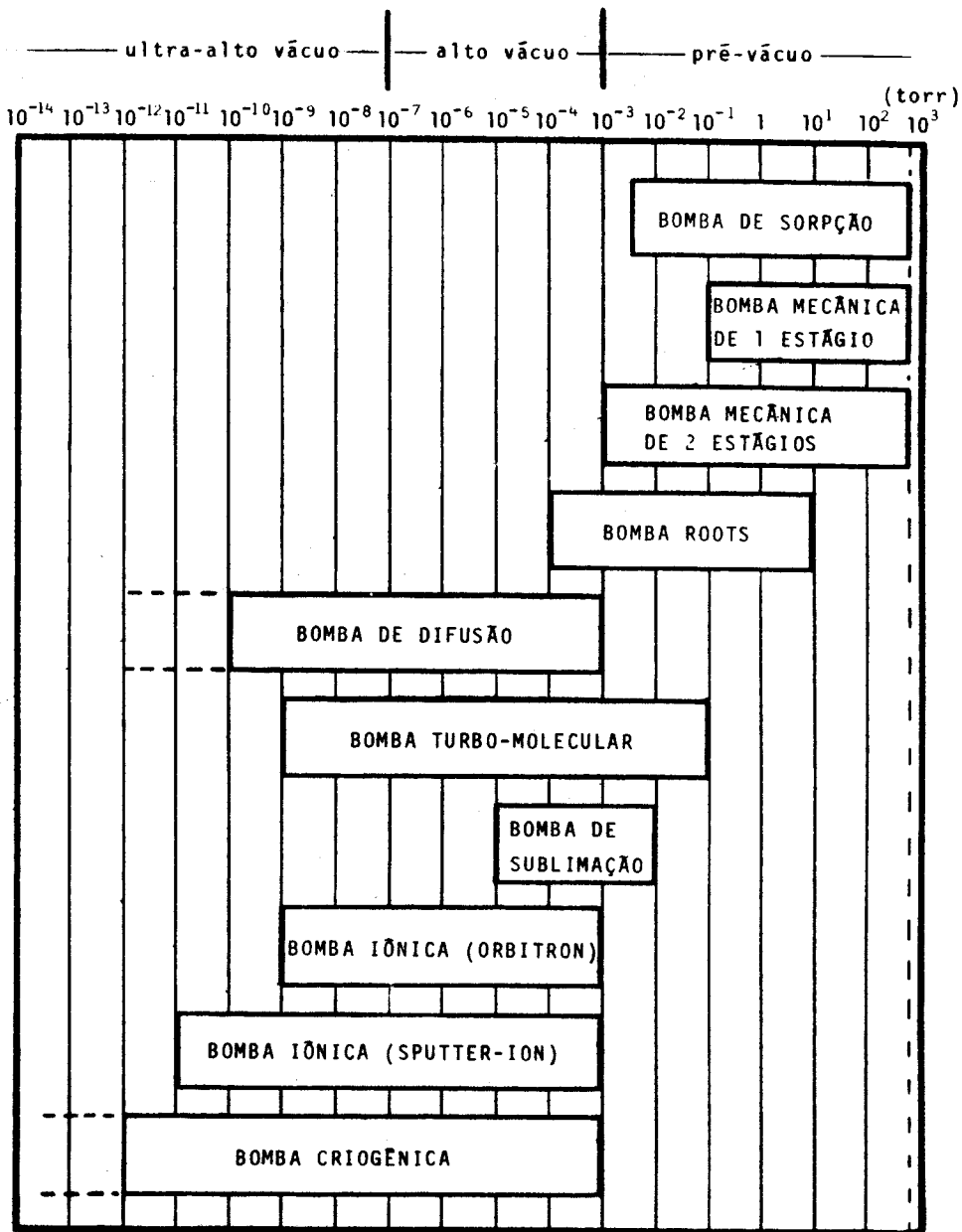


Fig. 2 - Um sistema de Vácuo típico

- | | |
|--------------------------------|--|
| 1 - bomba rotativa | 9 - válvula de pré-vácuo da bomba de difusão |
| 2 - armadilha para vapores | 10 - bomba de difusão |
| 3 - válvula de entrada de ar | 11 - válvula de alto vácuo |
| 4 - válvula de isolamento | 12 - câmara de vácuo |
| 5 - linha de pré-vácuo | 13 - passador de eletricidade |
| 6 - válvula de pré-vácuo | 14 - eixo giratório |
| 7 - linha de pré-vácuo inicial | 15 - medidor de descarga (Penning) |
| 8 - medidor Pirani | 16 - visor |

FAIXAS DE PRESSÃO DE TRABALHO DOS DIFERENTES TIPOS DE BOMBAS



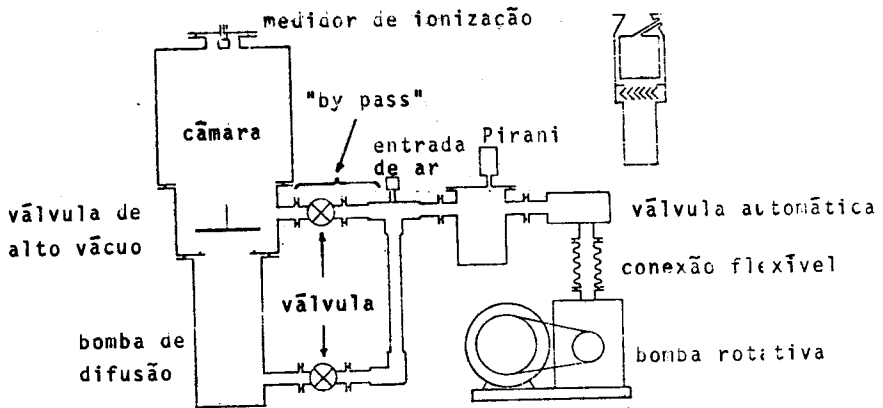


Fig. 3 - Sistema convencional de vácuo com Bomba Mecânica e Bomba de Difusão

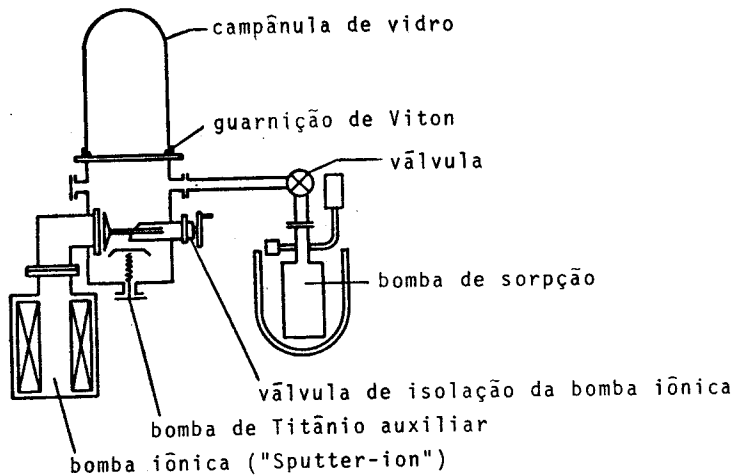


Fig. 4 - Sistema de ultra-alto vácuo isento de vapores de óleo e todo metálico (pode ser aquecido)

BOMBA ROTATIVA

Há vários tipos de bombas rotativas, mas o princípio de funcionamento é o mesmo. Um rotor cilíndrico varre o gás da região A (sistema de vácuo) para a região B à pressão atmosférica.

O rotor cilíndrico de aço, cujo eixo é acoplado por

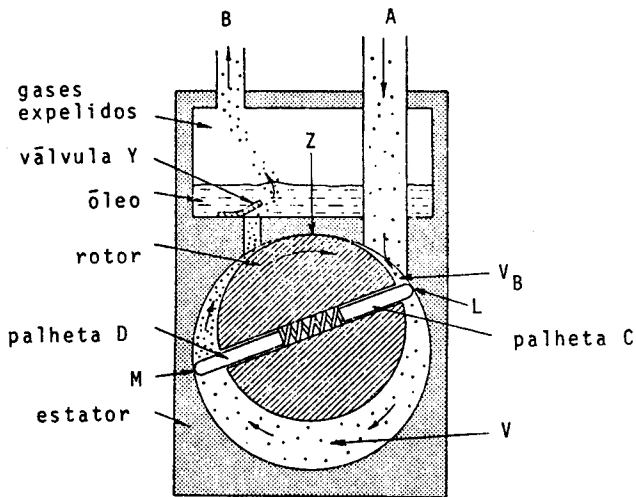


Fig. 5 - Desenho esquemático de uma Bomba Rotativa

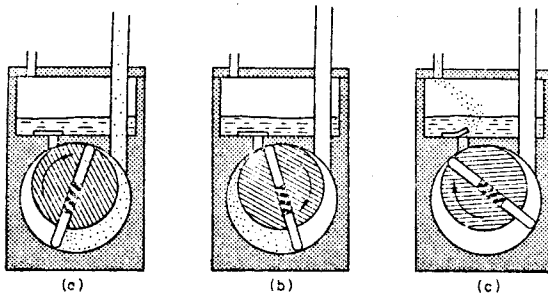


Fig. 6 - Seqüência de bombeamento

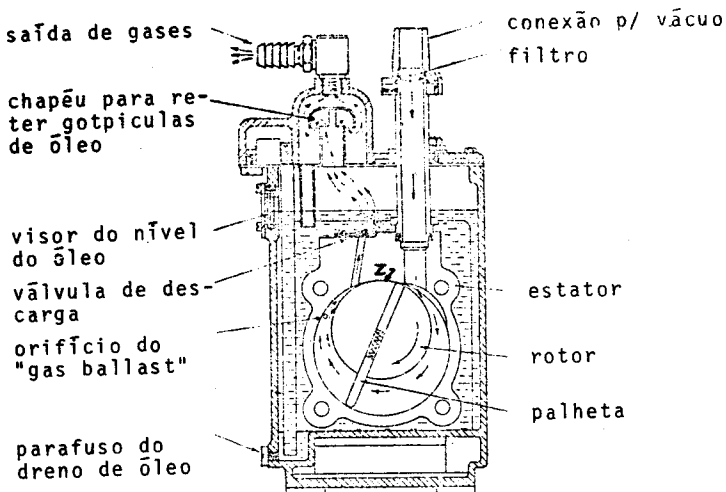


Fig. 7 - Desenho em corte de uma Bomba Rotativa ("Speedivac", fabricada pela Edwards)

meio de uma polia a um motor elétrico, gira dentro de um cilindro de aço fixo. Na parte de cima (ponto Z no desenho), o rotor encaixa bem justo no cilindro, com uma folga pequena da ordem de 0,001cm. Isto é para fazer a vedação entre a entrada e a saída da bomba. O rotor gira na direção que mostra a flecha. Duas palhetas C e D são colocadas num canal diametral do rotor. As palhetas são separadas por uma mola, de modo que sempre as suas pontas M e L encaixam com pressão na parede do cilindro fixo. Todo esse conjunto está colocado dentro de óleo, que serve para vedar e lubrificar o sistema.

Quando o rotor gira e a ponta L da palheta C passa a entrada A de ar, o volume V_E atrás da palheta se expande, fazendo com que a pressão diminua. Ao mesmo tempo, o volume V diminui, comprimindo o gás e aumentando a pressão, até que a válvula Y se abre e o gás é expelido para fora. Assim, em cada revolução por ter duas palhetas, a válvula se abre duas vezes e o volume $2V$ de ar é expelido. Se S é a velocidade da bomba e n o número de revoluções por segundo, então: $S = 2nV$ l/seg.

Disso, parece que S é independente da pressão. Na prática, S é independente da pressão até ~ 10 torr, mas, para pressões mais baixas, há vários efeitos secundários:

- a) há um vazamento de ar, devido à folga entre o rotor e o cilindro fixo;
- b) a pressão do vapor do óleo é alta;
- c) devido ao aquecimento, quando a bomba está funcionando, o óleo se decompõe em gases;
- d) para baixas pressões a impedância da entrada da bomba aumenta de modo que a pressão no volume V não atinge a pressão da câmara onde se faz o vácuo.

Estes fatores determinam também o limite mais baixo da pressão que pode ser atingida, da ordem de 10^{-2} torr.

Para conseguir pressão mais baixa, usam-se bombas de dois estágios, i.e., duas bombas acopladas em série. Com este sistema, pode-se conseguir pressões de até 10^{-4} torr.

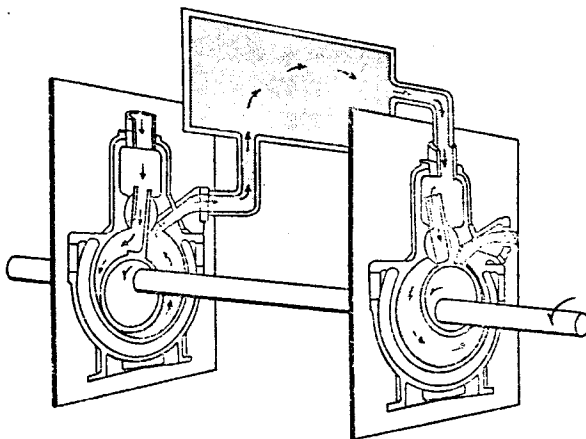


Fig. 10 - Esquema de Bomba Mecânica (modelo Kinney) de dois estágios.

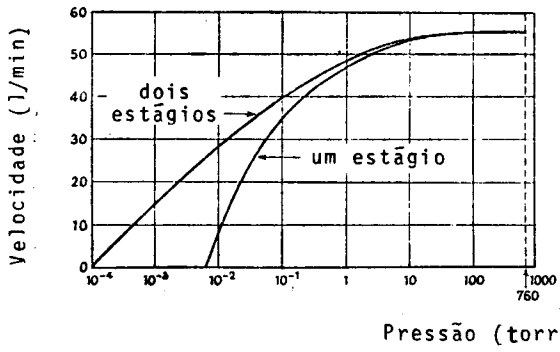


Fig. 11 - Curvas de Velocidade de Bombeamento para bombas rotativas de um e de dois estágios

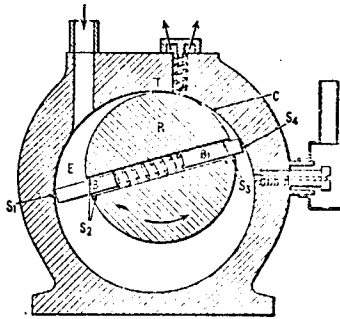


Fig. 12 - Bomba de palhetas desenvolvida por Gaede

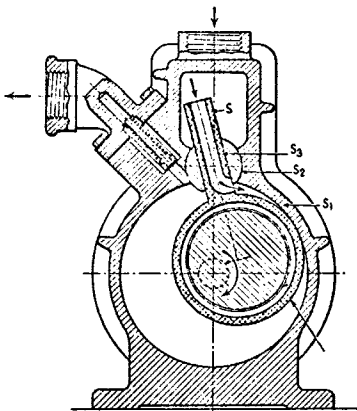


Fig. 13 - Modelo de pistão oscilante de Kinney

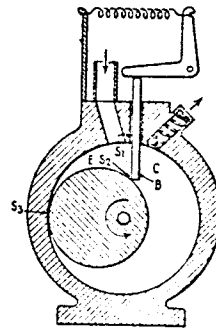


Fig. 14 - Bomba de uma só palheta da Cenco

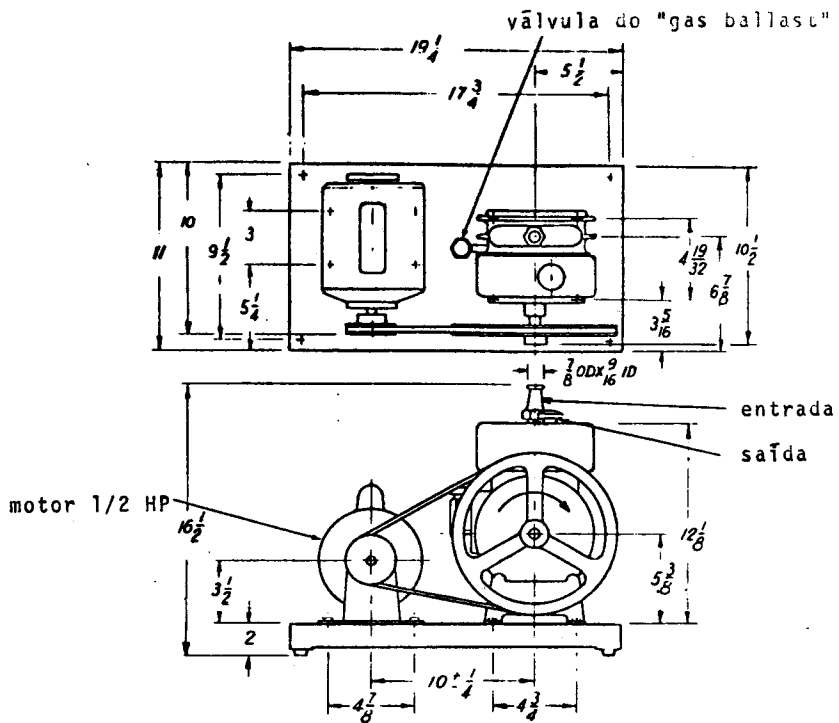


Fig. 15 - Desenho de Bomba Mecânica, marca Welch 1405 (USA) usada no laborat6rio didático (dimens6es em polegadas)

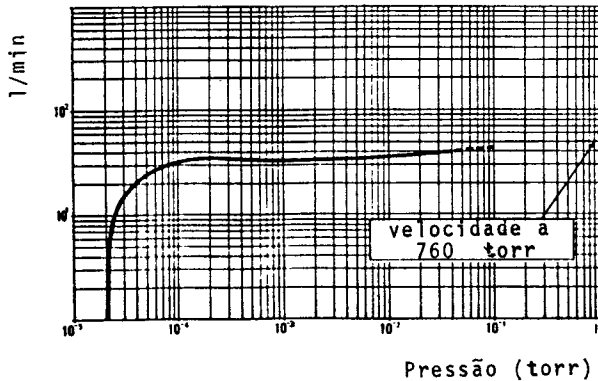


Fig. 16 - Curva de Velocidade de Bombeamento da Bomba Mecânica Welch 1405, de dois estágios, mostrada acima

Como a bomba rotativa funciona comprimindo o gás antes de expeli-lo, então, se este gás contiver grande proporção de vapor d'água, ao comprimi-lo vai haver condensação de água. Uma parte desta água em vez de ser expelida, vai se misturar com óleo. Isto é prejudicial para o óleo. Para diminuir este efeito, usa-se "gas ballast", i.e., introduz-se por meio de uma válvula P, um pouco de ar em cada ciclo, o que aumenta a pressão nesta região, forçando a abrir a válvula antes do tempo normal e diminuindo, assim, a razão de compressão. A pressão final no sistema fica mais elevada por um fator $10 - 10^2$, mas como o vapor

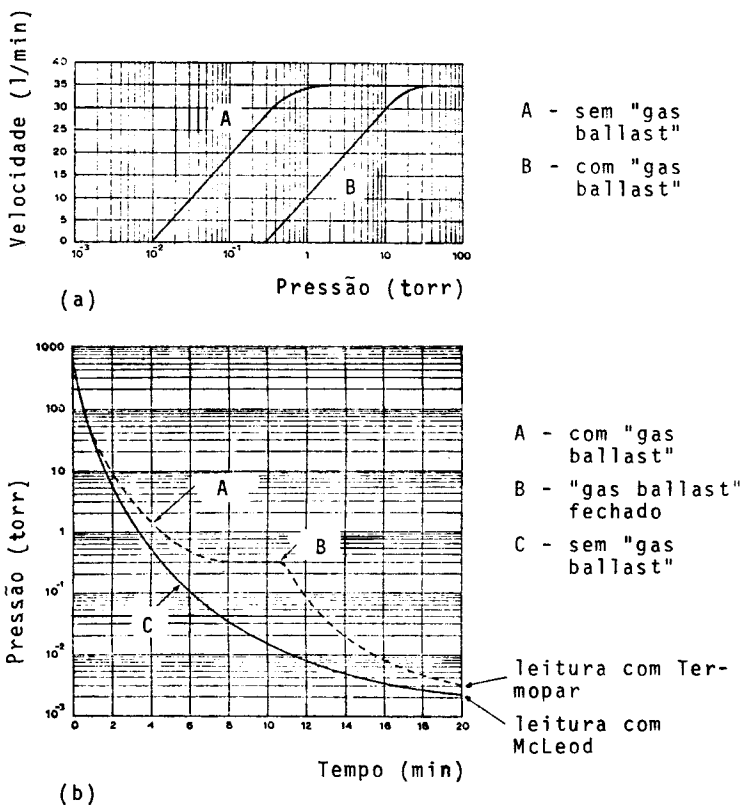


Fig. 17 - a) Curva de Velocidade de Bombeamento de uma Bomba Mecânica de um estágio com e sem "gas ballast"

b) Tempo necessário para bombear um recipiente de aço com e sem "gas ballast"

d'água é significativo só no começo do bombeamento, pode-se fechar a válvula de "gas ballast", reduzindo assim a pressão. No caso da bomba de dois estágios, o gas ballast está localizado no 2º estágio (o de pré-vácuo) e a diferença da pressão com e sem "ballast" é menor.

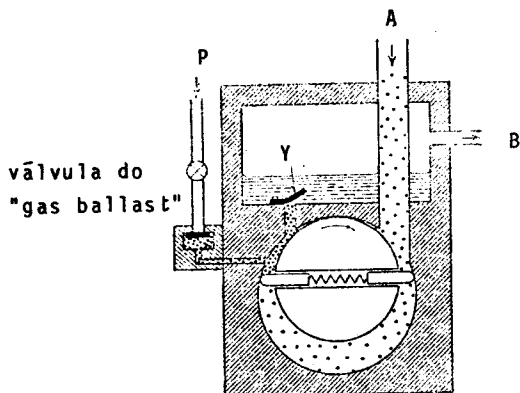


Fig. 18 - Esquema de Bomba Rotativa com "gas ballast"

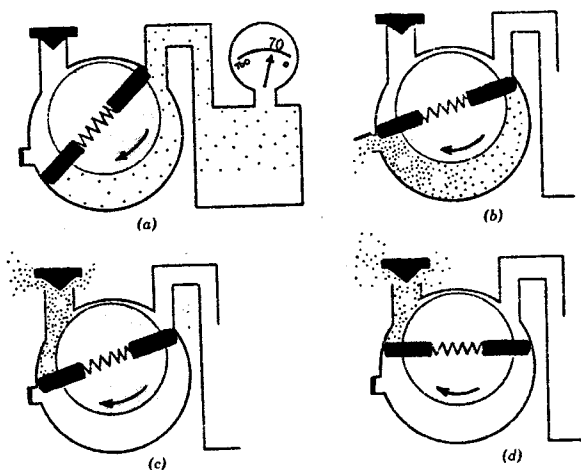


Fig. 19 - Esquema de funcionamento do "gas ballast":

- a) "gas ballast" ainda fechado;
- b) o "gas ballast" abre, admitindo a entrada de ar na câmara da bomba. O orifício de entrada da bomba já estava fechado;
- c) e d) expulsão dos gases e vapores não condensados (não há formação de gotículas no óleo).

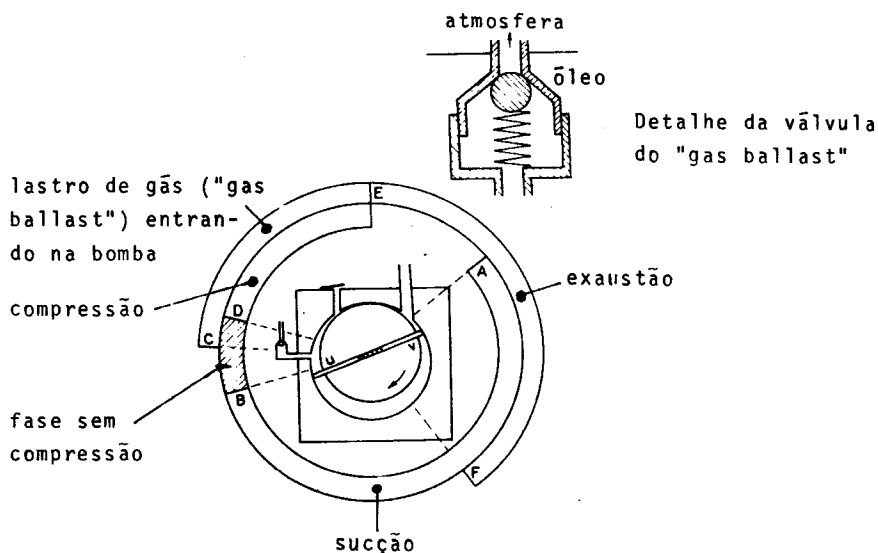


Fig. 20 - Princípio de funcionamento do "gas ballast"

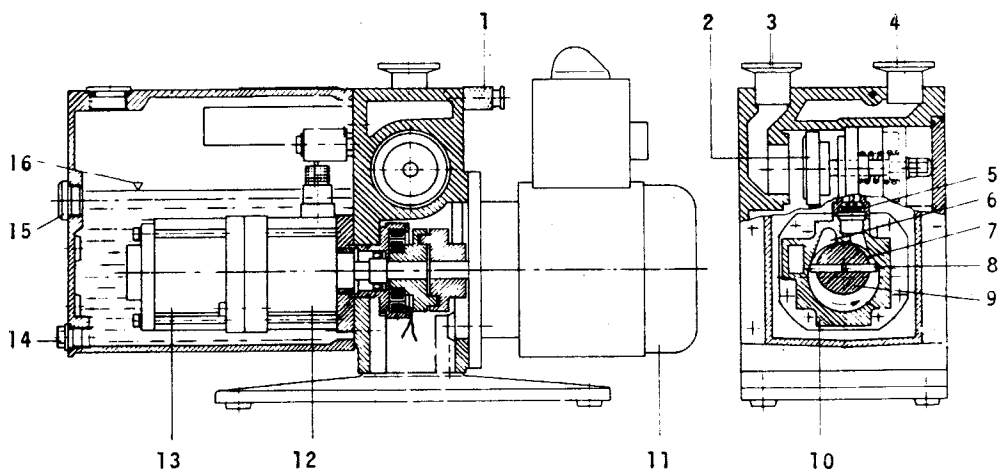


Fig. 21 - Desenho em corte de uma Bomba Mecânica de acoplamento direto, de dois estágios (Balzers, série DU0)

- | | | |
|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 1 - válvula do "gas ballast" | 6 - canal de entrada | 12 - 1º estágio |
| 2 - válvula da entrada da bomba | 7 - orifício do "gas ballast" | 13 - 2º estágio |
| 3 - entrada | 8 - palheta | 14 - dreno do óleo |
| 4 - saída | 9 - rotor | 15 - visor do nível do óleo |
| 5 - válvula da saída | 10 - estator | 16 - nível do óleo |
| | 11 - motor | |

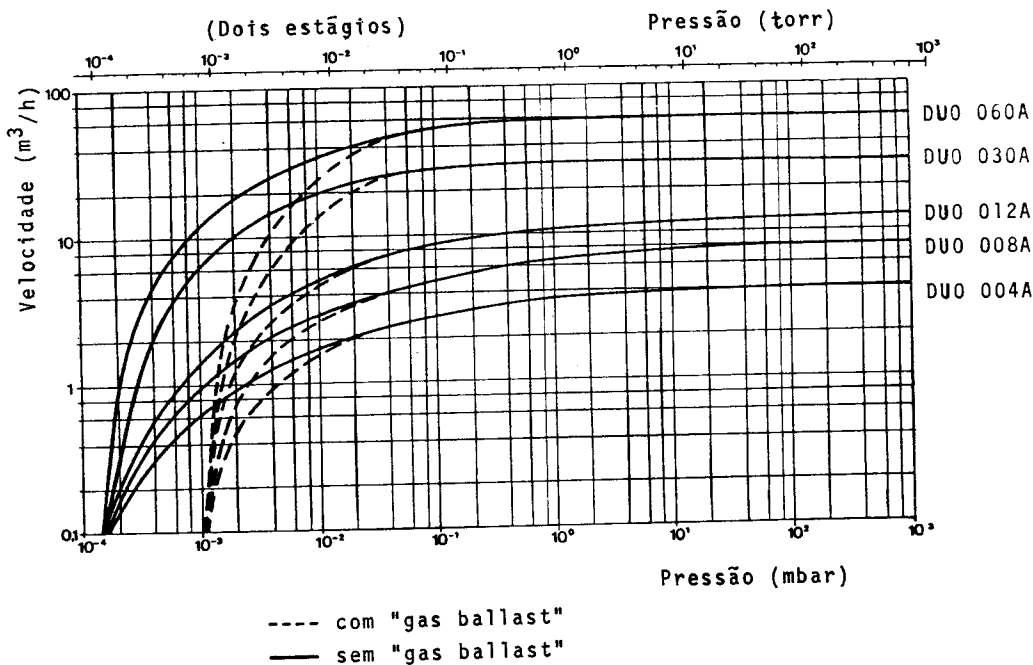
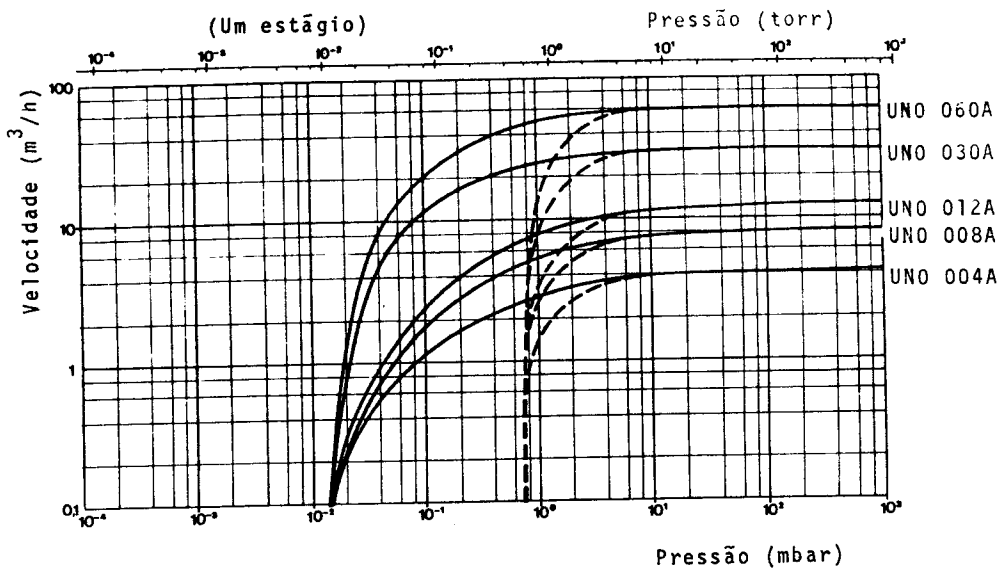


Fig. 22 - Curvas de Velocidade de Bombeamento das Bombas Mecânicas de acoplamento direto de um e dois estágios (Balzers)

BOMBA DE SORPÇÃO

As moléculas de gás podem ser removidas por adesão a superfície sólida (adsorção) e por penetração dentro do sólido (absorção). Nas reações gás-sólido, estes dois processos são praticamente indistinguíveis, e usa-se o termo geral sorpção. Bombeamento por sorpção refere-se a estes processos, quando visa produzir vácuo num sistema.

A bomba de sorpção consiste de um recipiente com um material que tem grande área superficial efetiva, e grande poder de sorpção de gases. Em geral, usa-se zeolita sintética, i. e., silicato de cálcio e alumínio. Estes silicatos cristalizam-se em forma cúbica, com uma molécula de água cristalizada. A água cristalizada é expelida por aquecimento deixando um "buraco" que fica à disposição do gás adsorvido. O diâmetro destes "buracos" é de 5-10 Å, portanto, correspondem à dimensão das moléculas do gás a ser adsorvido. O zeolita mais usado é de 5 Å.

Para aumentar a capacidade de bombeamento, costuma-se usar temperaturas baixas, colocando o recipiente com zeolita em nitrogênio líquido. Precisa-se lembrar que zeolita é um mau condutor, portanto, é aconselhável colocar palhetas de cobre sol-dadas na parede do recipiente para distribuir a temperatura mais uniformemente na zeolita.

Uma bomba de sorpção usando 2kg de zeolita pode bombear um sistema de 28 litros de pressão atmosférica até 10^{-1} torr em 15 minutos, com pressão final de $2 \cdot 10^{-2}$ torr. Mas uma vez que a zeolita é saturada de gás, começa então a desorpção. Portanto, cada bomba é provida de uma válvula para poder isolá-la do sistema e regenerar a zeolita. Para isso, basta tirar o nitrogênio líquido e abrir a bomba para pressão atmosférica. Se tiver muito vapor de água adsorvido precisa aquecer a bomba a $\sim 300^{\circ}\text{C}$.

Em sistemas grandes costuma-se usar duas ou três bombas de sorpção em paralelo. Primeiro, abre-se uma bomba por alguns minutos, depois fecha-se e abre-se outra. Desta maneira, consegue-se pressões $< 10^{-3}$ torr em bem pouco tempo.

Vantagens:

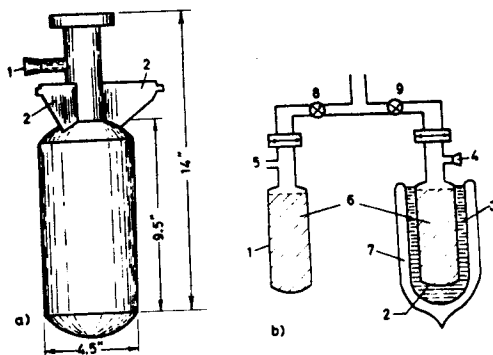
- 1) É uma bomba limpa. Serve muito bem principalmente para sistemas que não podem ser contaminados com vapor de óleo, e para fazer pré-vácuo para bombas iônicas.

- 2) Não produz trepidações e barulho
- 3) Fácil manutenção.

Desvantagens:

- 1) Necessita de nitrogênio líquido
- 2) Baixa eficiência de bombeamento para Hélio, Hidrogênio
- 3) Se tiver muito vapor de água, satura rapidamente.

Fig. 23



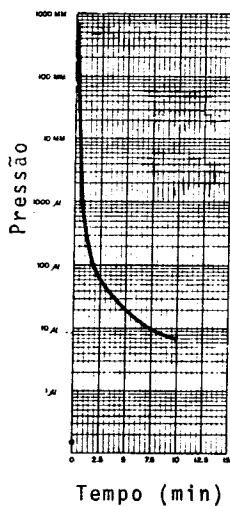
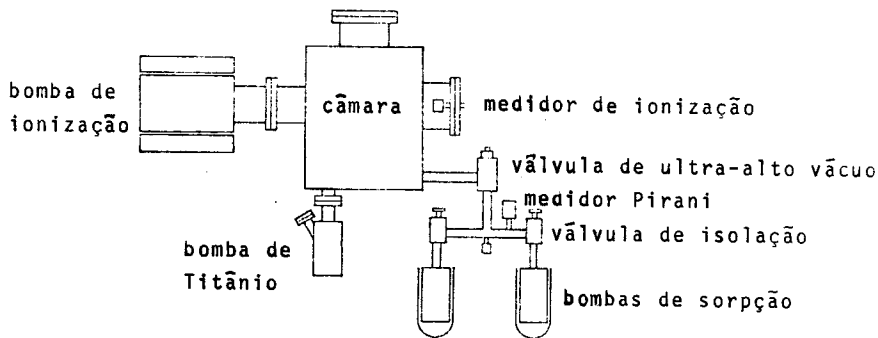
a) Bomba de Sorpção - vista externa (sem o "dewar")

- 1 - orifício de saída de gases da fase de recuperação (aquecimento)
- 2 - suporte do recipiente de nitrogênio líquido ("dewar")

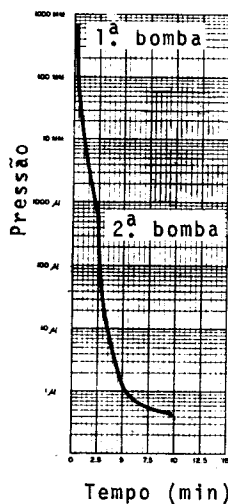
b) Duas bombas de sorpção interligadas

- | | |
|---|-------------------------------|
| 1 - bomba sendo reativada (por aquecimento) | 6 - zeolita |
| 2 - bomba em operação | 7 - "dewar" (garrafa térmica) |
| 3 - nitrogênio líquido | 8 - válvula fechada |
| 4 - orifício de saída de gases fechado | 9 - válvula aberta |
| 5 - orifício de saída de gases aberto (fase de recuperação) | |

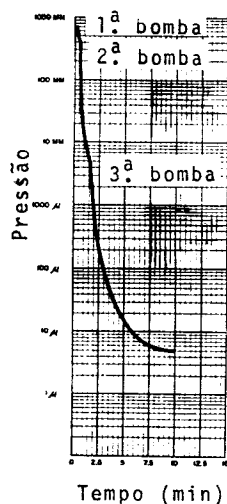
Fig. 24 - Exemplo de sistema típico com Bomba de Sorpção



(a)



(b)



(c)

Fig. 25

- a) Uma Bomba de Sorpção (ULTEK modelo 236-1500) bombeando um volume de 46 litros.
- b) Duas Bombas de Sorpção em série (idem) bombeando um volume de - 100 litros.
- c) Três Bombas de Sorpção em série (idem) bombeando 180 litros de - volume.

* Nos três casos, antes de iniciar o bombeamento, as bombas foram deixadas resfriando em nitrogênio líquido por 15 minutos.

BOMBA DE DIFUSÃO

Um jato de vapor com alta velocidade na direção A vai empurrar as moléculas de ar, do ponto B para A, criando um gradiente de pressão de tal maneira que $P_A > P_B$. Este fato foi utilizado na construção de bombas de difusão, onde o jato de vapor é produzido pelo óleo em ebulição.

O esquema seguinte, mostra uma bomba de difusão típica. O vapor de óleo aquecido sobe pela chaminé e sai do "nozzle" com uma velocidade supersônica dirigida para baixo. Ao colidir com as moléculas de gás, transmite a elas um momentum para baixo. Assim, o gás fica comprimido na parte inferior da bomba, de onde então a bomba mecânica pode bombeá-lo para fora. As paredes da bomba de difusão são resfriadas a ar ou água, para ajudar a condensação do vapor do óleo, e impedir que ele suba e entre no sistema de vácuo.

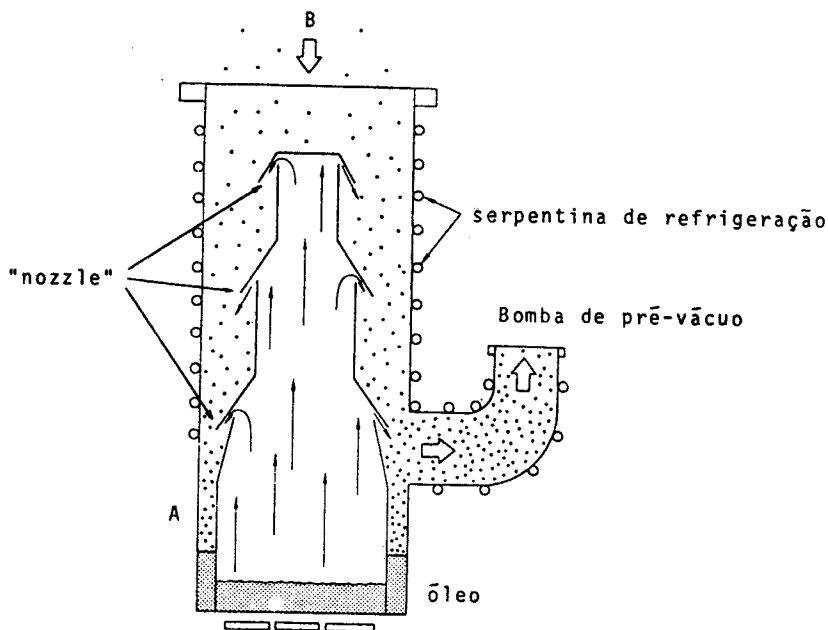


Fig. 26 - Esquema de uma Bomba de Difusão de três estágios

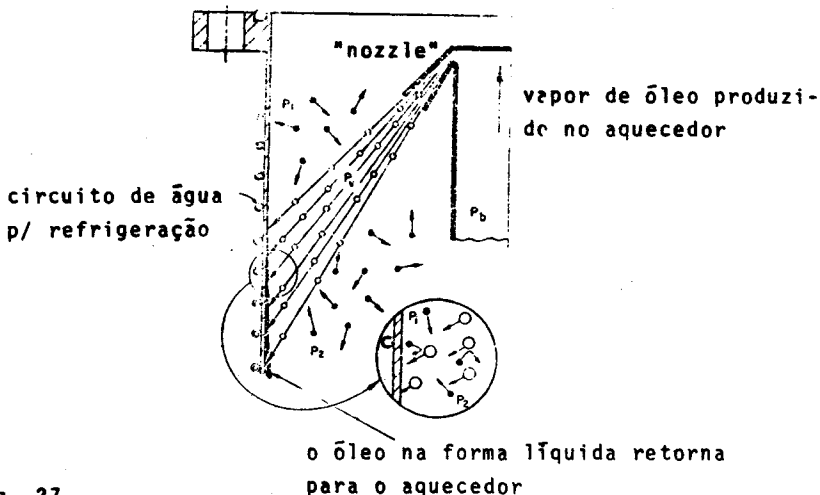


Fig. 27

Desenho esquemático mostrando o funcionamento de um estágio de Bomba de Difusão. Os círculos pretos representam as moléculas de gás e os brancos as moléculas de vapor de óleo.

A velocidade de bombeamento é determinada pela abertura da entrada da bomba e a distância entre o "nozzle" do último estágio e a parede. Quanto maior esta distância, maior a velocidade. Esta velocidade é aproximadamente constante para pressões menores de 10^{-3} torr até $10^{-7} - 10^{-8}$ torr, dependendo das características da bomba.

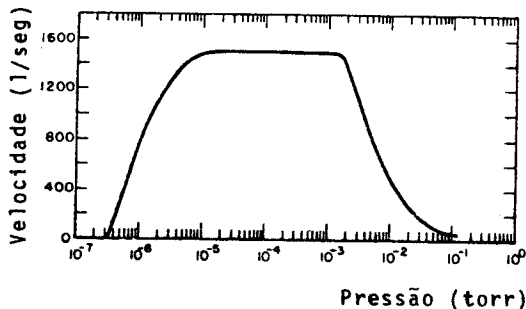


Fig. 28

Curva de Velocidade x Pressão típica de uma Bomba de Difusão

Para evitar o "backstreaming", costuma-se colocar um "baffle", ou seja, um anteparo na boca da bomba. Há vários tipos de anteparos: o mais simples é um disco, preso por duas hastes finas na boca da bomba. Mas qualquer anteparo reduz a velocidade em 30-50%.

Armadilhas de ar líquido servem também para diminuir o "backstreaming" condensando o vapor do óleo nas paredes. Armadilhas, também bombeiam o vapor d'água, baixando bastante a pressão no sistema. No esquema ao lado, temos uma armadilha típica de ar líquido. A velocidade de bombeamento em geral, fica reduzida de uns 50%, devido à sua alta impedância.

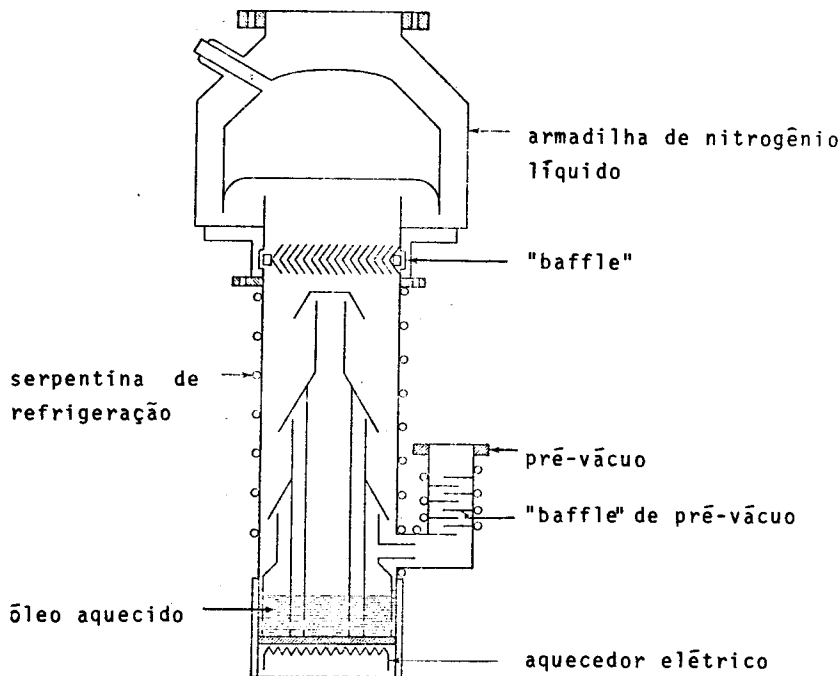
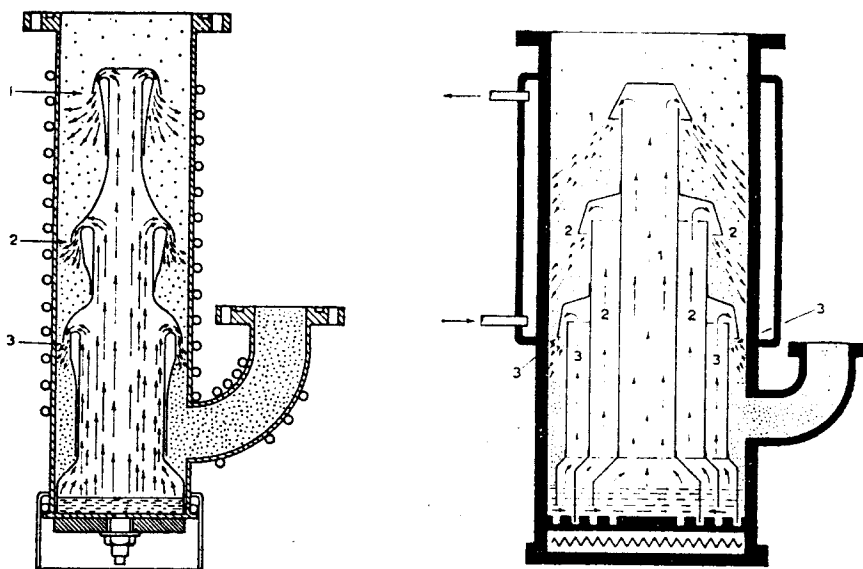


Fig. 29 - Bomba de Difusão com "baffle" chevron e armadilha de nitrogênio líquido ("cold trap")

Com a bomba de difusão precisa-se tomar o cuidado de nunca deixá-la com pressão alta enquanto o óleo está quente, porque as moléculas de óleo se decompõem facilmente em gases, em altas temperaturas e pressões. Assim, é preciso primeiro fazer o pré-vácuo com a bomba mecânica até 10^{-2} mm e então ligar a bomba de difusão. A refrigeração da bomba sempre precisa ser ligada para evitar que o vapor do óleo entre no sistema de vácuo e o contamine.



(a)

(b)

Fig. 30 - Esquemas de Bombas de Difusão de três estágios

- a) desenho mais antigo; o óleo aquecido não sofre nenhum processo de purificação
- b) com tubos concêntricos permitindo a purificação do óleo por - destilação fracionada, durante o funcionamento (o vapor de óleo mais aquecido e limpo sai pelo chapéu ("nozzle") 1).

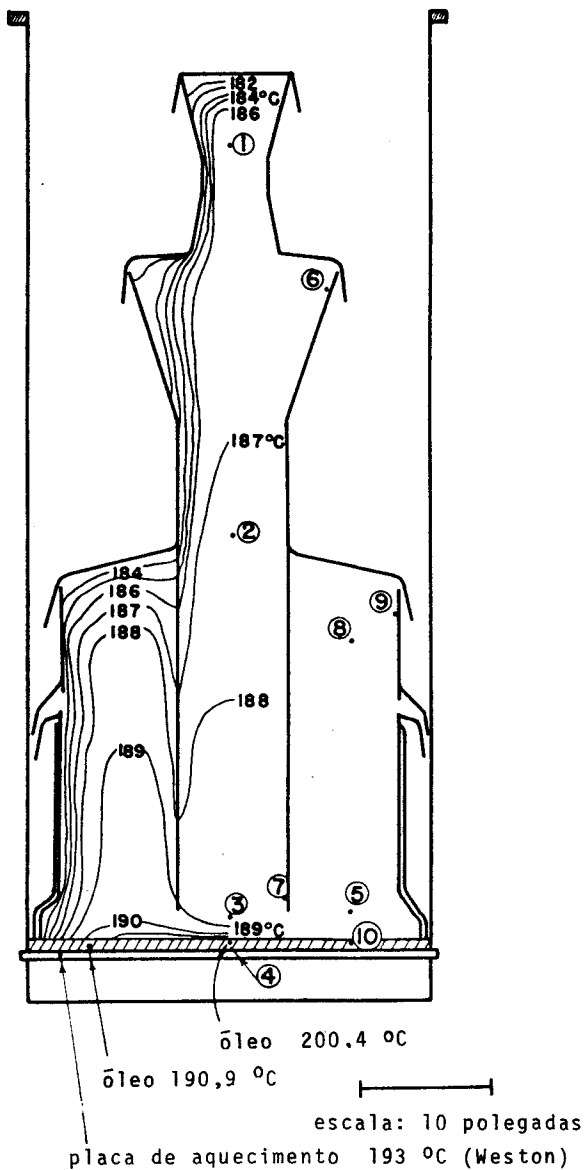


Fig. 31 - Diagrama isotérmico de uma Bomba de Difusão de 32".
 Os pontos numerados representam a localização dos
 termopares utilizados nas medições das temperaturas.

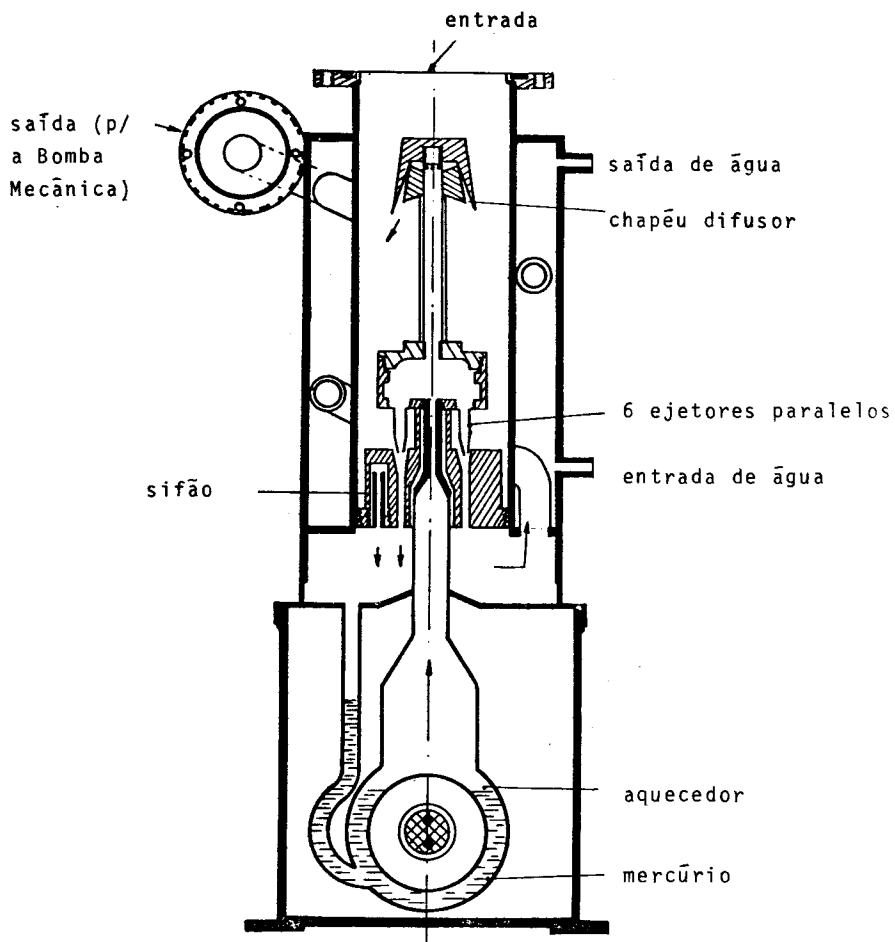


Fig. 32 - Bomba de Difusão de mercúrio com seis ejetores

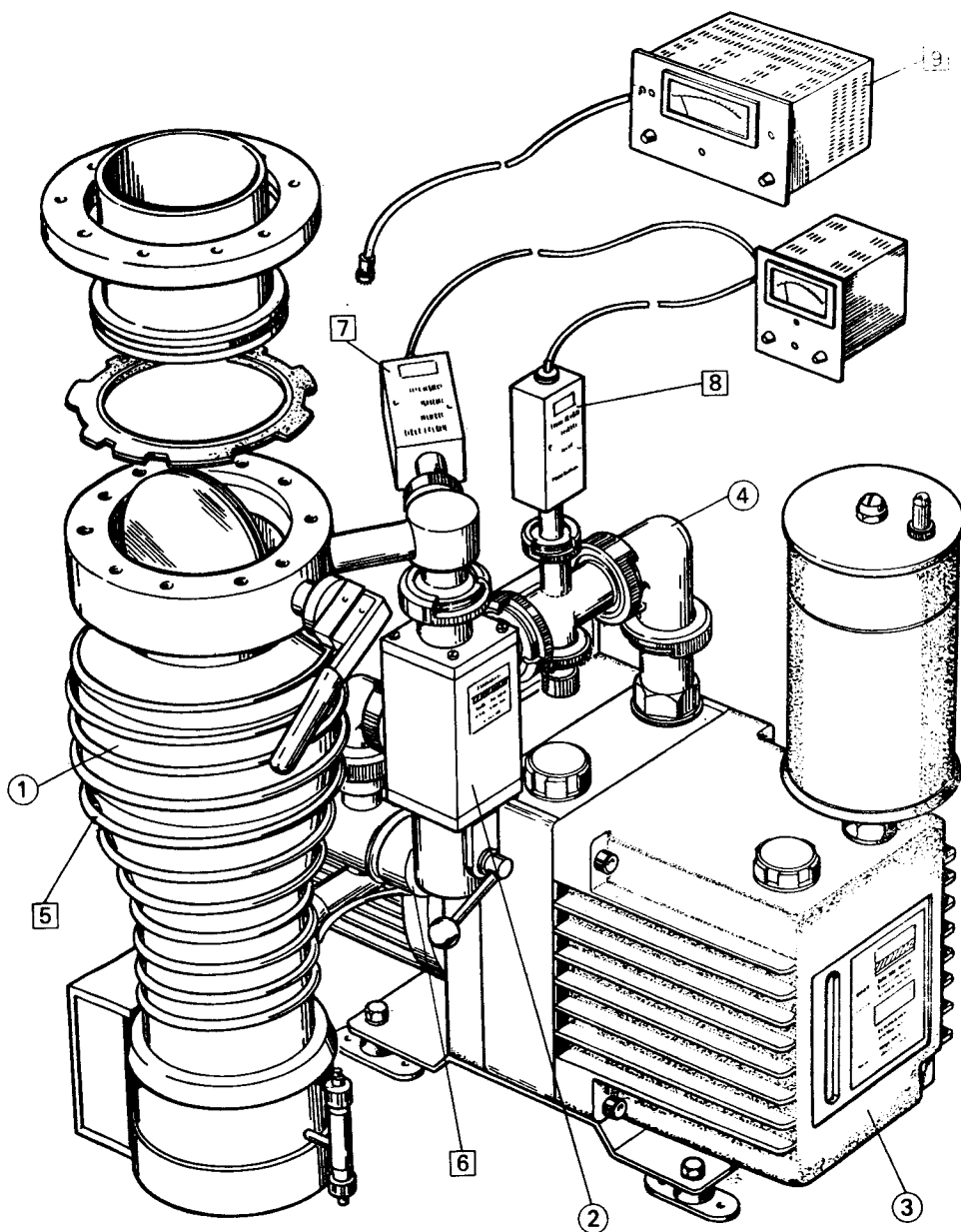


Fig. 33 - Sistema de Vácuo moderno (Edwards)

- | | |
|---|--|
| <p>1 - Bomba de Difusão com válvula acoplada ("Diffstak")</p> <p>2 - Válvula de isolamento (3 vias)</p> <p>3 - Bomba Mecânica (acoplamento direto)</p> <p>4 - Componentes modulares</p> | <p>5 - Serpentina de refrigeração</p> <p>6 - interruptor térmico</p> <p>7 e 8 - Medidor de pré-vácuo (Pirani)</p> <p>9 - Medidor de alto vácuo (o sensor está na câmara)</p> |
|---|--|

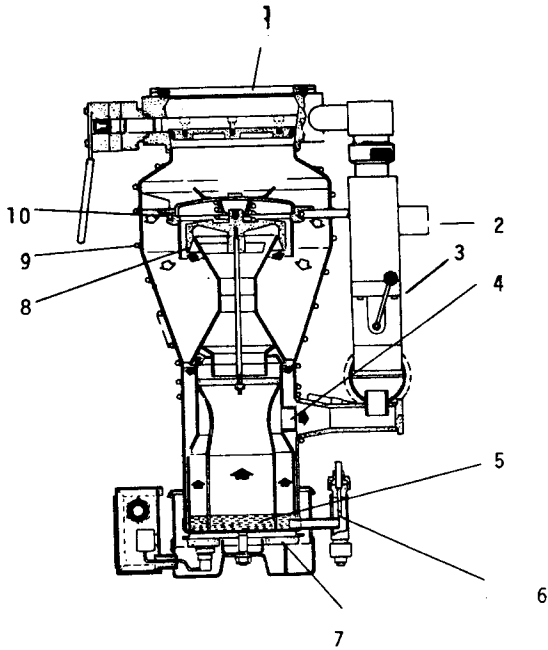


Fig.34 - Desenho em corte de uma Bomba de Difusão modelo "Diffstak" (Edwards) montada já com as válvulas.

- | | |
|--|---------------------------------------|
| 1 - Válvula de alto vácuo (tipo borboleta) | 6 - dreño para troca de óleo |
| 2 - saída para a Bomba Rotativa | 7 - aquecedor elétrico |
| 3 - Válvula de pré-vácuo (3 vias) | 8 - "nozzle" |
| 4 - estágio ejetor | 9 - serpentina de refrigeração a água |
| 5 - óleo aquecido | 10 - "baffle" refrigerado a água |

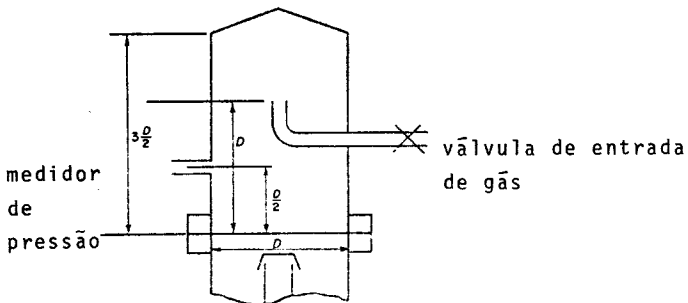


Fig. 35 - Câmara padrão para medir velocidade de bombeamento de uma Bomba de Difusão.

BOMBA ROOTS

Esta bomba é utilizada em sistemas de vácuo onde uma grande quantidade de gases precisa ser bombeada. Sua faixa de trabalho, de 10 torr até 10^{-5} torr, é justamente aquela onde os outros tipos de bombas são menos eficientes em termos de velocidade de bombeamento. Nestes casos, a bomba Roots, também chamada "Booster", atua como auxiliar de um sistema de, por exemplo, uma bomba mecânica e uma bomba de difusão. .

Sua maneira de bombear é semelhante à da bomba mecânica com uma diferença importante: os dois rotores (em forma de um oito) não tocam o estator; existe uma folga da ordem de 0,1 mm entre eles e o estator. Por este motivo, esta bomba não precisa de óleo lubrificante para funcionar, exceto na caixa de engrenagens que fica fora da câmara de vácuo, não contaminando, portanto, o sistema.

Os dois rotores giram em sentidos opostos, e seu movimento é sincronizado por engrenagens como se pode ver no desenho. Os gases (e vapores) a serem bombeados entram na bomba pela flange de entrada e preenchem a área sombreada mostrada em (a). À medida que os rotores giram, os gases ocupam a área entre os rotores e a parede do estator (visto em b) até serem aprisionados como se vê em (c). Seguindo o seu movimento, os rotores expulsam os gases pela flange de saída, normalmente conectada a uma bomba mecânica. Os rotores girando em alta rotação, na maioria das bombas 3.000 rpm, não permitem que as moléculas voltem através da folga existente entre eles e o estator. Isto, contudo deixa de ser válido para pressões muito baixas; daí o limite de 10^{-5} torr para estas bombas.

Estas bombas são empregadas em uma ampla variedade de aplicações que determinarão as características particulares para cada caso. Assim, existem no mercado bombas com velocidades de bombeamento desde $125 \text{ m}^3/\text{h}$ até $33.000 \text{ m}^3/\text{h}$, operando em diferentes faixas de pressão: quando for preciso pressões finais baixas, 10^{-5} torr por exemplo (só bomba Roots e mecânica), usa-se bombas de dois ou mais estágios.

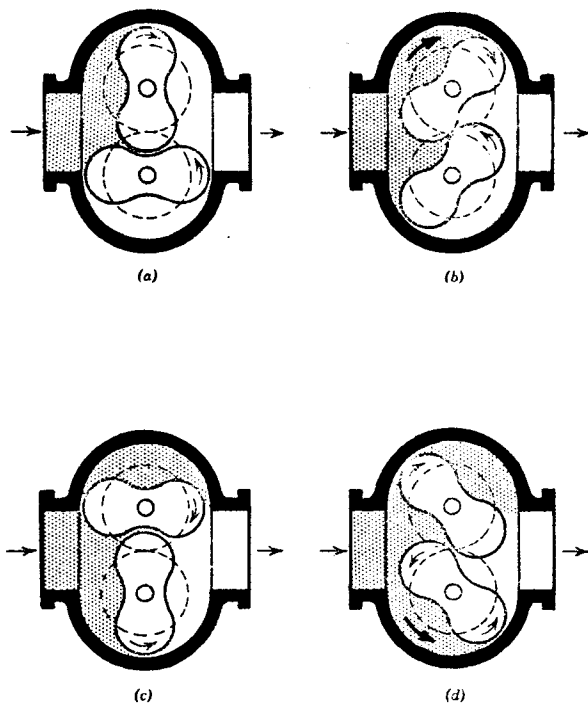


Fig. 36 - Seqüência de funcionamento de uma Bomba Roots

A quantidade de gás efetivamente transportada pela bomba é obtida da equação:

$$Q_{ef} = Q_t - Q_b$$

onde

Q_t é a quantidade teórica de gás transportado

e

Q_b é a quantidade de gás que retorna ao sistema (o "backstreaming")

A velocidade de bombeamento teórica da bomba Roots é obtida por:

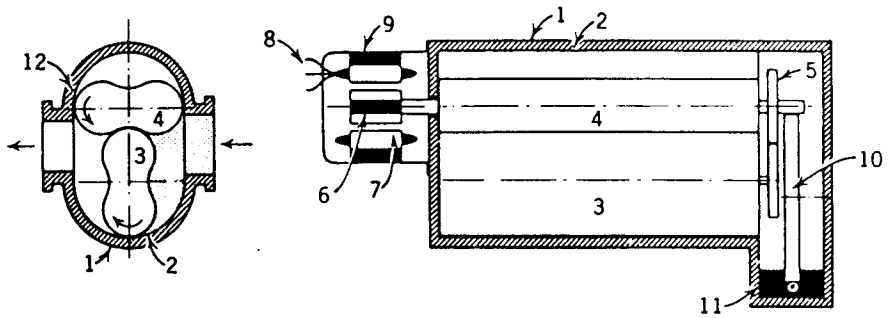
$$S_t = n \cdot V_s \quad (\text{m}^3/\text{h})$$

onde

n é o número de revoluções por unidade de tempo

e

V_s o volume varrido pelo rotor (visto em \underline{c} , no rotor superior)



- | | |
|--|---|
| 1 - corpo da bomba | 8 - conexões elétricas do motor |
| 2 - superfície interna (não toca os rotores) | 9 - refrigeração a água do motor (bombas grandes) |
| 3 e 4 - rotores (não se tocam) | 10 - bomba de óleo para as engrenagens |
| 5 - engrenagens | 11 - reservatório de óleo lubrificante (sô para as engrenagens) |
| 6 - rotor do motor | |
| 7 - estator do motor | |

Fig. 37 - Esquema de uma Bomba Roots.

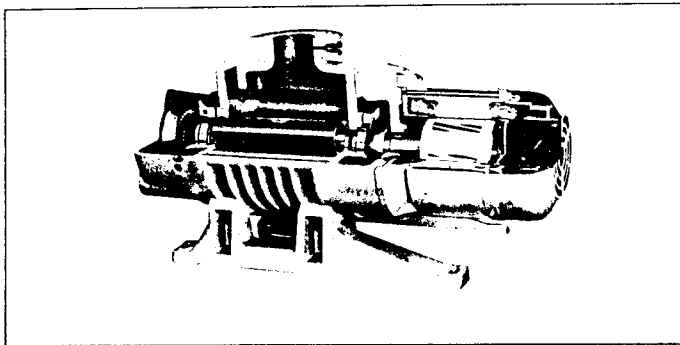


Fig. 38 - Vista em corte de uma Bomba Roots de um estágio.

Velocidade de bombeamento

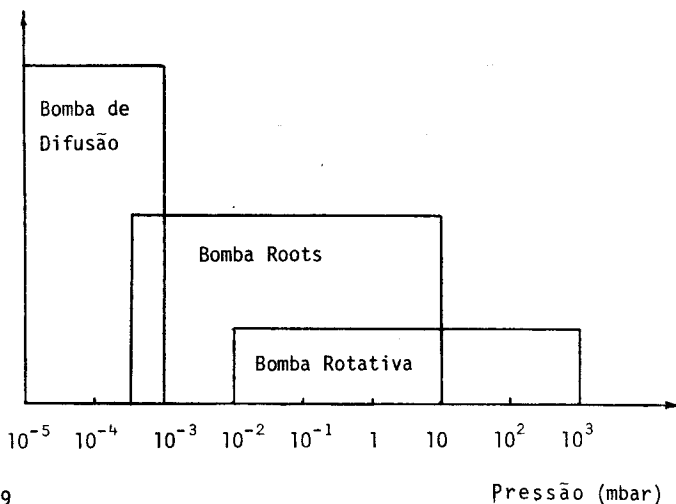


Fig. 39

Pressão (mbar)

Conhecendo-se a pressão P_e na entrada da bomba, pode-se calcular a quantidade teórica de gás transportado:

$$Q_t = P_e \cdot S_t = P_e \cdot n \cdot V_s$$

A quantidade de gás Q_b que retorna ao sistema possui dois componentes: Q_{b1} e Q_{b2} .

A parte Q_{b1} é devida à deficiência na vedação entre os rotores e as tampas laterais da bomba. Pode ser calculada por:

$$Q_{b1} = L (P_s - P_e)$$

onde L é a condutância dos "vazamentos" entre os rotores e as tampas laterais

P_s é a pressão no lado de pré-vácuo

P_e é a pressão na entrada da bomba (alto vácuo)

A parte Q_{b2} reúne os demais fatores que não dependem de uma perfeita vedação entre as peças da bomba. Podemos mencionar aquelas moléculas que ficam adsorvidas nas paredes dos rotores na passagem pela região de alta pressão (a saída) e que, ao passarem pela região de baixa pressão (a entrada) escapam das paredes dos rotores, retornando ao sistema. Além destas, temos ainda

a degasificação das cavidades das partes metálicas. Estas influências todas podem ser calculadas pela relação:

$$Q_{b_2} = S_r \cdot P_s$$

Com estas relações combinadas, chega-se à quantidade efetiva de gás bombeado Q_{ef} :

$$Q_{ef} = P_e \cdot S_{ef} = P_e \cdot S_t - L(P_s - P_e) - S_r \cdot P_s$$

Pode-se a seguir calcular o segundo parâmetro mais importante de uma bomba Roots: a razão de compressão máxima $K_{m\acute{a}x}$ - (o primeiro é a velocidade de bombeamento nominal S_t)

$$K_{m\acute{a}x} = \frac{P_s}{P_e} = \frac{S_t + L}{S_r + L}$$

Como L é muito pequeno em relação a S_t , se pode simplificar a relação para:

$$K_{m\acute{a}x} = \frac{S_t}{S_r + L}$$

Na faixa de altas pressões ($P_s > 10$ torr) o valor de S_r pode ser desprezado. Já em pressões baixas ($P_s < 10^{-1}$ torr) - predomina o fluxo molecular e o valor de L se torna desprezível em relação a S_r . Como a magnitude da condutância L aumenta com a pressão na região de fluxo viscoso e, por outro lado, o valor de S_r aumenta com o abaixamento da pressão, a razão de compressão máxima $K_{m\acute{a}x}$ diminui tanto com o aumento da pressão P_s , quanto com a sua diminuição, atingindo um pico em torno de 1 torr (razões de 50:1 ou mais são assim obtidas; em pressões elevadas, esta razão não vai além de 3:1). Acima de 300 torr, a bomba Roots não consegue mais empurrar o gás para a atmosfera; é preciso então uma bomba rotativa para completar o ciclo de bombeamento.

A pressão final atingível será dada pela relação:

$$P_f = \frac{P_s}{K_{m\acute{a}x}}$$

Para bombas de dois estágios o tratamento matemático - exposto acima continua válido. Com isto, o valor de $K_{m\acute{a}x}$ passa a ser aproximadamente igual ao quadrado do valor $K_{m\acute{a}x}$ de uma bomba de um só estágio e do mesmo tamanho, resultando em uma pressão final mais baixa.

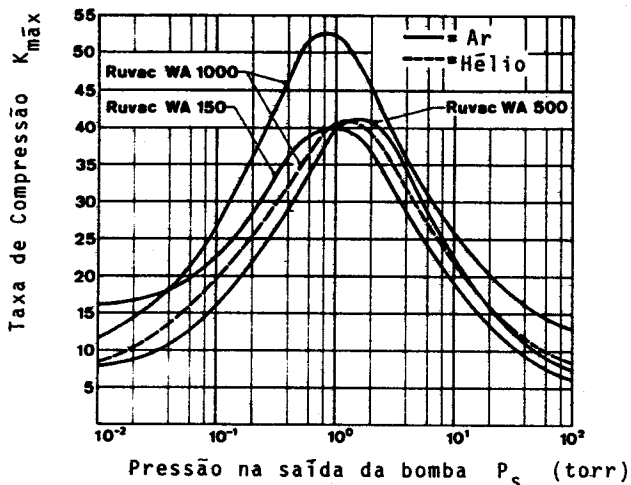


Fig. 40 - Variação da taxa de compressão $K_{m\acute{a}x}$ com a Pressão P_s na saída da bomba.

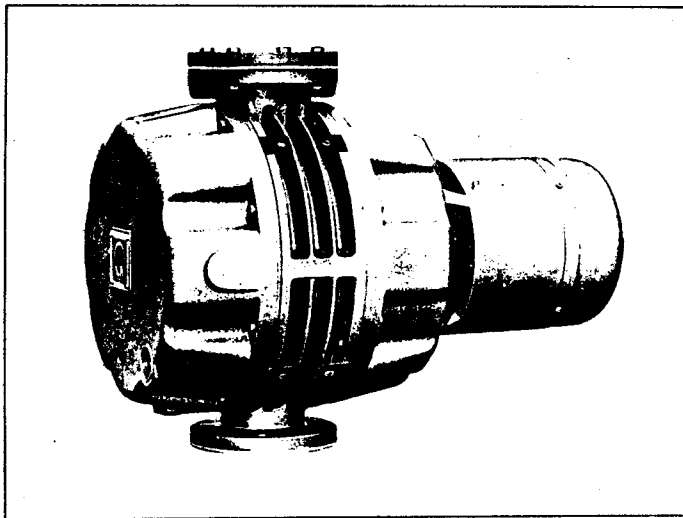


Fig. 41 - Bomba Roots de dois estágios (Leybold-Heraeus, modelo RUVAC WS152)

As várias aplicações destas bombas incluem, como exemplo, as seguintes:

- secagem de componentes elétricos (fase de pré-impregnação)
- degasificação a vácuo em metalurgia
- túneis de vento para testes aeroespaciais
- criogenia; produção de He³, e He⁴
- produção de vácuo em câmaras grandes
- transporte de He e SF de alta pureza
- indústria química e farmacêutica, etc.

Possuem as seguintes vantagens:

- não é afetada por entrada súbita de ar
- é eficiente para bombear grandes quantidades de gás
- possui faixa de trabalho eficiente bastante ampla
- custo operacional reduzido
- não é afetada por gases contaminantes, vapores ou poeira
- ausência de vapores de óleo permitindo a passagem do gás através da bomba sem ser contaminado
- é robusta e fácil de desmontar e limpar - pouca manutenção, funcionamento regular

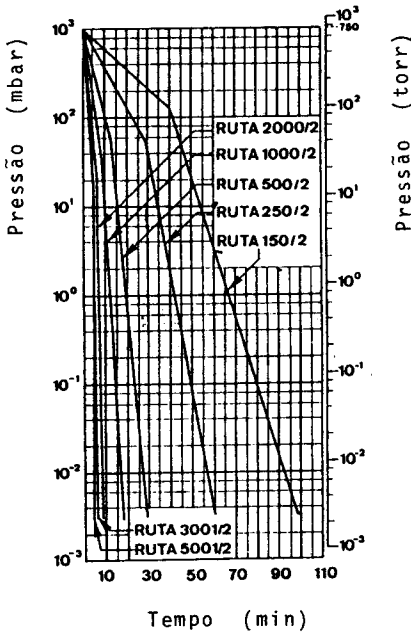


Fig. 42

Tempos para Bombas de dois estágios bombear uma câmara de 10 m³

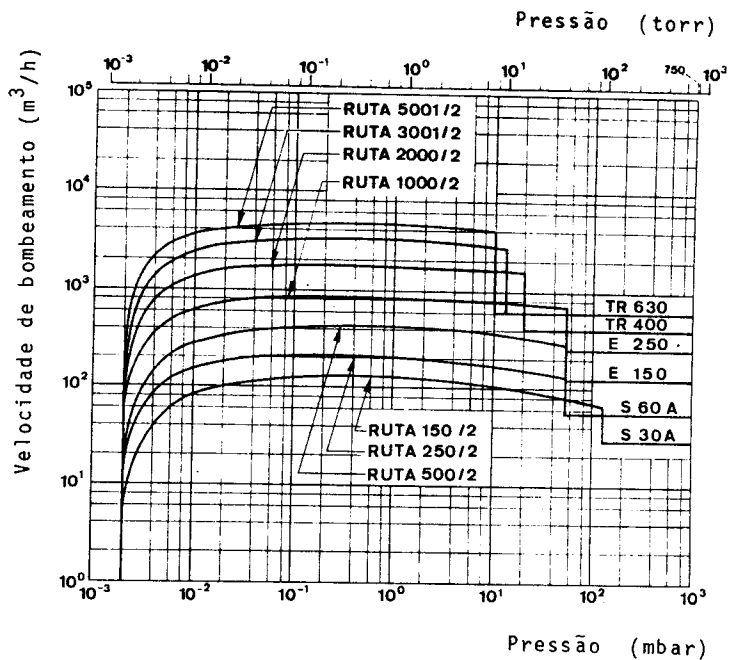


Fig. 43

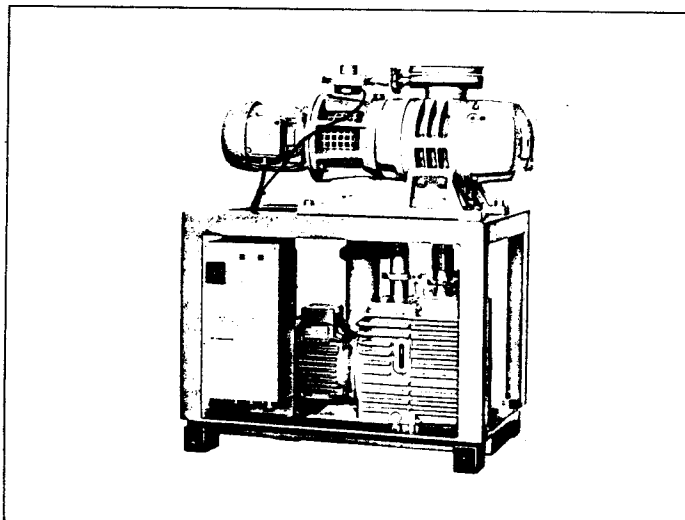
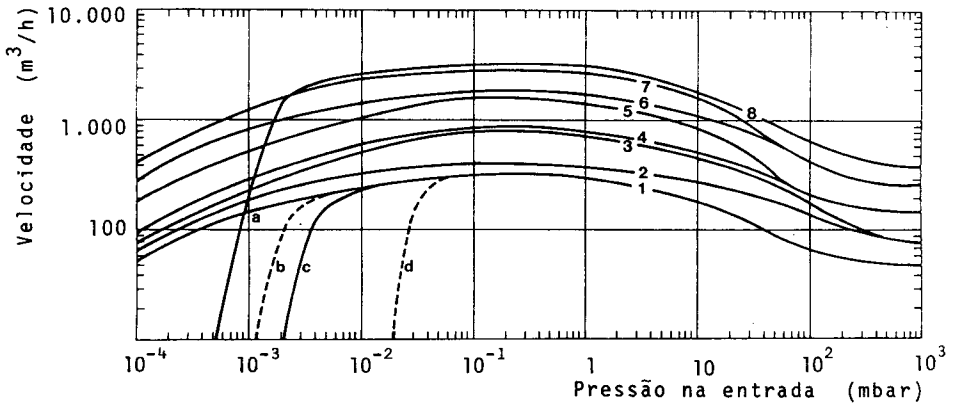
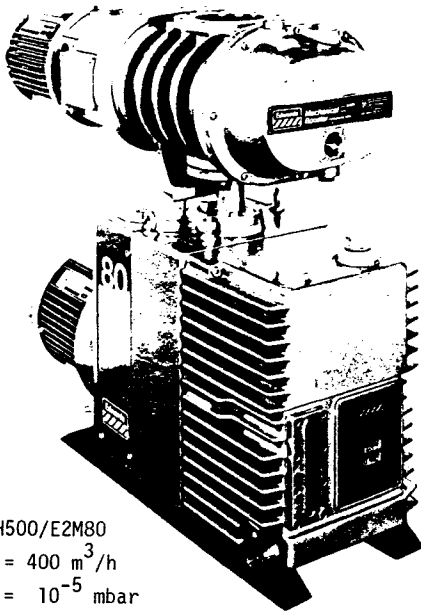


Fig. 44 - Sistema de Bomba Roots mais Bomba Rotativa (Leybold-Heraeus, RUTA 150/2)

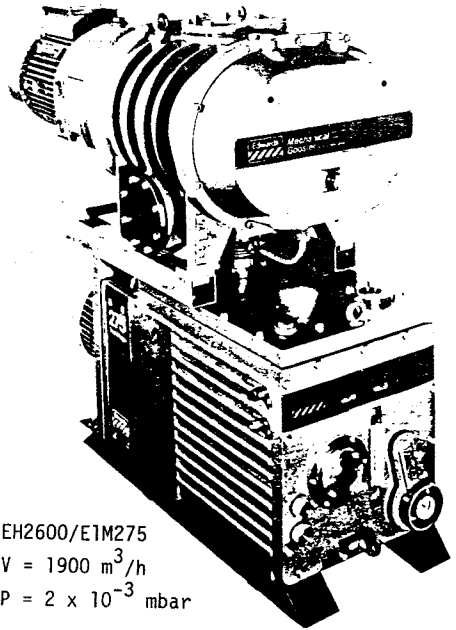
Fig. 45



- | | | |
|------------------------------|-----------------|-----------------|
| 1a EH500/E2M40 | 2 EH500/E2M80 | 5 EH2600/E2M175 |
| 1b EH500/E2M40 com "ballast" | 3 EH1200/E2M80 | 6 EH2600/E2M275 |
| 1c EH500/E1M40 | 4 EH1200/E2M175 | 7 EH4200/E2M275 |
| 1d EH500/E1M40 com "ballast" | | 8 EH4200/ES7500 |



EH500/E2M80
 $V = 400 \text{ m}^3/\text{h}$
 $P = 10^{-5} \text{ mbar}$



EH2600/E1M275
 $V = 1900 \text{ m}^3/\text{h}$
 $P = 2 \times 10^{-3} \text{ mbar}$

Fig. 46 - Sistema Bomba Roots + Bomba Rotativa da EDWARDS

BOMBA IÔNICA

Há vários tipos de bombas iônicas, mas neste laboratório, usamos bombas tipo Órbitron principalmente.

O Órbitron consiste de um ânodo central, feito de uma barra de tungstênio de 1/8", com um tarugo de titânio de 1/4" x 1" a meia altura, e mantido em 5-10kV. O cátodo é um cilindro concêntrico com o ânodo de diâmetro de 2" - 4". O filamento está colocado numa das extremidades do cilindro como mostra a figura

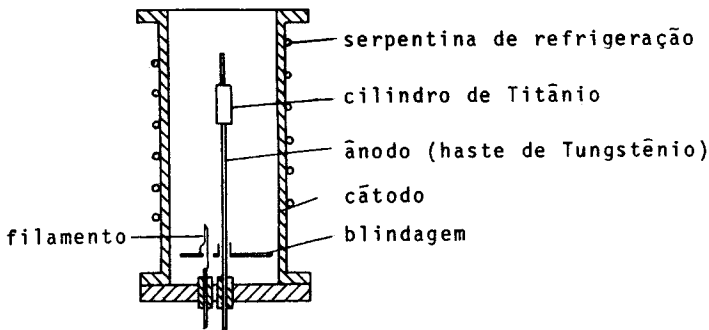


Fig. 47 - Desenho esquemático de uma Bomba de Ionização do tipo Órbitron com sublimador de Titânio montado na haste de alta tensão (aquecido por bombardeio eletrônico).

O funcionamento do Órbitron é baseado no princípio pelo qual os elétrons injetados, com um certo momentum angular, num campo elétrico cilíndricamente simétrico, descreverão órbitas helicoidais em volta do ânodo central. Desta maneira, o percurso médio dos elétrons aumenta muito, atingindo cerca de 1000cm, o que produz um número grande de ionizações. Os íons são captados pelo cátodo. Além deste bombeamento iônico que é especialmente importante no caso de gases nobres, temos bombeamento por sorção na parede do cátodo que é de Titânio. Devido

às assimetrias no campo elétrico produzido pelo Titânio e filamento, os elétrons perdem o momentum modificando as suas órbitas e chocando-se com o ânodo, especialmente com o Titânio cujo diâmetro é maior, aquecendo-o até a temperatura de sublimação. O Titânio sublimado fica depositado nas paredes.

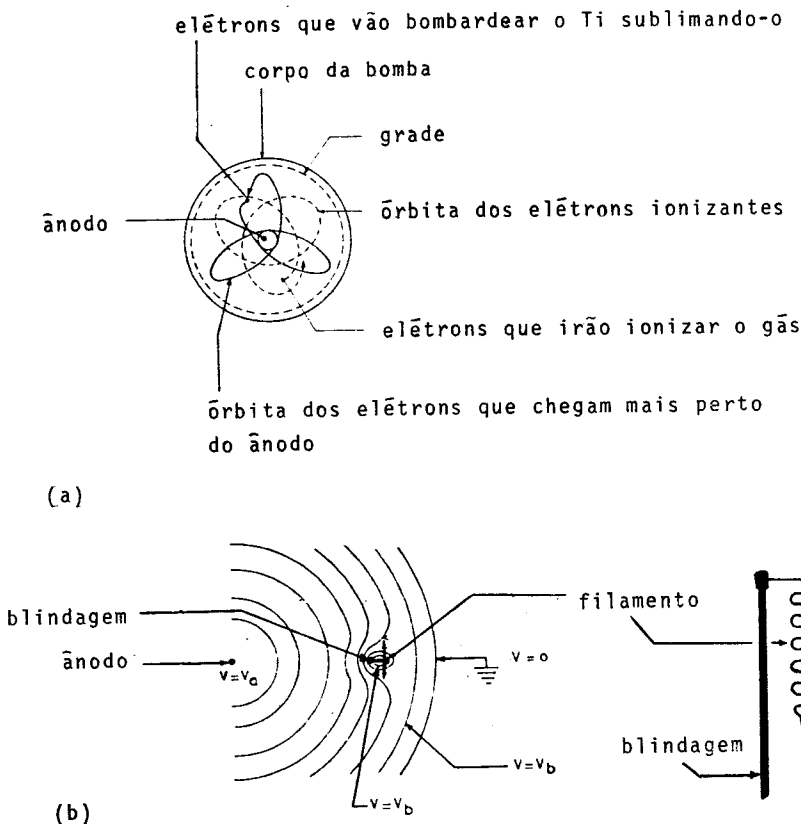
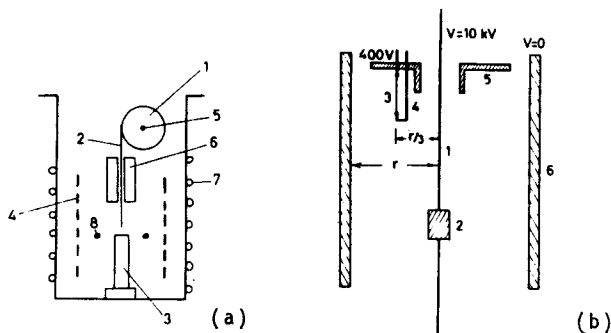


Fig. 48 - a) Mecanismo de bombeamento do orbitron. Nesta bomba os dois filamentos estão polarizados com tensões diferentes para facilitar o início de funcionamento.

b) Linhas equipotenciais no orbitron. Os elétrons são emitidos do filamento tangencialmente; não podem ir direto para o ânodo por causa da blindagem, orbitando assim como em (a)

Fig. 49



a) Esquema de Bomba Iônica ("evapor-ion", um dos primeiros modelos)

- | | |
|-------------------------|---------------------------------|
| 1 - bobina de fio de Ti | 5 - eixo da bobina de fio de Ti |
| 2 - fio de Titânio | 6 - guia do fio de Ti |
| 3 - cadinho | 7 - serpentina de refrigeração |
| 4 - grade | 8 - filamento |

b) Esquema de Bomba iônica do tipo orbitron

- | | |
|-------------------------|---|
| 1 - ânodo de Tungstênio | 4 - suporte do filamento e blindagem para os elétrons |
| 2 - cilindro de Titânio | 5 - blindagem do ânodo |
| 3 - filamento | 6 - parede da bomba (cátodo) |

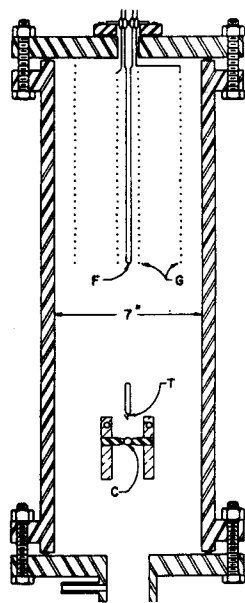
Para poder dar partida, este tipo de bomba necessita um pré-vácuo $< 5 \times 10^{-4}$ torr, produzido por bomba mecânica e difusão. Em pressões mais altas ocorre descarga.

Uma variante do orbitron, que está sendo usada no laboratório do Acelerador Pelletron, e fabricado pela M.F.C., usa o sublimador de Titânio separado do ânodo e aquecido por um filamento auxiliar.

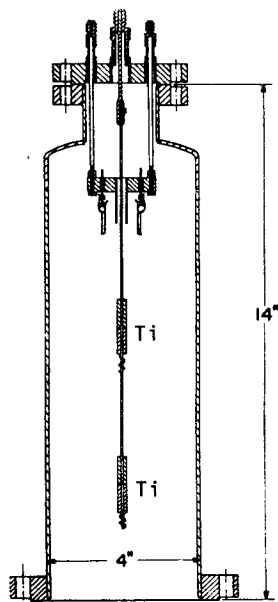
A vantagem deste sistema é que pode ser dada partida com pré-vácuo 10^{-2} torr, i.e. usando só bomba mecânica. Em seguida, liga-se o sublimador, que baixa a pressão até 10^{-4} - 10^{-5} torr, permitindo ligar a alta tensão e filamento.

As vantagens de bombas iônicas:

- produzem vácuo limpo, i.e. sem vapor de óleo
- alcançam facilmente pressão 10^{-9} torr, podendo chegar-se a 10^{-10} .



(a)



(b)

Fig. 50

- a) Primeira Bomba Iônica do tipo "getter-ion". Um fio de Titânio (T) é sublimado no cadinho de grafite (C). Os elétrons emitidos pelo filamento (F) são acelerados pela grade (G).
- b) Primeira Bomba Iônica do tipo orbitron operacional. Os cilindros de Titânio são montados sobre a haste de alta tensão (ânodo), sublimando graças ao bombardeio eletrônico.

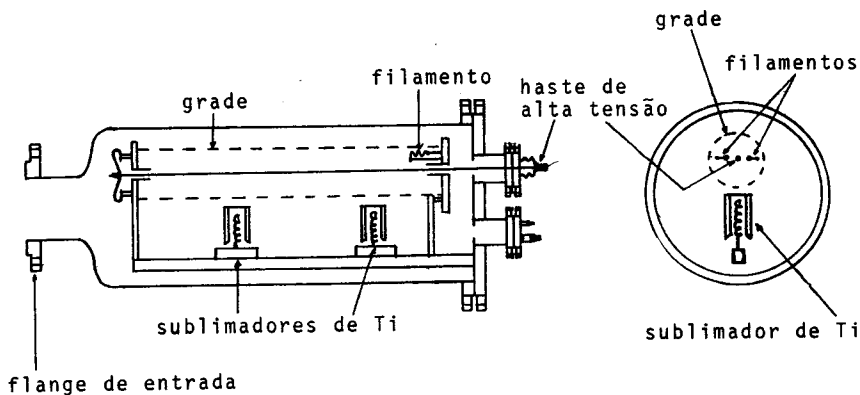


Fig. 51 - Bomba Iônica produzida pela NEC (a fábrica do Pelletron). Os sublimadores de Ti são aquecidos separadamente baixando a pressão até 10^{-5} torr; daí até $\pm 10^{-9}$ torr é necessário ligar a parte do orbitron (alta tensão).

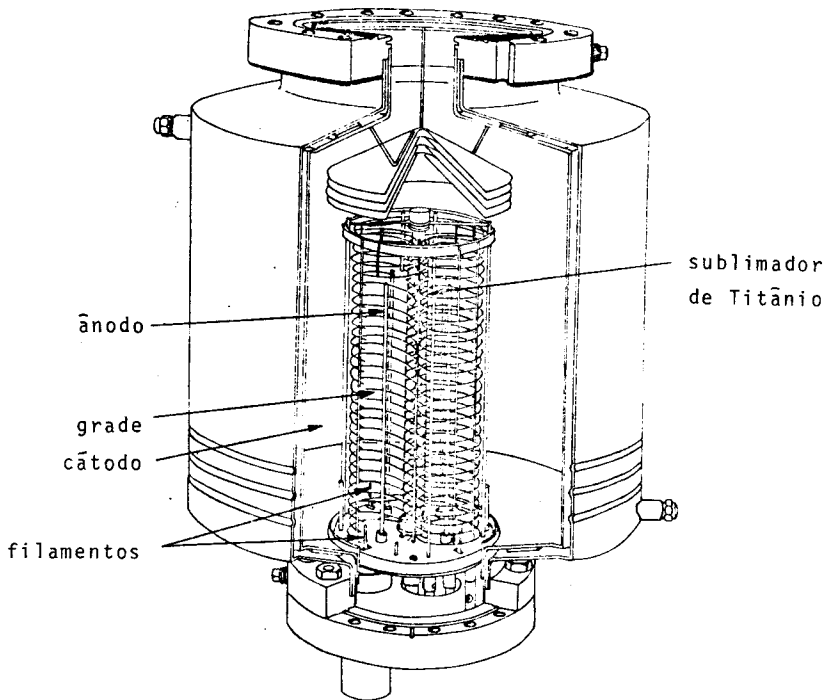


Fig. 52 - Bomba Iônica do tipo "getter-ion" (tríodo). São quatro orbitrons com grade polarizada circundando um único sublimador central, independente (Granville-Philips)

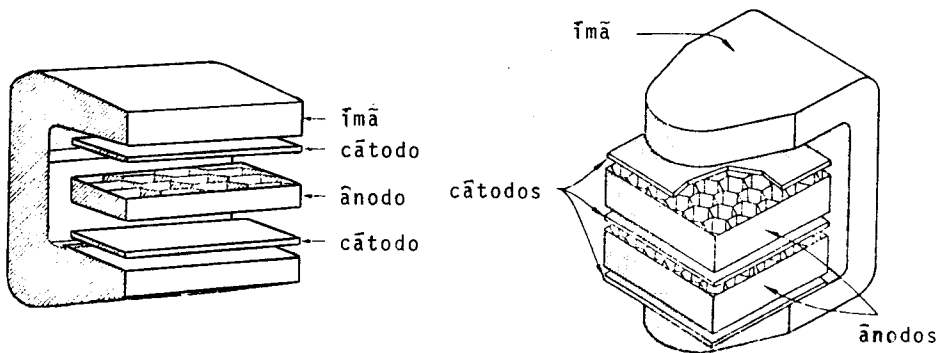


Fig. 53 - Desenho esquemático de uma Bomba Iônica do tipo magnético.

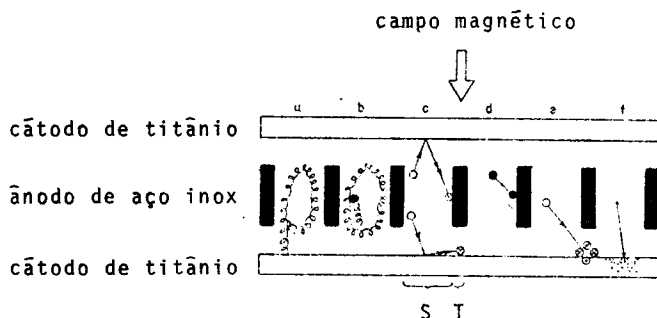


Fig. 54 - Mecanismo de bombeamento de uma Bomba Iônica com campo magnético (tipo d'odo ou "sputter-ion"):

- percurso típico de um elétron liberado por emissão de campo.
- o elétron mais próximo do ânodo, depois de ionizar uma molécula colidindo com ele; o elétron secundário gerado nesta colisão não é mostrado.
- átomo de Titânio arrancado do cátodo pelo bombardeamento de íons positivos; as regiões do cátodo que sofrem desgaste (S) e deposição de titânio (T) estão indicadas pelas chaves.
- uma molécula ativa de gás é aprisionada no ânodo por combinação química com o átomo de Titânio arrancado do cátodo (sofreu "sputtering").
- um íon de gás inerte é "enterrado" na região de deposição (T) do cátodo pelo bombardeamento de íons positivos e posterior recobrimento com átomos de Titânio.
- este mesmo mecanismo ocorre para íons de gases leves, acrescentado o mecanismo de difusão destes íons no material do cátodo.

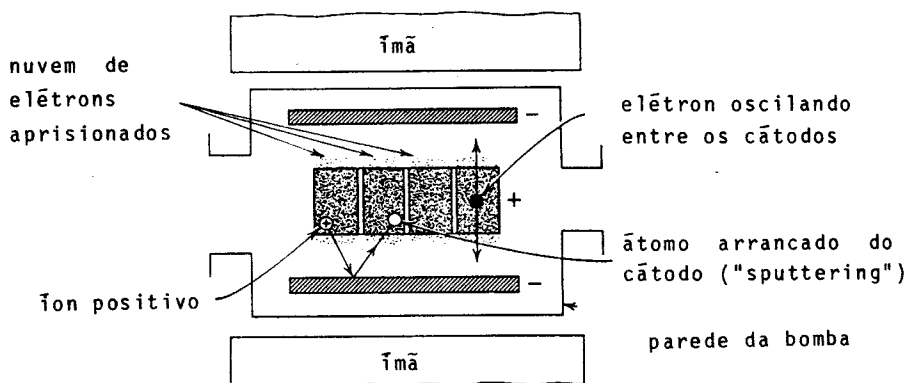


Fig. 55 - Outra forma de visualizar o bombeamento

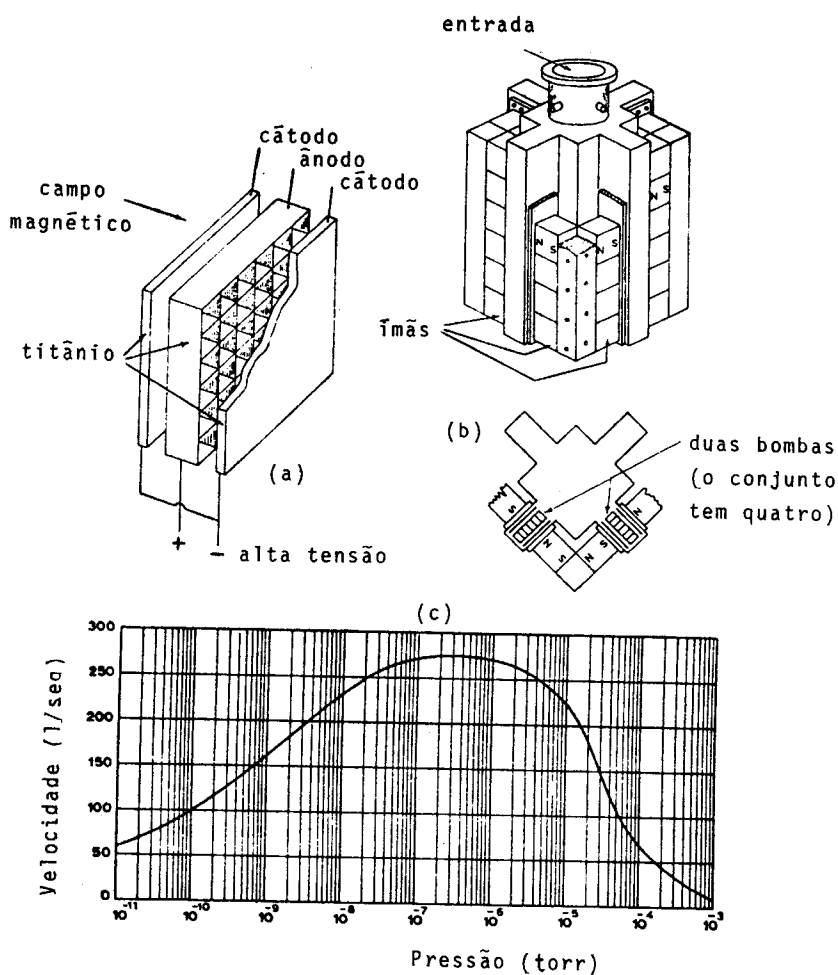
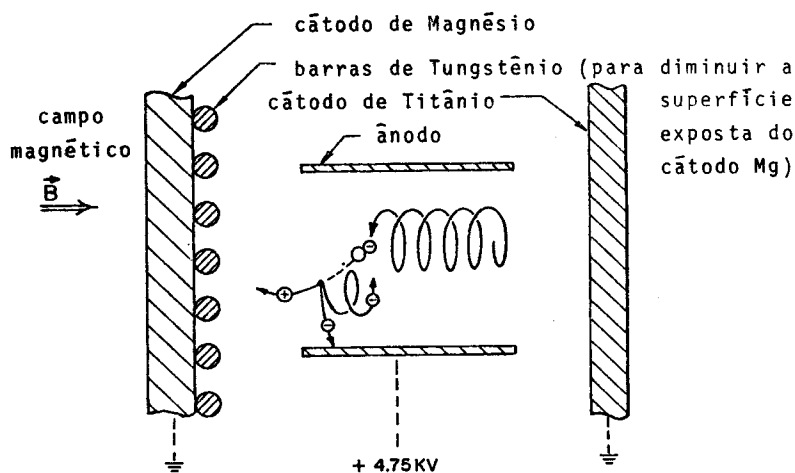


Fig. 56

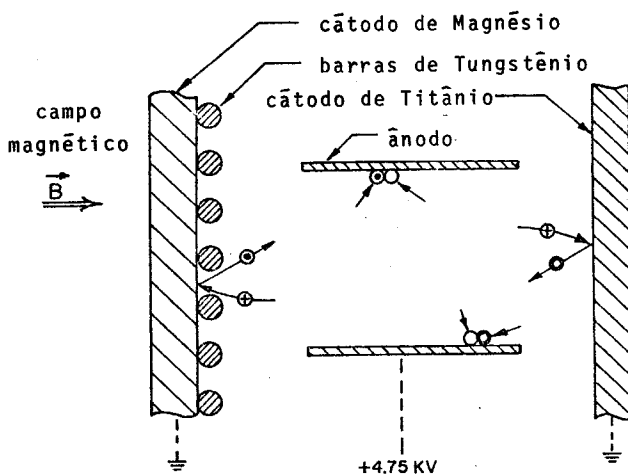
- a) Bomba Iônica com campo magnético (tipo "getter-ion"). Vê-se apenas os elétrodos; os ímãs e a parede da bomba foram removidos.
- b) Vista externa (em cima) e desenho em corte visto de cima.
- c) Curva de velocidade de bombeamento típica desta bomba.

Fig. 57 - Bomba Iônica com campo magnético: etapas de bombeamento



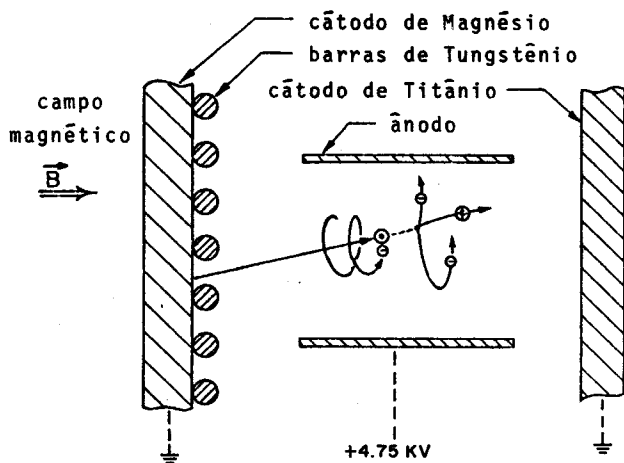
\ominus = elétrons
 \circ = molécula do gás
 \oplus = íon do gás

a) Ionização do gás



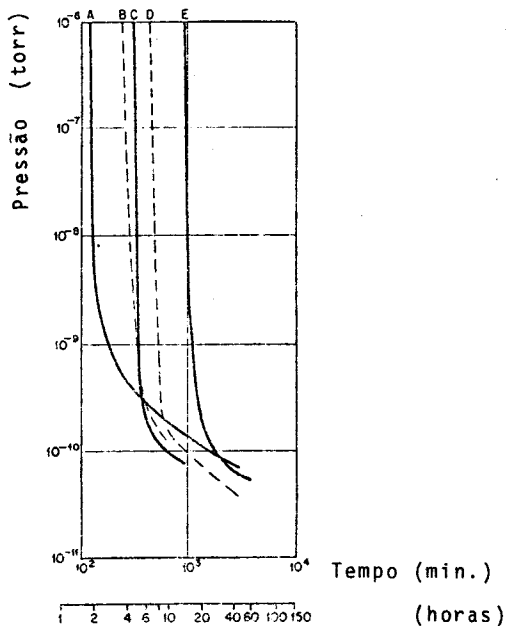
\circ = molécula do gás
 \oplus = íon do gás
 \odot = átomo de Magnésio
 \bullet = átomo de Titânio

b) "sputtering" e "gettering"



e^- = eléctron
 \odot = átomo de Magnésio
 \oplus = íon de Magnésio

c) formação de íon metálico (o Magnésio atua melhor que o Titânio em pressões abaixo de 10^{-7} torr)



Curva de Pressão \times Tempo
 Bomba de ionização do tipo
 "sputtering" em uma câmara
 de aço inoxidável de 100 l.

A. 1 3/4 h a 300° C
 B. 3 3/4 h a 250° C
 C. 5 h a 350° C
 D. 6 1/2 h a 400° C
 E. 15 h a 260° C

Fig. 58

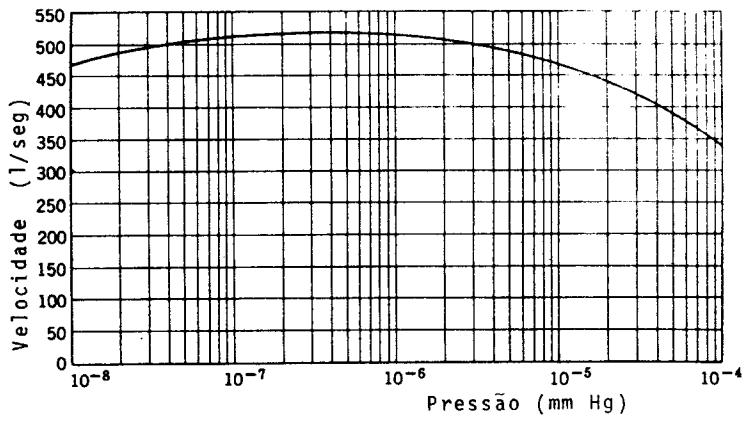


Fig. 59 - Curva de Velocidade de bombeamento para ar, de uma Bomba Iônica do tipo "sputter-ion" (Ultek, 20-451)

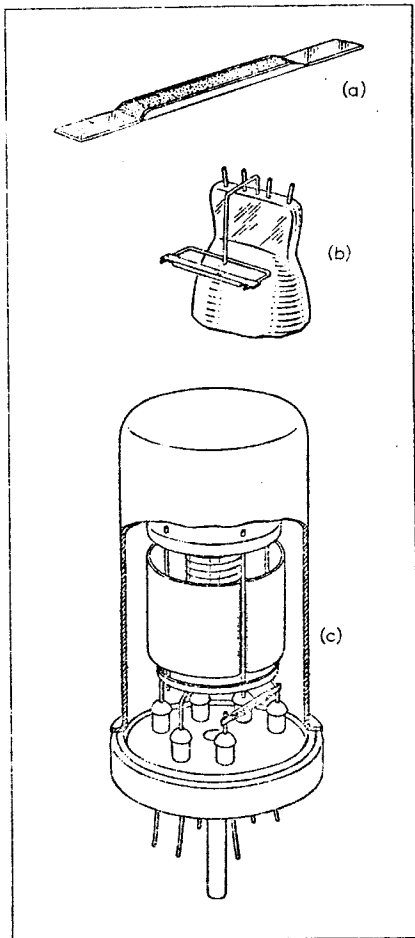


Fig. 60

"Getter" usado para fazer o vácuo final em uma antiga - válvula eletrônica (c) de - envólucro metálico. A tira de metal contendo o "getter" (a) é montada em (b), dentro da válvula, sendo aquecida - externamente com bobina de - R.F., evaporando o "getter".

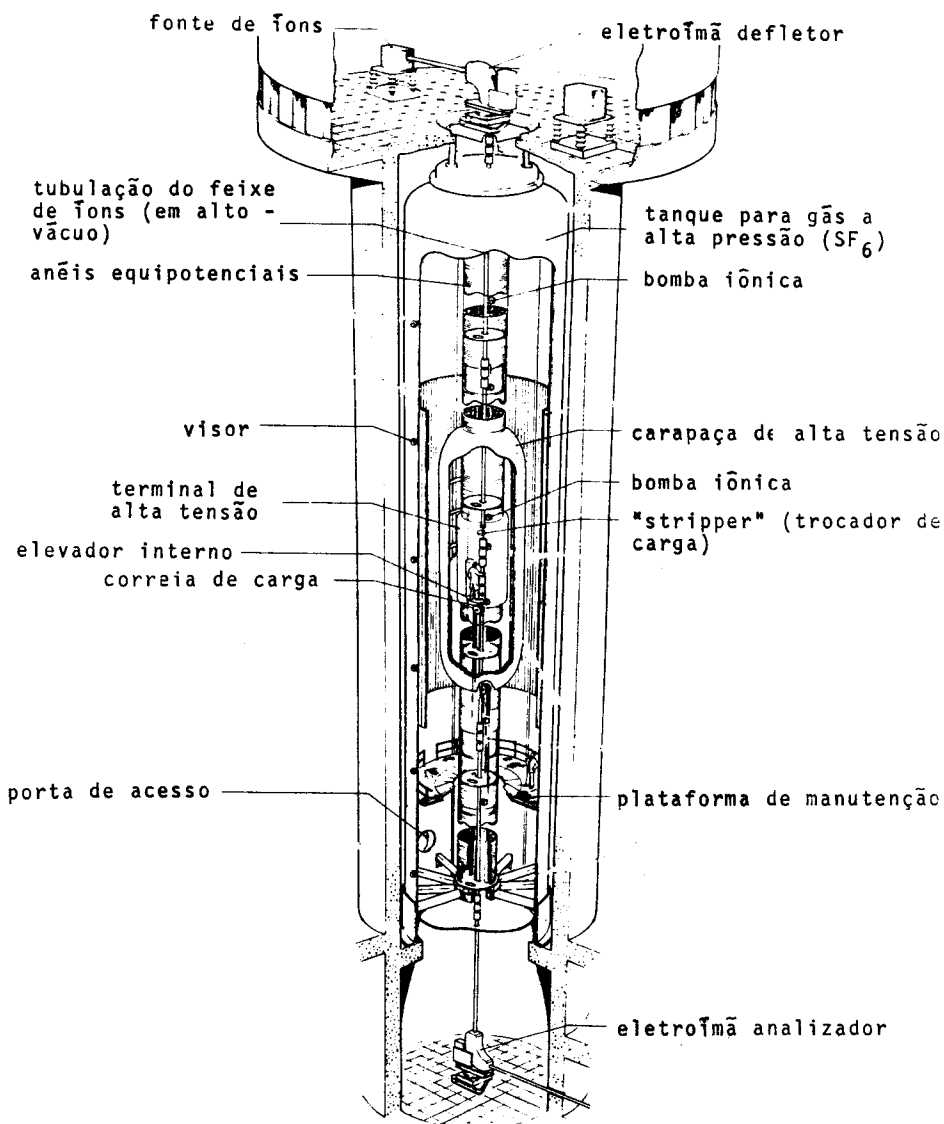


Fig. 61

Exemplo de aplicação de Bombas Iônicas: o tubo acelerador deste Laddertron (Inglaterra) precisa de várias bombas para produzir o alto vácuo necessário para manter livre o caminho dos íons - acelerados. Todos os aceleradores nucleares (inclusive os nossos Aceleradores Lineares e Pelletron) necessitam de uma tubulação mantida em alto vácuo (10^{-8} torr).

BOMBA TURBOMOLECULAR

Uma bomba turbomolecular funciona em regime molecular e portanto, necessita de uma bomba rotativa para pré-vácuo.

O funcionamento consiste em uma superfície metálica que está girando rapidamente em relação a outra superfície adjacente fixa: dentro de um espaço suficientemente pequeno entre as duas superfícies, as moléculas de gás adquirem momento na direção do movimento da superfície móvel.

Considere uma molécula ou átomo como na fig. entre a superfície móvel (A) e fixa (B). Quando a molécula colide com a superfície A, ela permanece grudada na superfície durante certo tempo.

Quando a molécula deixar a superfície A, além da sua velocidade térmica, terá uma componente de velocidade na direção de movimento da superfície A. Desta maneira, a molécula faz o percurso a_1b_1 .

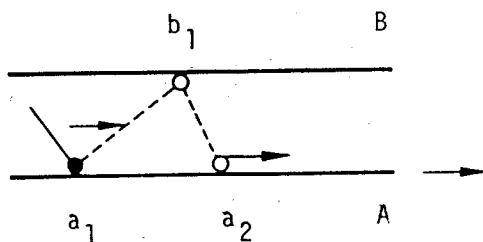


Fig. 62

Ao atingir a superfície B, ela desprende-se e movimenta-se só com sua velocidade térmica porque a superfície B é fixa, até que colida com superfície A, onde o processo é repetido. A força exercida pela superfície móvel sobre as moléculas estabelece um gradiente de pressão e, portanto, o bombeamento do gás. É evidente que para este bombeamento ser efetivo, o espaçamento entre as superfícies A e B tem que ser pequeno e a rotação bem grande (isto é, a velocidade da superfície A não pode ser desprezível em comparação com a velocidade térmica das moléculas).

A figura mostra esquematicamente, uma bomba turbomolecular Pfeiffer. A carcaça da bomba é um cilindro metálico. O rotor está em forma de dois conjuntos de discos paralelos com orifícios radiais (para facilitar a passagem do gás) e fixas num eixo axial acoplado ao motor externo. Cada conjunto também contém 18 discos. Outros dois conjuntos simetricamente idênticos ao primeiro, são fixos na carcaça da bomba de tal maneira que cada disco do rotor gira entre dois discos fixos.

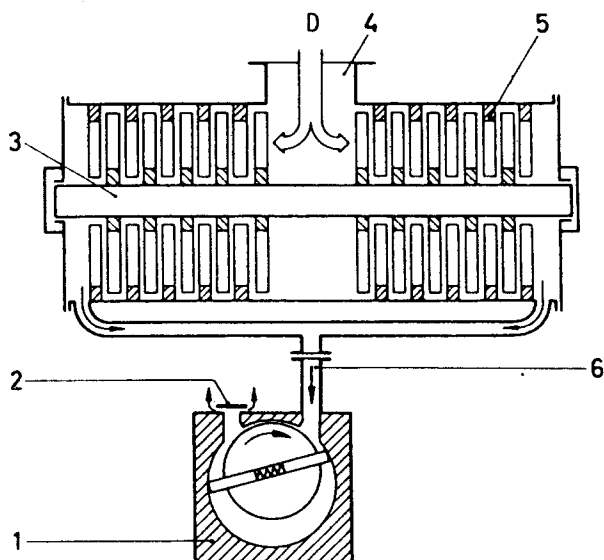


Fig. 63

- | | |
|---------------------------|----------------------------|
| 1 - Bomba Mecânica | 4 - Entrada da bomba |
| 2 - Saída de gases | 5 - Estator (discos fixos) |
| 3 - Rotor (discos móveis) | 6 - Gases saindo da Turbo |

A entrada do gás (D) tem um acesso direto à região entre os dois conjuntos de discos. O gás que entra divide-se simetricamente em duas correntes, uma para cada conjunto de discos rotor-estator. A saída do gás é através dos tubos que se unem em (6), onde está ligada uma bomba rotativa.

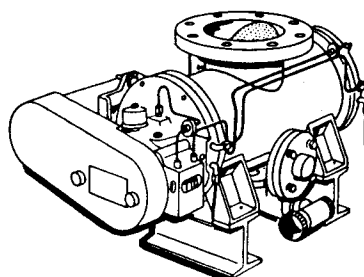
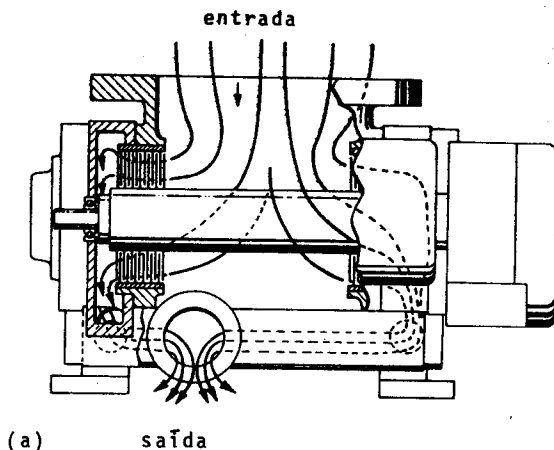


Fig. 64

(b)

- a) Esquema de funcionamento de uma Bomba Turbomolecular horizontal.
- b) Aspecto externo da bomba. (Welch, modelo 3102B).

Uma bomba turbomolecular tipo THP 900 tem as seguintes características: velocidade de bombeamento 260 l/s, pressão mínima 10^{-7} torr, velocidade de rotação do rotor 16.000rpm, espaçamento entre os discos rotor-estator ~ 1mm.

A grande vantagem desta bomba é que produz um vácuo limpo, sem vapor de óleo, o que é essencial em pesquisa de física nuclear, espectrometria de massa etc. Por outro lado, esta bomba tem a desvantagem de usar discos finos e próximos girando em alta velocidade o que pode provocar facilmente danos mecânicos. Além disso, a manutenção desta bomba é bastante sofisticada.

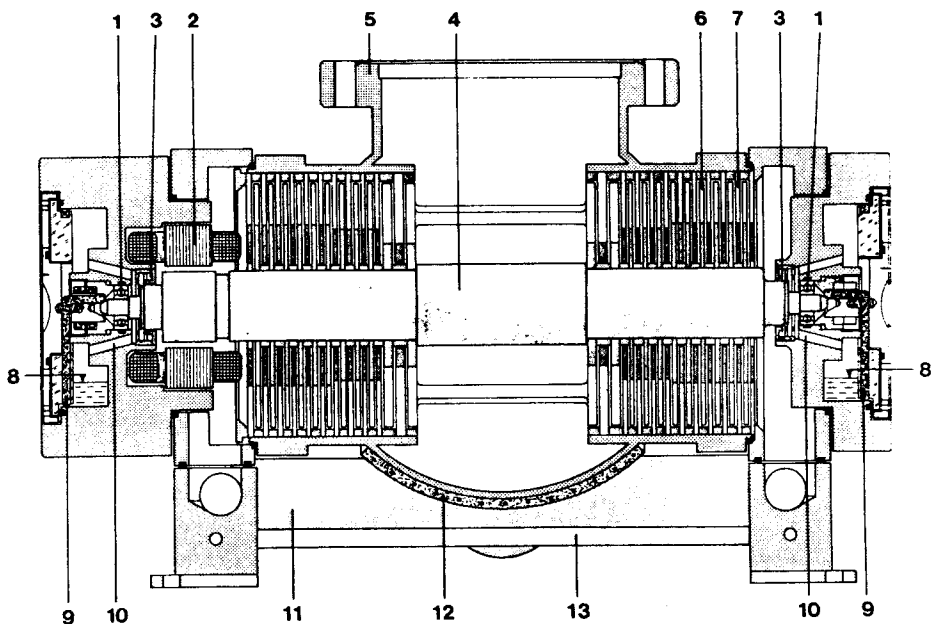


Fig. 65 - Desenho em corte de uma Bomba Turbo-molecular horizontal (Balzers, modelo TPU 270)

- | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 - rolamento para alta rotação | 8 - reservatório de óleo |
| 2 - motor | 9 - filtro para conduzir o óleo |
| 3 - vedação para óleo | 10 - retorno do óleo |
| 4 - rotor (60.000 rpm) | 11 - duto de pré-vácuo |
| 5 - flange para alto vácuo | 12 - aquecedor |
| 6 - disco com ranhuras do rotor | 13 - linha de refrigeração a água |
| 7 - disco com ranhuras do estator | |

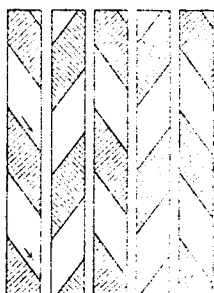


Fig. 66

Os discos móveis do rotor e os fixos do estator possuem ranhuras orientadas como mostra a figura; desta forma as moléculas do gás não podem voltar para a região de alto vácuo (4). (cada ranhura do rotor com outra do estator constituem um estágio).

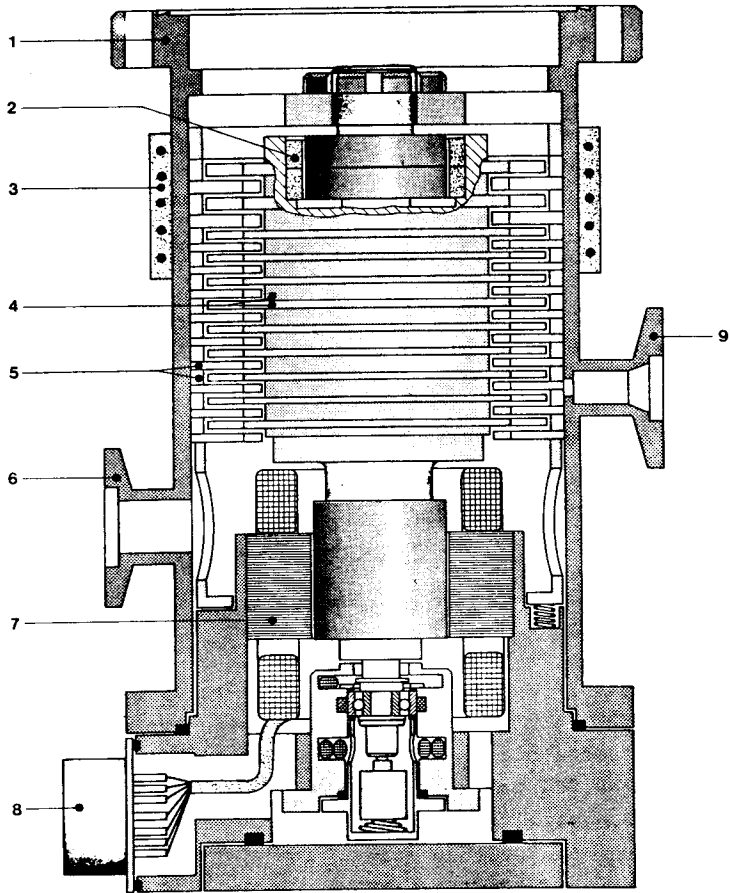
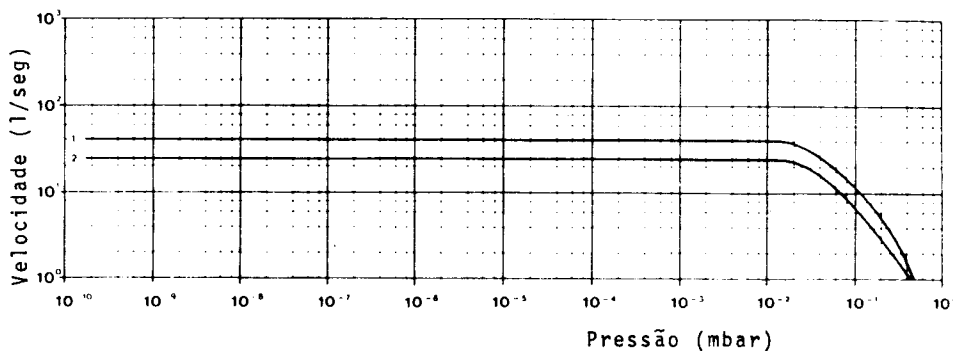


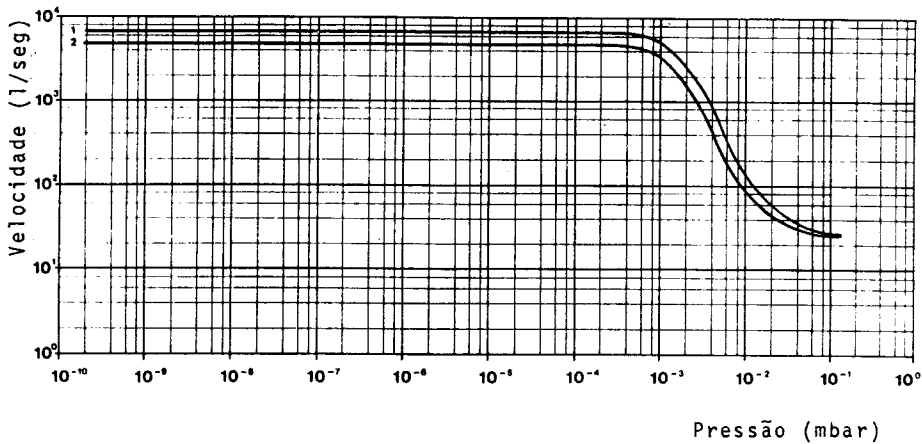
Fig. 67 - Desenho em corte de uma Bomba Turbo-molecular vertical
(Balzers, modelo TPU 040)

- | | |
|---------------------------------------|---|
| 1 - flange de entrada | 6 - flange de pré-vácuo |
| 2 - ímã permanente (mancal magnético) | 7 - motor |
| 3 - aquecedor | 8 - conexões elétricas |
| 4 - rotor (90.000 rpm) | 9 - flange para entrada de ar (válvula) |
| 5 - estator | |



Curva 1: flange ISO-K (70 mm \varnothing I)
 Curva 2: flange KF (um pouco menor)

Fig. 68 - Curva de Velocidade de Bombeamento da Bomba Turbomolecular mostrada na figura anterior (Balzers TPU 040)



Curva 1: flange DN 500 ISO-K (500 mm \varnothing I)
 Curva 2: flange DN 400 ISO-K (400 mm \varnothing I)

Fig. 69 - Gráfico do mesmo tipo de bomba, porém de maior capacidade (Balzers TPH 5000).

A bomba Molecular, mais tarde aperfeiçoada na atual forma (e denominada Turbo-Molecular) foi idealizada por Gaede - em 1913, um dos pioneiros da Técnica do Vácuo. Um cilindro girando em alta rotação proporcionava uma componente à velocidade das moléculas que com ele colidiam, fazendo com que estas molé-

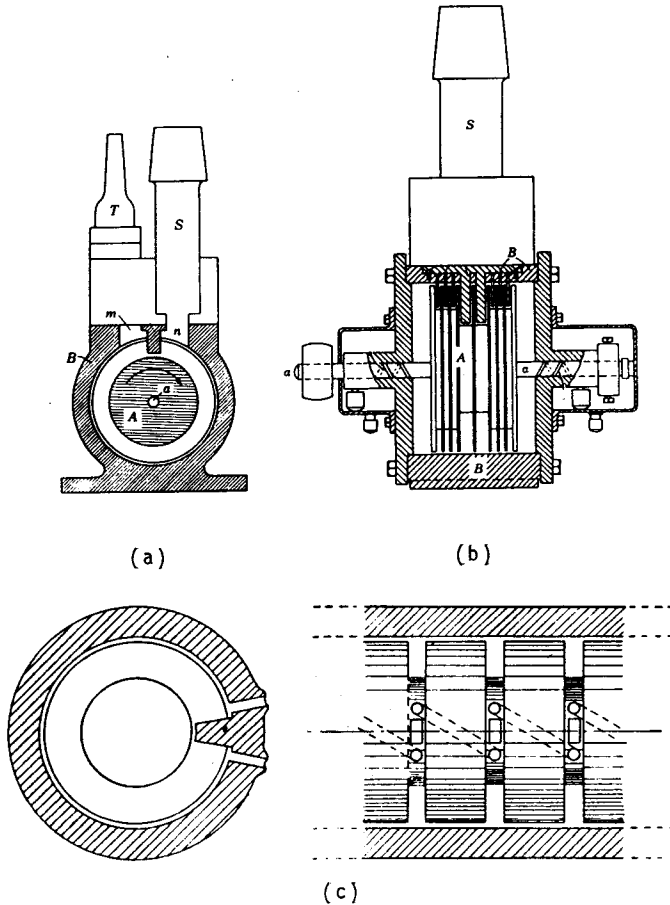


Fig. 70 - Bomba Molecular de Gaede

a) vista frontal em corte; b) vista lateral em corte;
 c) desenho mostrando vários estágios da bomba.

- A - rotor com vários estágios
- B - corpo da bomba
- m - região de maior pressão
- n - região de menor pressão
- T - saída para a bomba de pré-vácuo
- S - entrada da bomba

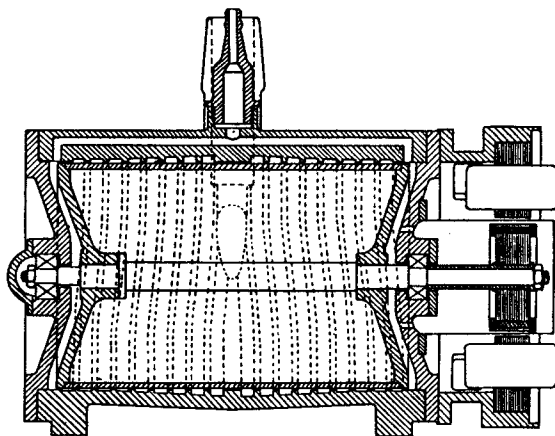


Fig. 71 - Bomba Molecular de Holweck. As moléculas do gás entram pelo centro são empurradas para os lados pelo rotor em alta velocidade.

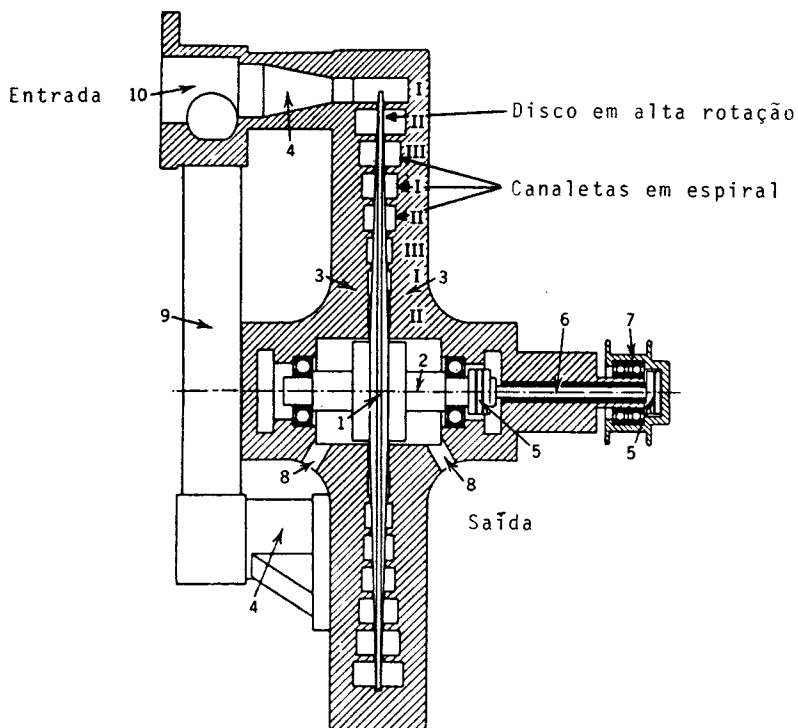


Fig. 72 - Diagrama esquemático da Bomba Molecular de Siegbahn (diâmetro do disco: 54 cm)

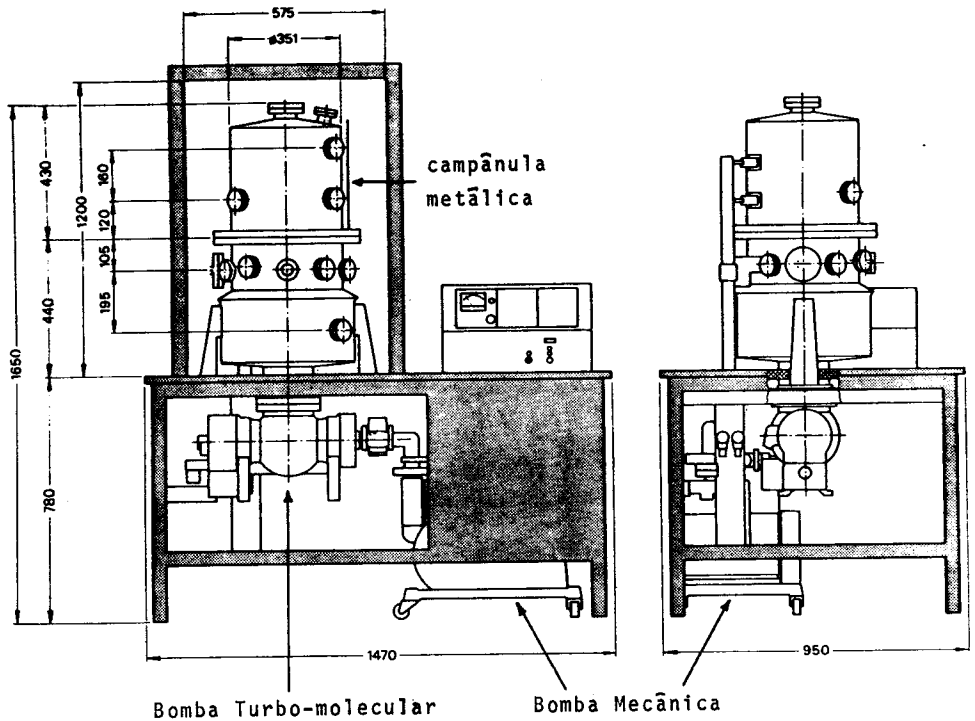


Fig. 73 - Exemplo de Sistema de Vácuo com Bomba Turbo-molecular.

culas se acumulassem no orifício de saída da bomba sendo então removidas por uma Bomba Rotativa. Em 1925 Holweck desenhou um modelo melhorado, onde o rotor dirigia as moléculas para os dois lados, partindo do centro, duplicando assim a velocidade de bombeamento. Siegbahn propôs uma nova versão, usando um disco no lugar do rotor; isto em 1940. Estes modelos todos, contudo, não eram operacionais já que a distância entre o rotor (ou disco) e o estator teria de estar entre 10 e 20 μm para se conseguir uma alta taxa de compressão. Desta forma, variações de temperatura ou presença de partículas de poeira eram suficientes para travar o rotor parando a bomba. As atuais bombas Turbo-Moleculares só apareceram no mercado no ano de 1958, comercializadas pela Arthur Pfeiffer da Alemanha, e desenhadas por Becker. Eram do tipo horizontal, consistindo de um rotor com vários discos ranhurados girando entre discos fixos, também ranhurados, do estator. As moléculas de gás são dirigidas para os lados, sendo retiradas por uma bomba rotativa, como já explicado anteriormente.

BOMBA CRIOGÊNICA

A bomba criogênica, assim como a iônica, não é propriamente uma bomba no seu estrito sentido já que as moléculas de gás não são removidas do sistema de vácuo e transferidas para a atmosfera, mas ficam presas no interior do volume sem, contudo, produzir pressão. As bombas iônicas retêm as moléculas em uma camada delgada sólida enquanto as bombas criogênicas o fazem retirando energia das moléculas, não permitindo que estas retornem ao sistema: dá-se assim a ação de bombeamento. O uso deste mecanismo para produzir alto vácuo foi proposto por Grassmann em 1950.

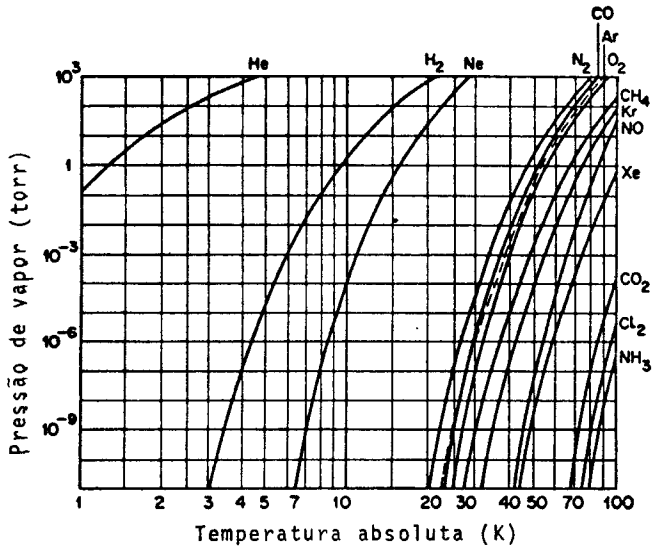
A velocidade de bombeamento das bombas criogênicas pode chegar até milhões de l/s; as altas velocidades destas bombas são limitadas essencialmente pela condutância do duto ou da boca de entrada da bomba. Sua faixa de trabalho se estende de 10^{-3} torr até bem abaixo de 10^{-10} torr. Precisa, portanto, de uma bomba de pré-vácuo para iniciar o bombeamento; dada a partida, esta bomba auxiliar será desconectada, selando o sistema (o que é vantajoso quando falta eletricidade).

Vejamos um pouco da teoria de funcionamento destas bombas. Em uma primeira aproximação a temperatura da superfície gelada (crio-superfície) determina a pressão final atingível e a potência de refrigeração, a velocidade de bombeamento.

A figura abaixo mostra as pressões de vapor dos gases mais encontrados em sistemas de vácuo em baixas temperaturas. A pressão existente nas condições de equilíbrio na crio-superfície será dada pela soma das pressões de vapor dos componentes na temperatura da crio-superfície (ou temperatura de condensação se uma camada de moléculas suficientemente espessa se formou na crio-superfície isolando-a, aumentando assim a temperatura na superfície externa).

Geralmente a bomba criogênica se constitui em um anexo da câmara onde se produzirá o alto vácuo, ou se situa em um dos extremos da mesma e a pressão final na câmara será igual à pressão final da bomba multiplicada pelo fator de transpiração térmica: $(T_A/T_C)^{1/2}$ onde T_A é a temperatura ambiente e T_C a temperatura da crio-superfície ambas em graus Kelvin. As pressões medidas na câma

Fig. 74



na incluíção, naturalmente, este fator.

Para um determinado gás, estando a temperatura da crio-superfície abaixo do seu ponto de congelamento, e na região de fluxo molecular, podemos calcular a velocidade de bombeamento para este gás, usando a relação

$$S = 11,6 (29/M)^{1/2} [1 - (P_2/P_1)] A \quad \ell/s$$

onde

- A - área da crio-superfície
- P_1 - pressão parcial do gás à temperatura do sistema de vácuo como um todo (geralmente a temperatura ambiente)
- P_2 - pressão parcial do gás à temperatura da crio-superfície
- M - massa molecular do gás

Quando P_2 for muito pequeno em relação a P_1 , a fórmula se torna mais simples

$$S = 11,6 (29/M)^{1/2} A \quad \ell/s$$

O número 29 é a massa molecular do ar.

As bombas criogênicas são eficientes a 30 K, onde a pressão de vapor para o nitrogênio é da ordem de 3×10^{-4} torr e a 15 K este valor cai abaixo dos limites de medição. Uma vez que a pressão de vapor é assim tão sensível às variações de temperatura, geralmente, não é permitido "misturar" temperaturas no volume resfriado, isto é, não se pode usar o refrigerante que mantém a criosuperfície a 20 K para resfriar uma blindagem de radiação adicional a 30 K, já que o bombeamento nesta blindagem iria limitar a pressão final à pressão de vapor de saturação correspondente a 30 K. Se hélio líquido for usado como refrigerante, então a crio-superfície — agora à temperatura de 4,2 K, bombeando hidrogênio e neônio — poderá ser circundada com uma blindagem de radiação a 20 K bombeando assim a carga correspondente ao nitrogênio. Em todos os casos, um bom projeto, do ponto de vista termodinâmico, é importante para utilizar totalmente a cara porém pequena potência de refrigeração requerida. A figura mostra arranjos típicos de bombas criogênicas.

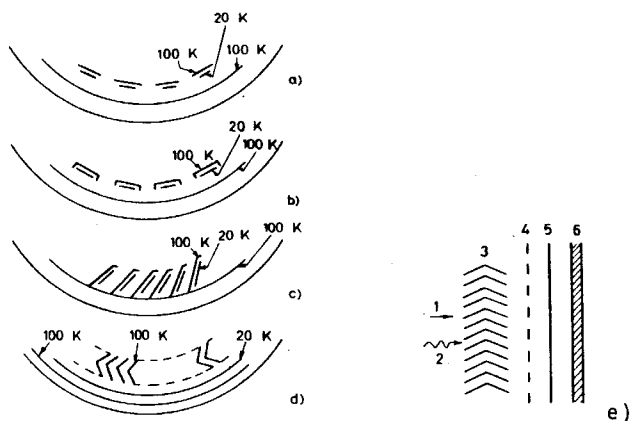


Fig. 75 - (a) até (d): Várias disposições das superfícies criogênicas dentro da bomba

- e) detalhe
- 1 - radiação
 - 2 - gás
 - 3 - "baffles" tipo chevron (100 K)
 - 4 - superfície condensadora (20 K)
 - 5 - superfície protetora (100 K)
 - 6 - parede da câmara de vácuo (300 K)

A quantidade de calor que é preciso remover através da crio-superfície determina a potência de refrigeração necessária e - aumenta com:

- 1 - a radiação e condução térmica ao longo dos suportes da crio-superfície;
- 2 - a condução térmica do gás residual e
- 3 - a carga de condensação dos gases bombeados.

Para minimizar a carga devida à radiação, a crio-superfície é completamente circundada por uma blindagem de baixa emissividade resfriada com nitrogênio líquido e separada da região por onde chegam as moléculas de gás. Nesta região monta-se um "baffle" do tipo chevron com superfícies negras que, apesar de limitar a velocidade de bombeamento, vai pré-resfriar o gás à temperatura de 77 K, reduzindo assim a carga na crio-superfície.

A quantidade de calor a ser removida devido à radiação não depende da pressão e pode ser calculada. A blindagem citada - acima possui velocidade de bombeamento para vapor de água bastante elevada.

A transferência de calor por condução térmica através do gás residual vai depender da abundância de moléculas de gás capazes de atravessar a região entre as superfícies de 77 K e 20 K e este fato, por sua vez, depende da probabilidade da molécula se fixar na crio-superfície na sua primeira colisão. As probabilidades de aprisionamento de um gás a 77 K em uma crio-superfície a 20 K foram medidas e estão entre os valores de 0,8 e 1,0. Com probabilidades tão elevadas, poucas moléculas poderão contribuir efetivamente para a condução de calor e sob condições ideais a carga térmica - produzida por esta via pode ser desprezada.

A carga de calor devida à condensação do gás é diretamente proporcional ao "throughput" e, para nitrogênio pré-resfriado a 77 K, atinge o valor de $0,49 \text{ W/torr.l.s}^{-1}$. Desta forma, a carga devida à condensação do gás depende da pressão e geralmente se torna desprezível quando comparada com o valor proveniente da radiação em pressões abaixo de 10^{-6} torr, onde 1.000.000 l/s corresponde a uma carga de calor de 0,49 W.

Para um dado arranjo é, portanto, possível plotar a máxima velocidade de bombeamento por Watt de refrigeração em função da pressão. Se a carga de calor proveniente de radiação for W_r Watts, então $(1 - W_r)$ Watts estará disponível para o bombeamento criogênico.

$$1 - W_r = 0,49 S p$$

ou seja,

$$S = \frac{1 - W_r}{0,49 p}$$

onde S é a velocidade de bombeamento na crio-superfície, admitindo-se uma probabilidade de retenção igual a 1 e que a área da crio-superfície seja grande o suficiente para manter a velocidade de bombeamento sob condições de fluxo molecular livre.

A velocidade de bombeamento efetiva por Watt de refrigeração S_c disponível na câmara da bomba pode ser determinada também pela condutância C_b do "baffle" chevron à temperatura do nitrogênio líquido (aproximadamente igual a um orifício com 1/4 da área do "baffle") ou seja,

$$\frac{1}{S_c} = \frac{1}{C_b} + \frac{0,49 p}{1 - W_r}$$

A curva de $S_c \times p$ é mostrada na figura abaixo, onde em pressões baixas, S_c se aproxima de C_b e, em pressões altas a curva segue uma linha de "throughput" constante.

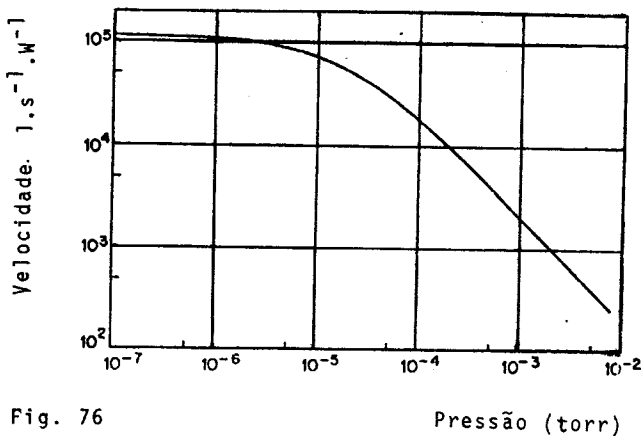


Fig. 76

Pressão (torr)

Considerando a disponibilidade de 1 Watt de refrigeração a 20 K, por exemplo, então o tamanho físico da crio-superfície e do "baffle" chevron pode ser aumentado, com um conseqüente aumento na velocidade máxima permissível, até o valor de 1 Watt ser atingido para a carga de calor por radiação. Com a velocidade de bombeamento maximizada desta forma, o bombeamento criogênico pode se dar com cargas de condensação baixas, ou seja, baixos "throughputs" e pressões de operação baixas. À medida que o "throughput" aumenta, a carga de calor se desequilibra e o bombeamento cessa, provocando um acúmulo de gás impondo assim uma carga de calor por condução acrescida; com isto, a temperatura das crio-superfícies aumenta, liberando os gases antes bombeados, provocando isto tudo um processo em cascata. Este processo em avalanche pode ser detido — em baixas pressões somente — pelo fato de que geralmente um aumento na temperatura das crio-superfícies produz uma maior disponibilidade de potência de refrigeração. Entretanto, uma vez que o processo tenha ocorrido, o bombeamento criogênico só pode ser restabelecido pelo abaixamento de pressão com uma bomba auxiliar. A pressão na qual este processo em cascata se inicia pode ser chamada pressão de partida e com uma velocidade de bombeamento maximizada a pressão de partida pode se tornar inconvenientemente baixa. Com um bom projeto de bomba criogênica esta pressão de partida está em torno de 10^{-3} torr, permitindo assim o início do bombeamento criogênico tão logo se complete o ciclo de pré-vácuo. Tal bomba permite uma velocidade de cerca de 10^5 l/s com uma potência de refrigeração de 1 W a 20 K.

Com pressões da ordem de 10^{-2} torr (regime viscoso ou de transição) e com potências de refrigeração elevadas, observa-se um aumento considerável na velocidade de bombeamento; tanto que bombas criogênicas especialmente projetadas para funcionar nesta faixa são comercializadas. O fluxo de gás para a crio-superfície é acelerado à velocidade sônica e pode-se obter velocidades de bombeamento para nitrogênio de até 20 l/s por cm^2 de área de crio-superfície e isto com pequena influência da probabilidade de aprisionamento das moléculas. É um ganho elevado comparado ao valor obtido nas condições de fluxo molecular de 11,7 l/s por cm^2 de área de crio-superfície e ainda dependendo da probabilidade de aprisionamento.

Pequenas velocidades de bombeamento para hidrogênio, hélio e neônio têm sido observadas, pela retenção destes gases nas

camadas de condensação ("cryotrapping") e o efeito deste processo tem sido aumentado pelo recobrimento da crio-superfície com um material capaz de bombeá-los por sorpção ("carvão" ou zeolita). Desta forma a bomba criogênica poderá remover estes gases do sistema mas a saturação deste material é rápida necessitando manutenção mais freqüente.

A seqüência de partida para uma bomba criogênica é - primeiro gelar as blindagens de radiação e o "baffle" chevron com nitrogênio líquido assim que o ciclo de pré-vácuo se complete: - com isto se consegue reduzir substancialmente a carga inicial sobre a superfície de condensação e também o tempo de partida.

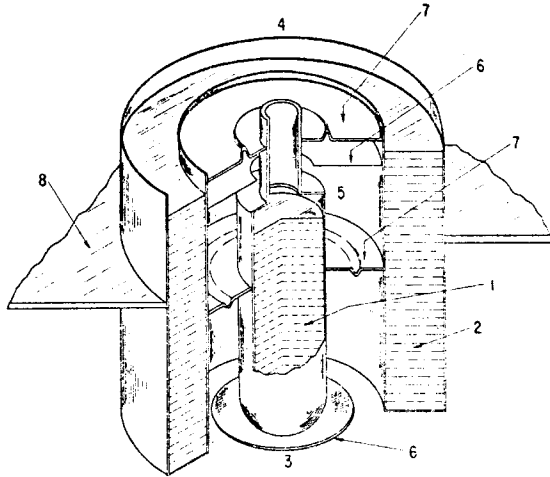


Fig. 77 - Desenho esquemático de uma bomba criogênica.

- 1 - Hélio líquido
- 2 - Nitrogênio líquido
- 3 - Região de ultra-alto vácuo
- 4 - Pressão atmosférica
- 5 - Região de vácuo (isolada)
- 6 - Refletor de calor
- 7 - Separador
- 8 - Parede da câmara (onde está instalada a bomba)

As aplicações das bombas criogênicas são, basicamente:

- 1 - para produzir velocidades de bombeamento extremamente altas para túneis de vento de baixa densidade, instalações para testes de foguetes, etc.
- 2 - para produzir pressões muito baixas para câmaras de simulação de ambiente espacial, sistemas de alto-vácuo ultra-limpos e de grande volume, etc.
- 3 - para produzir ultra-alto vácuo em ciclos curtos - em sistemas que não possam ser aquecidos.

As duas primeiras aplicações requerem unidades refrigeradoras a hélio de alta potência especialmente desenhadas para o projeto em particular. Já o terceiro tipo pode usar como fonte de refrigeração, hélio líquido ou então gás hélio a baixa temperatura

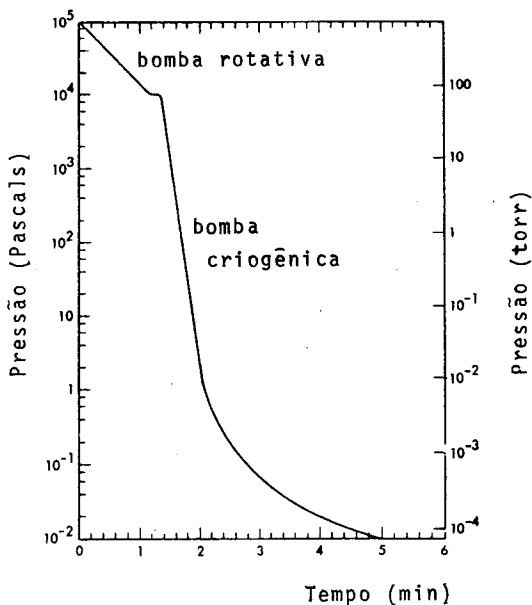


Fig. 78 - Curva de bombeamento de uma câmara de 150 l, feito em duas etapas: a primeira com uma bomba rotativa de 350 l/min de capacidade e a segunda com bomba criogênica de alta velocidade.

tura circulando através de um compressor, semelhante ao encontrado em geladeiras domésticas, dotado apenas de um filtro especial para impedir a circulação de vapor de óleo que de outro modo iria congelar, entupindo a tubulação.

Estas bombas dotadas de compressor não requerem recar gas constantes, produzindo temperaturas entre 12 e 15 K, exigindo uma potência da ordem de 1 W. São capazes de produzir pressões - entre 10^{-9} e 10^{-10} torr em um sistema que não foi aquecido, dentro de 3 - 4 horas, partindo de pressão atmosférica.

Dentre as vantagens podemos citar a extrema limpeza, alta velocidade, pressões extremamente baixas, ausência de barulho e vibrações, grande liberdade de desenho e posição, facilidade de operação, velocidades de bombeamento próximas para diferentes tipos de gases (vide tabela):

	Varian VK-12C	Edwards CRP8
Ø da flange	8"	8"
água	4.100 l/s	4.200 l/s
ar	1.050 l/s	1.150 l/s
argônio	950 l/s	1.050 l/s
hidrogênio	1.150 l/s	1.400 l/s
nitrogênio	1.050 l/s	-
hélio	-	750 l/s
potência	1,8 kW	1,8 kW

Apresenta como desvantagem o fato do material de sorção poder bombear pouco gás; entradas de ar acidentais saturam a bomba sendo necessário reiniciar o processo de partida com bomba auxiliar; o gás hélio para refrigeração precisa ser 99,999% puro; manutenção especializada se bem que não frequente.

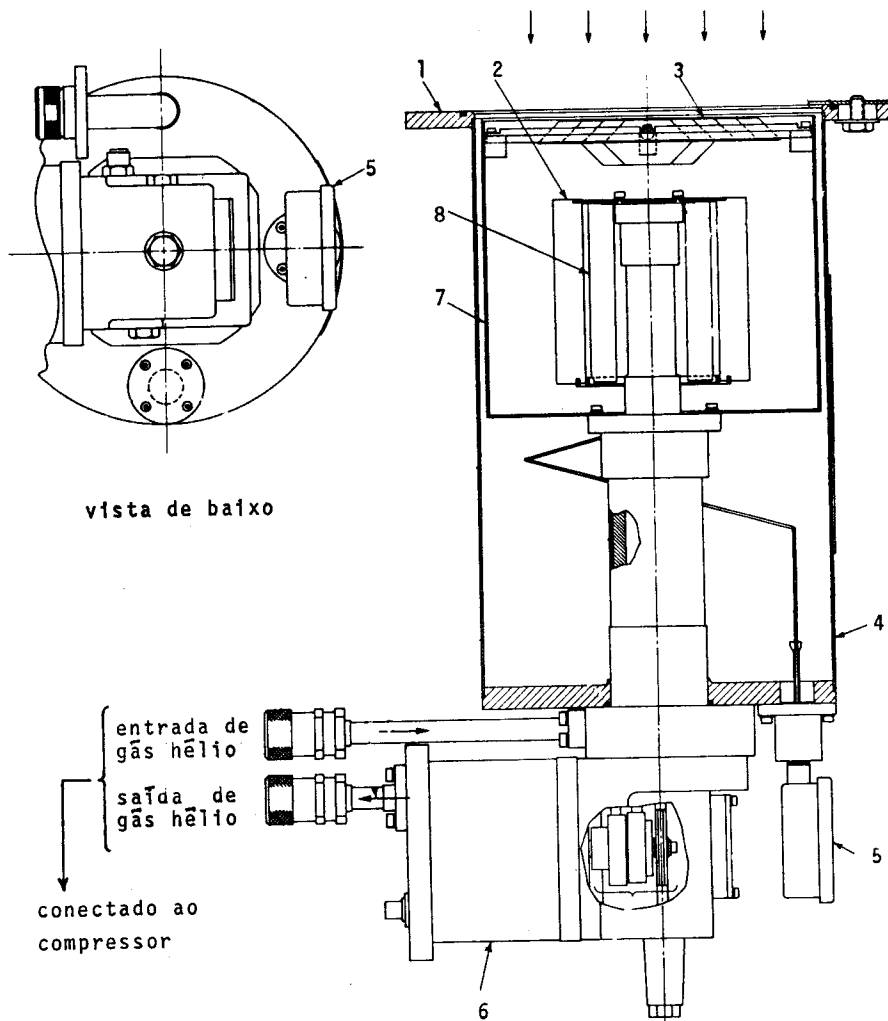


Fig. 79 - Desenho em corte de uma Bomba Criogênica (CTI, modelo "Cryo-Torr 8", de 1500 l/seg para ar)

- | | |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| 1 - flange de entrada | 5 - termômetro a gás |
| 2 - superfícies condensadoras de 15 K | 6 - unidade refrigeradora |
| 3 - superfícies condensadoras de 80 K | 7 - blindagem de radiação de 80 K |
| 4 - corpo da bomba | 8 - superfície de adsorção de 15 K |

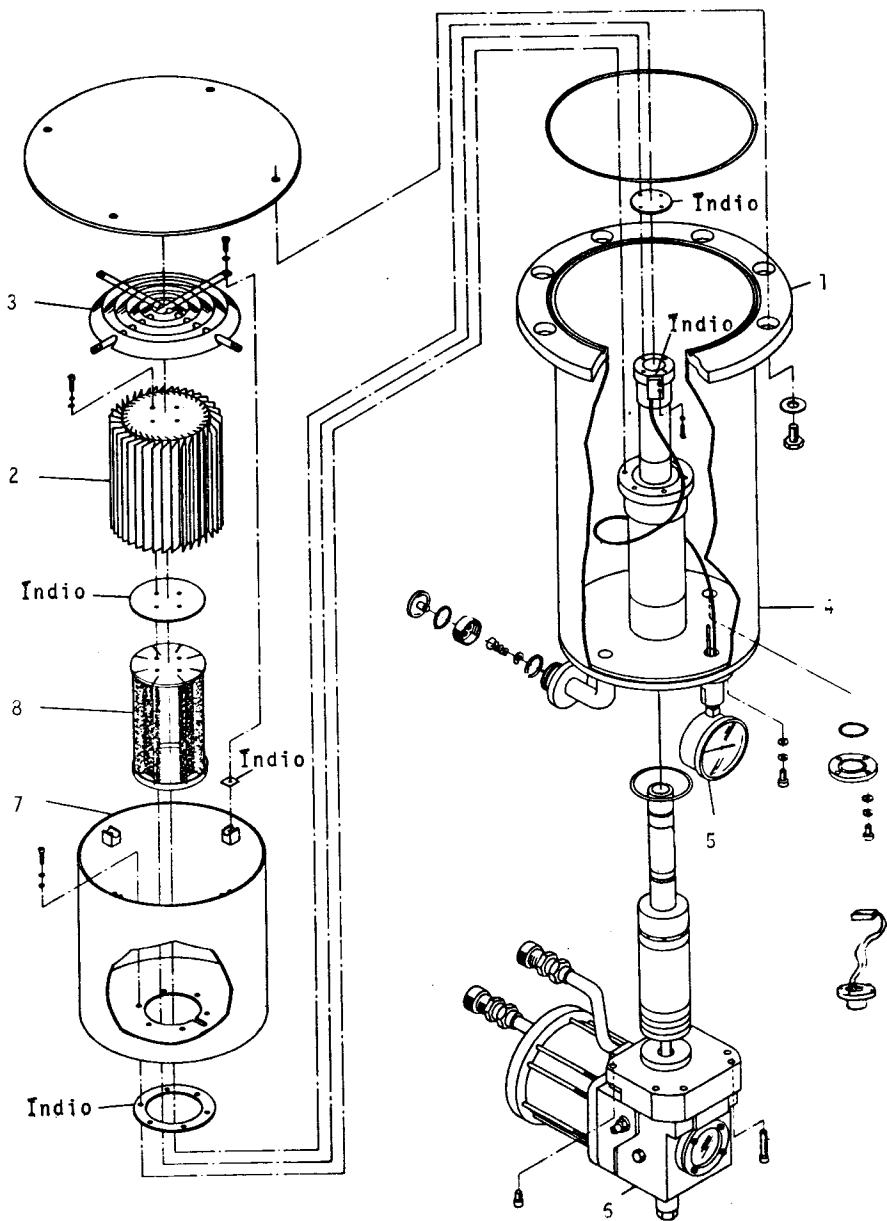
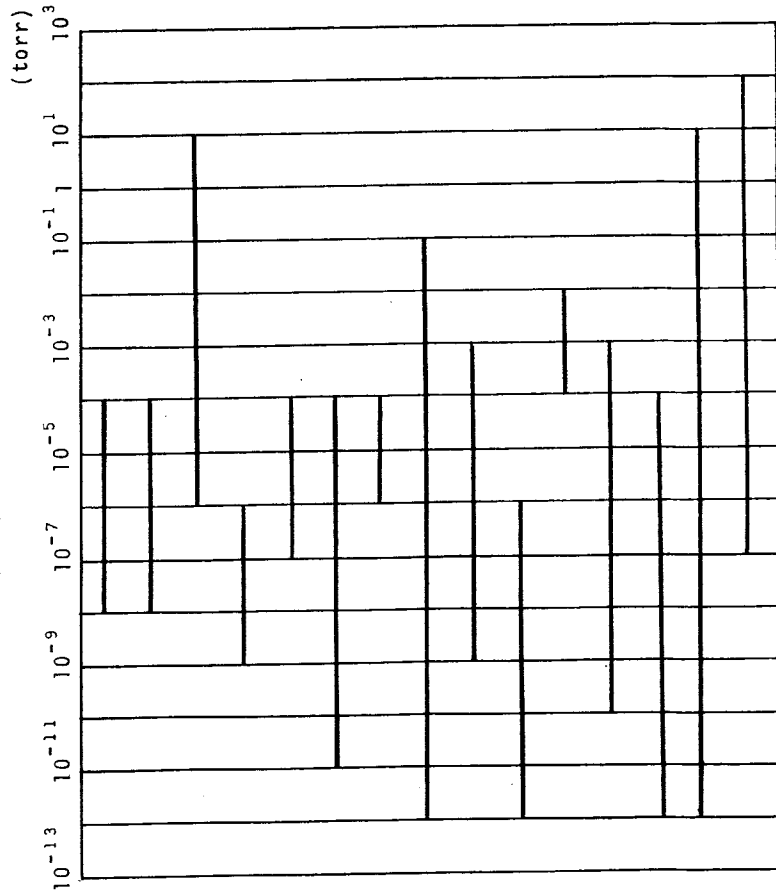


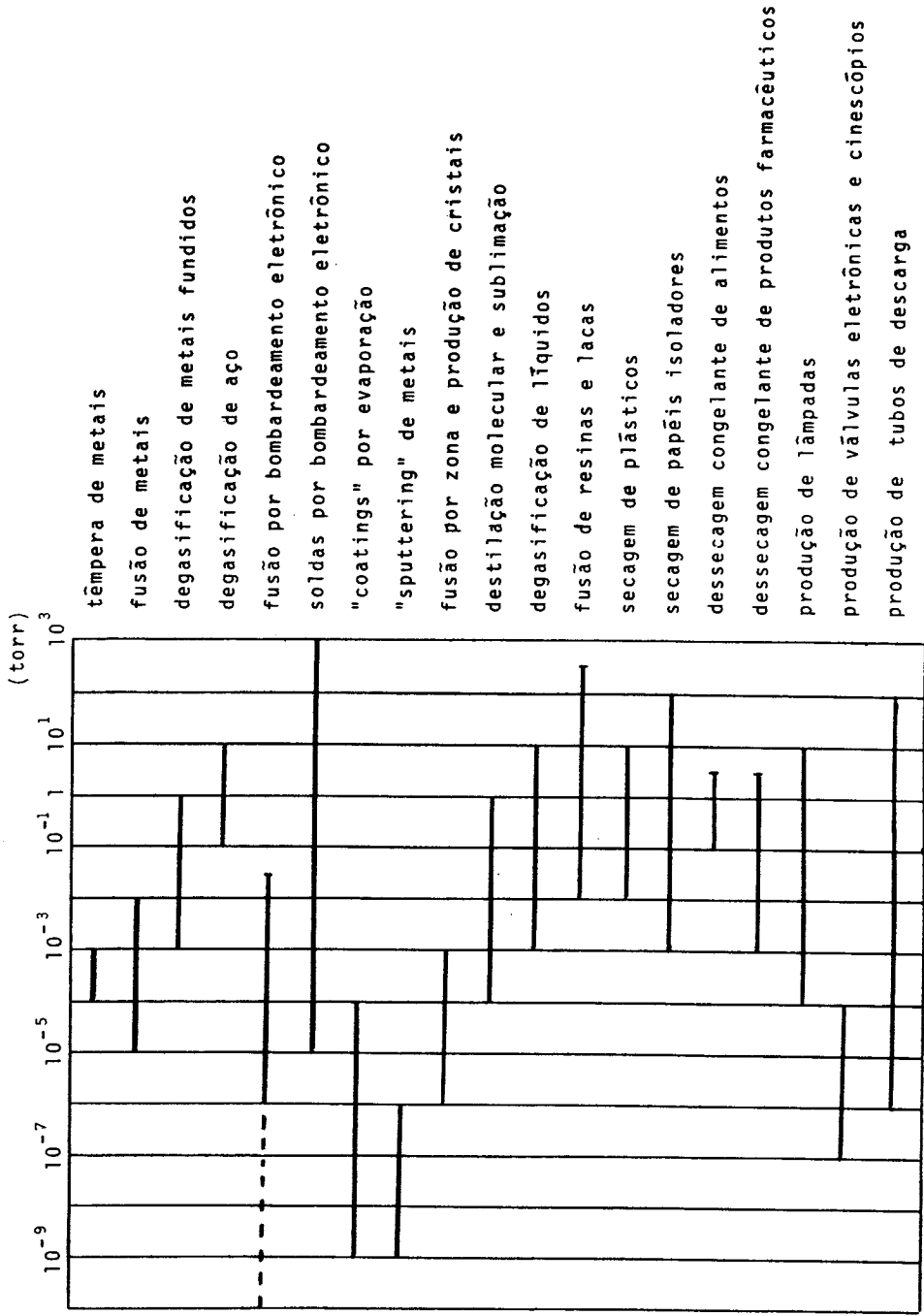
Fig. 80 - Partes componentes da Bomba Criogênica mostrada em corte na figura anterior. (a numeração é a mesma).

ALGUMAS APLICAÇÕES DO VÁCUO E SUAS FAIXAS DE PRESSÃO

a) Laboratórios de Pesquisa em Física e Química:



b) Processos Industriais:



APENDICE 2

UNIDADES DE PRESSÃO (VÁCUO)

	bar	mbar	Pa	atm	torr
1 bar	1	10^3	10^5	0,986923	750,062
1 mbar	1×10^{-3}	1	10^2	$0,986923 \times 10^{-3}$	0,750062
1 Pa	10^{-5}	10^{-2}	1	$0,986923 \times 10^{-5}$	$0,750062 \times 10^{-2}$
1 atm	1,01325	$1,01325 \times 10^3$	$1,01325 \times 10^5$	1	760
1 torr	$1,333224 \times 10^{-3}$	1,333224	$1,333224 \times 10^2$	$1,315789 \times 10^{-3}$	1

De acordo com as novas regras do "Internacional System of Units", as unidades oficiais de pressão passam a ser o bar (dinas $\times \text{cm}^{-2}$), mbar e o Pascal ($\text{Pa} - \text{N} \times \text{m}^{-2}$), no lugar de atm e torr.

APENDICE 3

Pressão		nº de moléculas em	
mbar	torr	um volume de 22,4 l	uma área de $4,8 \times 10^3 \text{ cm}^2$
1000	750	6×10^{23}	$4,8 \times 10^{20}$
100	75	8×10^{22}	3×10^{20}
10	7,5	8×10^{21}	2×10^{20}
1	$7,5 \times 10^{-1}$	8×10^{20}	1×10^{20}
10^{-1}	$7,5 \times 10^{-2}$	8×10^{19}	5×10^{19}
10^{-3}	$7,5 \times 10^{-4}$	8×10^{17}	1×10^{19}
10^{-5}	$7,5 \times 10^{-6}$	8×10^{15}	5×10^{18}
10^{-7}	$7,5 \times 10^{-8}$	8×10^{13}	1×10^{18}
10^{-9}	$7,5 \times 10^{-10}$	8×10^{11}	1×10^{18}

APENDICE 4

COMPOSIÇÃO DO AR (SECO E AO NÍVEL DO MAR)

	% em Volume	Pressão parcial (torr)
Nitrogênio	78,1	593
Oxigênio	20,9	159
Argônio	0,93	7,1
Dióxido de Carbono	0,03	0,23
Criptônio	$1,14 \times 10^{-4}$	$7,6 \times 10^{-4}$
Neônio	$18,2 \times 10^{-4}$	137×10^{-4}
Hélio	$5,24 \times 10^{-4}$	40×10^{-4}
Hidrogênio	$0,5 \times 10^{-4}$	$3,8 \times 10^{-4}$
Metano	2×10^{-4}	
Xenônio	$8,7 \times 10^{-6}$	$0,68 \times 10^{-4}$
Vapor d'água	—	7 (depende da umidade)

ALGUNS DADOS DO AR À TEMPERATURA AMBIENTE

		PRESSÃO (TORR)							
		10^{-3}	10^{-8}	10^{-10}	10^{-12}	10^{-14}	10^{-16}		
	760								
Caminho livre médio	10^{-5} cm	7 cm	7 km	700 km	7×10^5 km	7×10^6 km	7×10^8 km		
Número de moléculas por cm	$2,5 \times 10^{19}$	$3,3 \times 10^{13}$	$3,3 \times 10^8$	$3,3 \times 10^6$	$3,3 \times 10^4$	$3,3 \times 10^2$	3,3		
Número de moléculas batendo em $1 \text{ cm}^2/\text{s}$.	3×10^{23}	$3,5 \times 10^{17}$	$3,5 \times 10^{12}$	$3,5 \times 10^{10}$	$3,5 \times 10^8$	$3,5 \times 10^6$	$3,5 \times 10^4$		
Taxa média de colisões entre moléculas	$5 \times 10^9/\text{s}$	$6,5 \times 10^3/\text{s}$	$6,5 \times 10^{-2}/\text{s}$ 1 a cada 15,4 s.	$6,5 \times 10^{-4}/\text{s}$ 1 a cada 25,5 min.	$6,5 \times 10^{-6}/\text{s}$ 1 a cada 45 h.	$6,5 \times 10^{-8}/\text{s}$ 1 a cada 188 dias	$6,5 \times 10^{-10}/\text{s}$ 1 a cada 51,5 anos		

DADOS CINÉTICOS PARA ALGUNS GASES

Gás	Massa de uma molécula (g)	Diâmetro médio de uma molécula (cm)	Caminho livre médio (cm)		Velocidade média aritmética a 200 C (cm/s)	Condutividade térmica a 760 torr e 00 C cal/(s)(cm)(K)	Viscosidade de a 760 torr e 200 C (poise)	Número de colisões moleculares a 10-6 torr e 200 C por cm ²	Tempo para formar uma camada de moléculas a 200 C e 10-6 torr (s)
			a 200 C 750 torr	a 200 C 10-3 torr					
Ar	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Hidrogênio	$3,35 \times 10^{-24}$	$2,75 \times 10^{-8}$	$17,44 \times 10^{-6}$	5,1	$4,63 \times 10^4$	$5,76 \times 10^{-5}$	$18,1 \times 10^{-5}$	—	—
Hélio	$6,64 \times 10^{-24}$	$2,18 \times 10^{-8}$	$27,45 \times 10^{-6}$	9,2	$17,55 \times 10^4$	$41,9 \times 10^{-5}$	$8,75 \times 10^{-5}$	$14,4 \times 10^{14}$	1,04
Argônio	$66,2 \times 10^{-24}$	$3,67 \times 10^{-8}$	$9,88 \times 10^{-6}$	14,6	$12,52 \times 10^4$	$34,3 \times 10^{-5}$	$19,41 \times 10^{-5}$	$10,2 \times 10^{14}$	2,42
Nitrogênio	$46,5 \times 10^{-24}$	$3,75 \times 10^{-8}$	$9,29 \times 10^{-6}$	5,15	$3,95 \times 10^4$	$3,88 \times 10^{-5}$	$22,17 \times 10^{-5}$	$3,23 \times 10^{14}$	2,69
Oxigênio	$53,1 \times 10^{-24}$	$3,61 \times 10^{-8}$	$9,93 \times 10^{-6}$	4,95	$4,71 \times 10^4$	$5,68 \times 10^{-5}$	$17,6 \times 10^{-5}$	$3,87 \times 10^{14}$	2,14
Monóxido de Carbono	$46,5 \times 10^{-24}$	$3,15 \times 10^{-8}$	$9,23 \times 10^{-6}$	5,3	$4,40 \times 10^4$	$5,7 \times 10^{-5}$	$20,2 \times 10^{-5}$	$3,62 \times 10^{14}$	2,46
Dióxido de Carbono	$73,0 \times 10^{-24}$	$4,59 \times 10^{-8}$	$6,15 \times 10^{-6}$	7,0	$4,71 \times 10^4$	$5,42 \times 10^{-5}$	$17,5 \times 10^{-5}$	$3,87 \times 10^{14}$	2,42
Vapor de Água	$29,9 \times 10^{-24}$	$4,6 \times 10^{-8}$	—	3,3	$3,76 \times 10^4$	$3,32 \times 10^{-5}$	$14,8 \times 10^{-5}$	$3,08 \times 10^{14}$	1,73
Vapor de Mercúrio	334×10^{-24}	$4,26 \times 10^{-8}$	$14,70 \times 10^{-6}$	3,3	$5,87 \times 10^4$	$5,5 \times 10^{-5*}$	$9,8 \times 10^{-5}$	$4,82 \times 10^{14}$	1,11
				3,8	$1,76 \times 10^4$	$1,19 \times 10^{-5}$	—	—	—

(*) a 1000 C

TAXA DE DEGASIFICAÇÃO DE MATERIAIS USADOS EM SISTEMAS DE VÁCUO

	Taxa de Degasificação torr $\text{g s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	
	1 hora em vácuo	4 horas em vácuo
Alumínio	60×10^{-10}	5×10^{-10}
Duralumínio	1700×10^{-10}	350×10^{-10}
Cobre (polido)	35×10^{-10}	5×10^{-10}
Cobre OFHC (não polido)	200×10^{-10}	15×10^{-10}
Cobre OFHC (polido)	20×10^{-10}	2×10^{-10}
Aço	44000×10^{-10}	150×10^{-10}
Molibdênio	50×10^{-10}	4×10^{-10}
Aço inoxidável (não polido)	200×10^{-10}	15×10^{-10}
Aço inoxidável (eletropolimento)	50×10^{-10}	4×10^{-10}
Aço inoxidável (polimento mecânico)	20×10^{-10}	4×10^{-10}
Porcelana	65×10^{-8}	30×10^{-8}
Esteatita	9×10^{-8}	3×10^{-8}
Vidro-molibdênio	70×10^{-8}	4×10^{-8}
Pirex (Corning 7740)	75×10^{-8}	6×10^{-8}

APÊNDICE 7 (continuação)

TAXA DE DEGASIFICAÇÃO DE MATERIAIS USADOS EM SISTEMAS DE VÁCUO

	Taxa de Degasificação torr & s ⁻¹ cm ⁻²	
	1 hora em vácuo	4 horas em vácuo
Celulóide	1000×10^{-8}	500×10^{-8}
Kel F	4×10^{-8}	2×10^{-8}
Mylar	250×10^{-8}	50×10^{-8}
Nylon	1200×10^{-8}	600×10^{-8}
Plexiglass	300×10^{-8}	200×10^{-8}
Polietileno	25×10^{-8}	12×10^{-8}
Poliuretano	50×10^{-8}	25×10^{-8}
Teflon (PTFE)	30×10^{-8}	15×10^{-8}
PVC	100×10^{-8}	2×10^{-8}

PROPRIEDADES DE SOLVENTES MAIS COMUNS

	Fórmula	Pressão de vapor à temperatura ambiente (torr)	Ponto de ebulição (°C)	Toxidez: máxima concentração permitida (ppm)
Tricloretileno	C_2HCl_3	60	87	100
Tetracloreto de carbono	CCl_4	88	77	10
Clorofórmio	$CHCl_3$	180	61	50
Benzeno	C_6H_6	80	80	25
Tolueno	C_7H_8	23	110	200
Xilol	C_8H_{10}	5	140	200
Eter etílico	$C_4H_{10}O$	440	35	400
Acetona	C_3H_6O	180	56	1000
Metil-etil-cetona	C_4H_8O	71	80	250
Alcool metílico (metanol)	CH_4O	98	65	200
Alcool etílico	C_2H_6O	46	78	1000
Alcool isopropílico	C_3H_8O	38	82	400
Freon MF	CCl_3F	700	24	1000
Freon TF	CCl_2FCClF_2	284	48	1000
Freon BF	CCl_2FCCl_2F	57	93	1000
Água	H_2O	17,535	100	-
Mercúrio	Hg	$1,2 \times 10^{-3}$	356,6	0,05mg/m ³

PRESSÃO DE VAPOR DE ALGUNS MATERIAIS

	Pressão de vapor a 20 °C (torr)	Ponto de fusão (°C)
Graxa Apiezon L	$< 10^{-10}$	47
Graxa Apiezon M	$< 10^{-8}$	44
Graxa Apiezon N	$< 10^{-9}$	43
Graxa Apiezon T	10^{-8}	125
Graxa Apiezon AP100	$< 10^{-10}$	47
Graxa Apiezon AP101	$< 10^{-5}$	(*)
Celvacene "light"	10^{-6}	90
Celvacene "medium"	$< 10^{-6}$	120
Celvacene "heavy"	$< 10^{-6}$	130
Vacuseal "light"	10^{-5}	50
Vacuseal "heavy"	10^{-5}	60
Graxa de Silicone	$< 10^{-6}$	215
Graxa Lubriseal	$< 10^{-5}$	40
Araldite	$< 10^{-6}$ (+)	60
Glyptal	2×10^{-4} (+)	100

(*) Em temperaturas elevadas não chega a fundir

(+) A 25 °C

óleo	composição química	temperatura de ebulição (°C)	peso molecular	densidade relativa a 25 °C
Apiezon A	hidrocarboneto de petróleo	190	354	0,862
Apiezon B	" " "	220	420	0,869
Apiezon C	" " "	255	479	0,872
Apiezon AP201	" " "	160	310	0,862
Apiezon AP301	éster orgânico	225	584	0,965*
Silicone 702	metil polisiloxano	185	530	1,071
Silicone 703	" "	206	570	1,089
Silicone 704	tetrafenil tetrametil trisiloxano	223	484	1,066
Silicone 705	pentafenil trimetil trisiloxano	254	546	1,095
Santovac 5	éter polifenílico	295	446	1,195
Fomblin YVAC 18/8 e 25/9	poliéter perfluorado	240	2650	1,89
Edwards L9	naftaleno	251	407	0,901
Neovac SY	éter mono-N-alquildifenílico	220	405	0,94
Alcatel 200	óleo mineral	180	400	0,88
Alcatel 211	poliéster perfluorado	190	2000	1,9
Alcatel 214 (DC 704)	tetrametil tetrafenil trisiloxano	185	484	1,066
Alcatel 215 (DC 705)	pentafenil trimetil trisiloxano	240	546	1,095
Alcatel 220	elcosil naftaleno	250	408	0,93
Octoil	di-2-etilexilftalato	183	391	0,9827
Octoil S	di-2-etilexilsebacato	199	427	0,9122
Convacolor 8	hidrocarboneto clorado (difenil)	122	290	1,447
Convacolor 12	" "	130	326	1,538
Convalex 10	éter polifenílico	275	454	1,198
Convoil 10	hidrocarboneto de petróleo	135	250	0,91
Convoil 20	" " "	190	400	0,86
Butyl Phthalate	di-n-butilftalato	135	278	1,044
Narcoil 10	difenil clorado	150	326	1,538
Narcoil 20	di-2-etilexilsebacato	215	427	0,912
Narcoil 40	di-(3,5,5-trimetilexil)ftalato	215	419	0,973
Mercúrio	Hg	127	200,6	13,6

(*) a 20 °C

(continuação)

Óleo	Pressão final a 20 °C (torr)	Pressão de Vapor a (°C)			Viscosidade a (°C): (cSt)		
		(torr)			20	100	150
		20	100	150	20	100	150
Apiezon A	$4,9 \times 10^{-5}$	8×10^{-7}	$3,0 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-1}$	59	4,5	2,2
Apiezon B	$1,0 \times 10^{-6}$	$3,8 \times 10^{-8}$	$3,5 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-2}$	142	7,0	3,0
Apiezon C	$1,0 \times 10^{-7}$	$3,0 \times 10^{-9}$	$3,8 \times 10^{-5}$	$2,0 \times 10^{-3}$	283	10,6	4,0
Apiezon AP201	$4,9 \times 10^{-5}$	$3,8 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-2}$	$4,9 \times 10^{-1}$	34	5,0	2,7
Apiezon AP301	$1,0 \times 10^{-7}$	$3,6 \times 10^{-8}$	$2,5 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-2}$	23,7 ^c	4,78	-
Silicone 702	$4,9 \times 10^{-6}$	$4,9 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$< 10^{-1}$	55	4,9	2,4
Silicone 703	-	-	-	-	40	-	-
Silicone 704	$4,9 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-2}$	47	4,3	2,2
Silicone 705	$1,0 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-10}$	$1,0 \times 10^{-5}$	$< 10^{-3}$	240	7,9	3,3
Santovac 5	$1,0 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-10}$	$4,9 \times 10^{-6}$	3×10^{-4}	2400	12	4,5
Fomblin YVAC 18/8 e 25/9	$2,0 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-4}$	3×10^{-1}	190	9	-
Edwards L9	$3,8 \times 10^{-9}$	$5,9 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-5}$	$1,7 \times 10^{-3}$	71,3	5,6	1,2
Neovac SY	10^{-8}^{\dagger}	10^{-8}^{\dagger}	1×10^{-4}	1×10^{-2}	25 ^a	17 ^b	-
Alcatel 200	$3,8 \times 10^{-7}$	$3,8 \times 10^{-7}^{\dagger}$	-	-	85 ⁺	-	-
Alcatel 211	$8,0 \times 10^{-9}$	$1,5 \times 10^{-8}^{\dagger}$	-	-	150 ⁺	-	-
Alcatel 214 (DC 704)	$8,0 \times 10^{-8}$	$5,3 \times 10^{-8}^{\dagger}$	-	-	45 ⁺	-	-
Alcatel 215 (DC 705)	$3,8 \times 10^{-10}$	$6,0 \times 10^{-10}^{\dagger}$	-	-	200 ⁺	-	-
Alcatel 220	$2,3 \times 10^{-10}$	$4,5 \times 10^{-10}^{\dagger}$	-	-	50 ⁺	-	-
Octoil	$2 \times 10^{-7}^{\dagger}$	1×10^{-7}	1×10^{-3}	6×10^{-2}	51,5	29,6	14,7
Octoil S	$5 \times 10^{-8}^{\dagger}$	1×10^{-8}	4×10^{-4}	2×10^{-2}	18,2	12,6	7,9
Convacolor 8	$2 \times 10^{-4}^{\dagger}$	$1,5 \times 10^{-4}$	2×10^{-1}	3	169,2	45,6	14,2
Convacolor 12	$2 \times 10^{-5}^{\dagger}$	8×10^{-5}	1×10^{-1}	2	4520	462	65,5
Convalex 10	2×10^{-9}	5×10^{-10}	1×10^{-5}	6×10^{-4}	1000	363	-
Convoil 10	$2 \times 10^{-3}^{\dagger}$	6×10^{-5}	7×10^{-2}	1	93,2	48,6	22,0
Convoil 20	$8 \times 10^{-6}^{\dagger}$	3×10^{-7}	2×10^{-3}	8×10^{-2}	80,3	45,8	22,8
Butyl Phthalate	$4 \times 10^{-5}^{\dagger}$	$1,5 \times 10^{-5}$	5×10^{-2}	2	14,4	9,6	5,8
Narcoil 10	$2 \times 10^{-5}^{\dagger}$	8×10^{-5}	-	-	6000*	-	-
Narcoil 20	$5 \times 10^{-8}^{\dagger}$	10^{-8}	-	-	24*	-	-
Narcoil 40	$6 \times 10^{-8}^{\dagger}$	10^{-7}	-	-	-	-	-
Mercúrio	-	$1,1 \times 10^{-3}$	4×10^{-1}	4	1,15*	-	-
					27 °C	38 °C	54 °C

(*) a 20 °C

(+) a 25 °C

(a) a 40 °C

(b) a 50 °C

(c) a 30 °C

	Etileno-propileno	Poliisofreno	Nitrílica (Buna N)	Poliuretano	Neoprene (cloropreno)	Hyalon	Hydrin	Silicone	Poliacrílica	Viton	Butílica	(borracha natural)
	EPDM	T	NBR	AU-EU	CR	CSM	ECO	SI	ACM	FPM	IIR	IR-NR
Dureza Shore "A"	40-80	40-85	40-95	50-100	20-95	50-90	40-80	40-85	40-90	60-90	40-75	30-100
Máxima temperatura de trabalho contínuo (°C)	175	93	121	121	93	150	121	260	176	260	107	107
Mínima temperatura de trabalho contínuo (°C)	-54	-54	-54	-54	-45	-40	-68	-118	-29	-23	-54	-55
Compressão permanente	B	M	MB	B	B	B	R	B	B	MB	R	B
Resilência (capacidade de voltar à forma primitiva)	B	M-R	R-B	M-B	MB	R	MB	B	M	MB	B	B
Impermeabilidade	B	E	B	R	B	B	-	M	E	B	E	R
Resistência à abrasão	B	M	MB	E	MB	B	B	M	R	B	MB	E
Resistência ao calor	E	M	B	R	B	B	-	E	E	E	MB	R
Resistência a baixa temperatura	MB	B	B	B	R	R	-	E	M	R	B	B
Resistência aos ácidos	B	M	R	M	R-B	B	-	R-B	M	E	B	R-B
Resistência ao óleo de baixo ponto de anilina	M	E	R-E	R-B	R	B	R-B	M	B	MB	M	M
Resistência ao óleo de alto ponto de anilina	M	E	R-E	R-B	B	B	R-B	B	B	MB	M	M
Resistência à gasolina aromática	M	MB	R-B	R-B	R	B	M	M-B	M	MB	M	M
Resistência à gasolina não aromática	M	MB	MB	R-B	B	B	R-M	B	B	MB	M	M
Resistência ao álcool etílico	MB	B	B	M	B	B	-	B	M	R	B	B
Resistência à água	E	R	R-B	M	R	R	-	R-B	M	R-B	B	R-B
Resistência aos solventes alifáticos (hexano, aguarrás, solventes para - borracha)	M	MB	MB	MB	R	B	R	M	B	MB	M	M
Resistência aos solventes aromáticos (benzeno, tolueno, xileno)	M	MB	B	B	M	M	M	M	M	MB	M	M
Resistência aos solventes oxigenados (cetonas)	MB	MB	M	M	R	M	M	R	M	M	B	M
Resistência aos solventes halogenados (tetracloroeto de carbono, tricloroetileno, freon)	M	R	M	M	M	R-B	M	M	M	R-B	M	M

M - Mau

R - Regular

B - Bom

MB - Muito Bom

E - Excelente

NOTA: Os tipos de elastômeros mais comumente empregados em sistemas de vácuo são o Neoprene e a Borracha Nitrílica (Buna N). O Viton é empregado com sucesso em pressões muito baixas (Ultra Alto Vácuo).

TAXA DE EVAPORAÇÃO DE ALGUNS MATERIAIS APÓS TRAMENTO PRÉVIO

	HORAS DE BOMBEAMENTO	TEMPERATURA DE COZIMENTO °C	DEGASIFICAÇÃO: TAXA EQUIVALENTE DE N ₂ torr l/s/cm ²	DEGASIFICAÇÃO REAL torr l/s/cm ²
Araldite AT1	(a) 51 (b) 83 (c) 51	- 100 -	2.600 × 10 ⁻¹⁰ n.d. 450	1.300 × 10 ⁻¹⁰ n.d. 225
Araldite CT200 + HT901	(a) 51 (b) 98 (c) 51	- 100 -	1.100 2 190	550 1 95
Araldite CT200 + Hy906+X33/1266	(a) 51 (b) 95 (c) 51	- 100 -	400 1,3 350	200 0,6 175
Mycalex	(a) 52 (b) 83 (c) 51	- 300 -	20 n.d. 7,5	10 n.d. 3,7
Nylon 31	(a) 51 (b) 80 (c) 51	- 120 -	830 6 67	415 3 33
Nylon 51	(a) 51 (b) 82 (c) 51	- 120 -	400 0,8 60	200 0,4 30
Perspex	(a) 51 (b) 102 (c) 51	- 85 -	1.000 60 500	500 30 250
Elastômero de Perbunan (PB60)	(a) 51 (b) - (c) -	- - -	~ 2.000 - -	- - -
Silastomer 80	(a) 51 (b) 101 (c) 51	- 200 -	220 11 100	- - -
Neoprene	(a) algumas (b) 24	- -	- -	10 ⁻⁶ -
Viton A	(a) 52 (b) 24	- 200	- -	7 × 10 ⁻⁸ 1,3 × 10 ⁻⁹
Teflon	(a) algumas (b) 24	- 250	- -	10 ⁻⁸ - 10 ⁻⁷ baixo
Vidro	(a) algumas (b) 24	- 400	- -	10 ⁻⁹ - 10 ⁻⁸ 10 ⁻¹⁵ - 10 ⁻¹⁴
Cerâmica	(a) algumas (b) 24	- 400	- -	10 ⁻⁹ - 10 ⁻⁸ 10 ⁻¹⁵ - 10 ⁻¹⁴
Metal	(a) 50 - 100 (b) 24	- 400	- -	10 ⁻¹⁰ 10 ⁻¹⁵ - 10 ⁻¹⁴

HORAS DE BOMBAMENTO:

- (a) antes de fazer o cozimento
- (b) incluindo 24h de cozimento
- (c) depois de exposto ao ar por 24h.

ALGUNS AGENTES DESSECADORES

Dessecador	fórmula	Volume de ar por ml de dessecador (l) CNTP	Vapor de água residual por l de ar (mg)
Sulfato de Cálcio	CaSO_4	0,45 - 0,7	2,8
Cloreto de Cálcio (granulado)	CaCl_2	6,1 - 24,2	1,5
Sulfato de Cobre	CuSO_4	—	1,4
Brometo de Zinco	ZnBr_2	—	1,16
Cloreto de Zinco (1) (granulado)	ZnCl_2	0,8 - 2,1	0,85
Perclorato de bário (anidro)	$\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2$	2,3 - 3,7	0,82
Hidróxido de Sódio (granulado)	NaOH	2,3 - 8,9	0,80
Cloreto de Cálcio (1) (anidro)	CaCl_2	4,0 - 5,8	0,34
Brometo de Cálcio	CaBr_2	—	0,18
Clorato de magnésio (hidratado)	$\text{Mg}(\text{ClO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	4,0 - 7,2	0,031
Hidróxido de Sódio	NaOH	—	0,016
Hidróxido de Potássio (granulado) (2)	KOH	3,2 - 7,2	0,014
Sílica Gel (3) (Sulfato de Cálcio (anidro))	—	2,1 - 5,3	0,006
Ácido sulfúrico (4) Concentrado	CaSO_4	—	0,005
	H_2SO_4	—	0,003

(1) Não deve ser usado com NH_3 , aminas, HF ou álcool

(2) Não deve ser empregado com gases sensíveis a álcalis nem com gases que contêm CO_2 .

(3) Pode ser regenerado a $200-300^\circ\text{C}$.

(4) Evitar o uso com H_2S , NH_3 , HBr , C_2H_2 ou HCN .

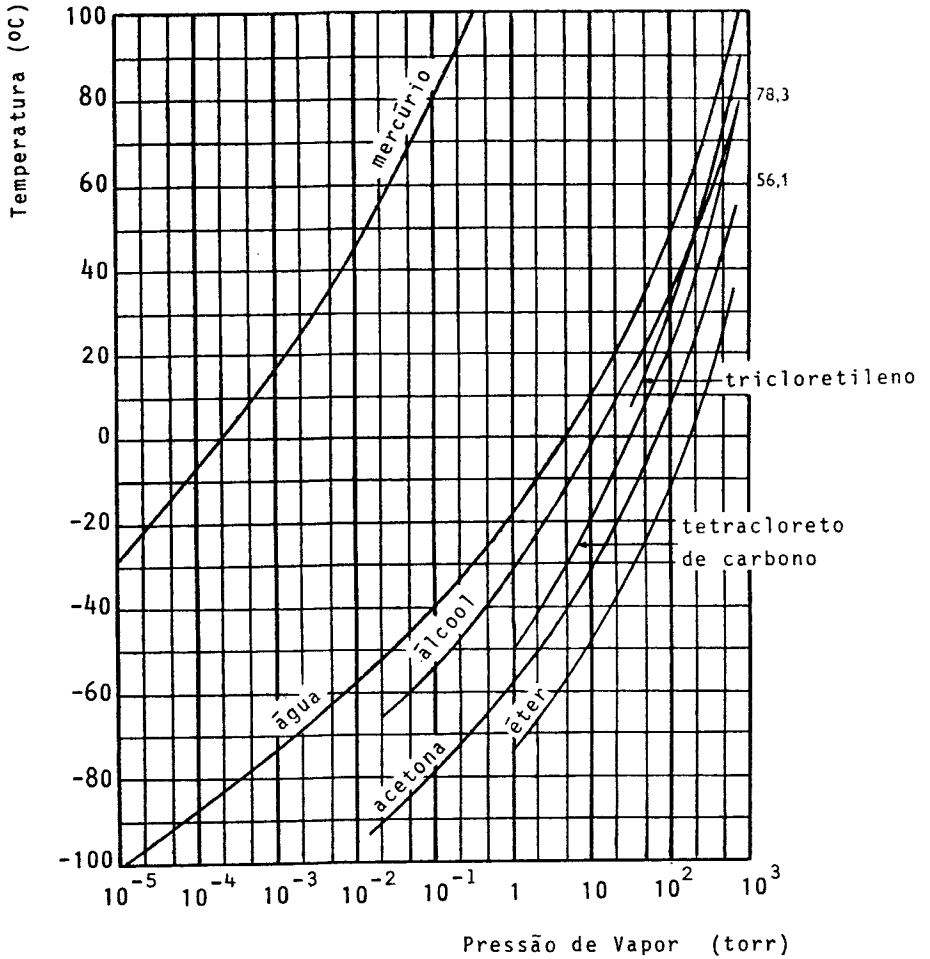
ALGUNS AGENTES DESSECADORES (cont.)

Dessecador	fórmula	Volume de ar por ml de dessecador (λ) CNTP	Vapor de água residual por λ de ar (mg)
Óxido de Cálcio (2)	CaO	7,6 - 10,1	0,003
Clorato de Magnésio (anidro)	Mg(ClO ₃) ₂	2,8 - 5,9	0,002
Hidróxido de potássio(2)	KOH	—	0,002
Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃	5,6 - 6,2	0,001
Óxido de bário	BaO	10,6 - 25	6,5x10 ⁻⁴
Perclorato de Magnésio(5)	Mg(ClO ₄) ₂	—	5x10 ⁻⁴
Pentóxido de fósforo (6)	P ₂ O ₅	—	2,0x10 ⁻⁵
Charcoal refrigerado com ar líquido	—	—	1,6x10 ⁻²³

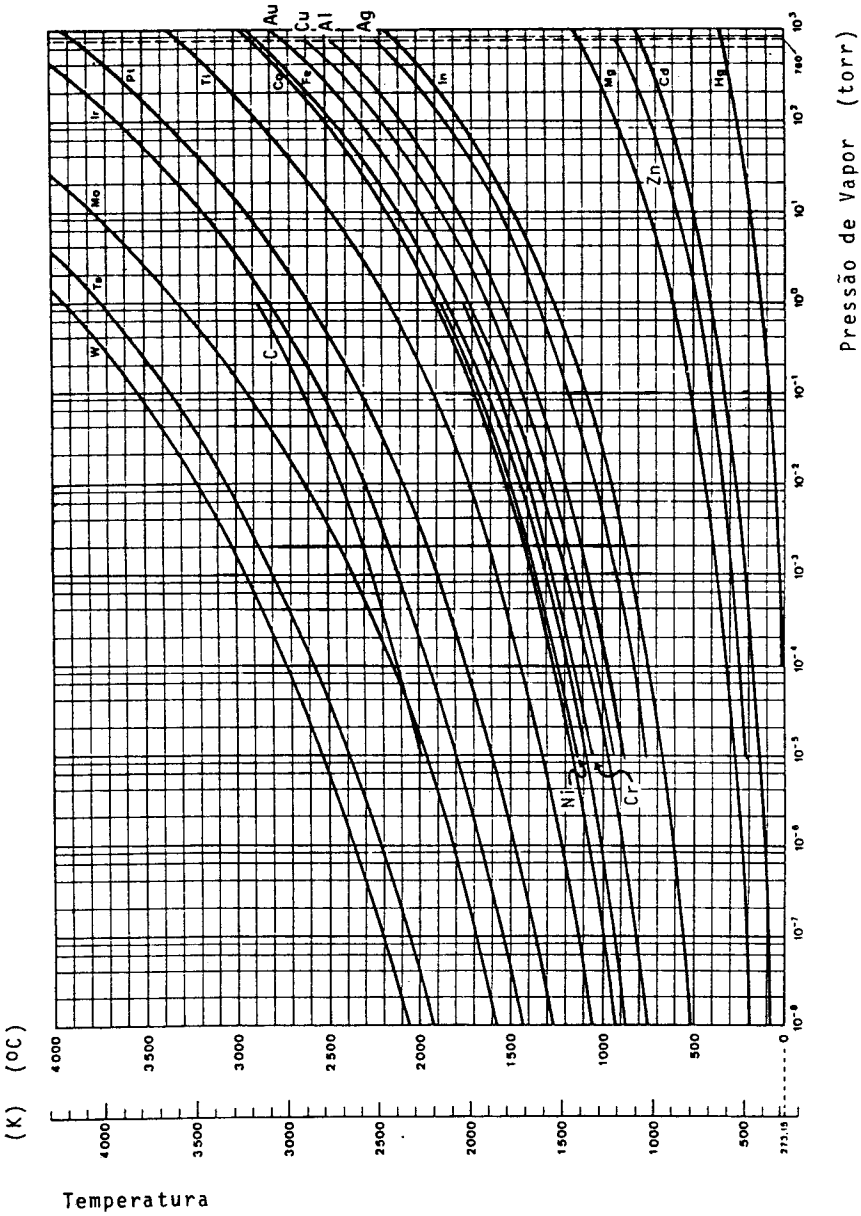
(2) não deve ser empregado com gases sensíveis a álcalis nem com gases que contenham CO₂.

(5) Cuidado quando usado com compostos orgânicos!

(6) Não usar com NH₃ ou haletos de hidrogênio.



(continuação)



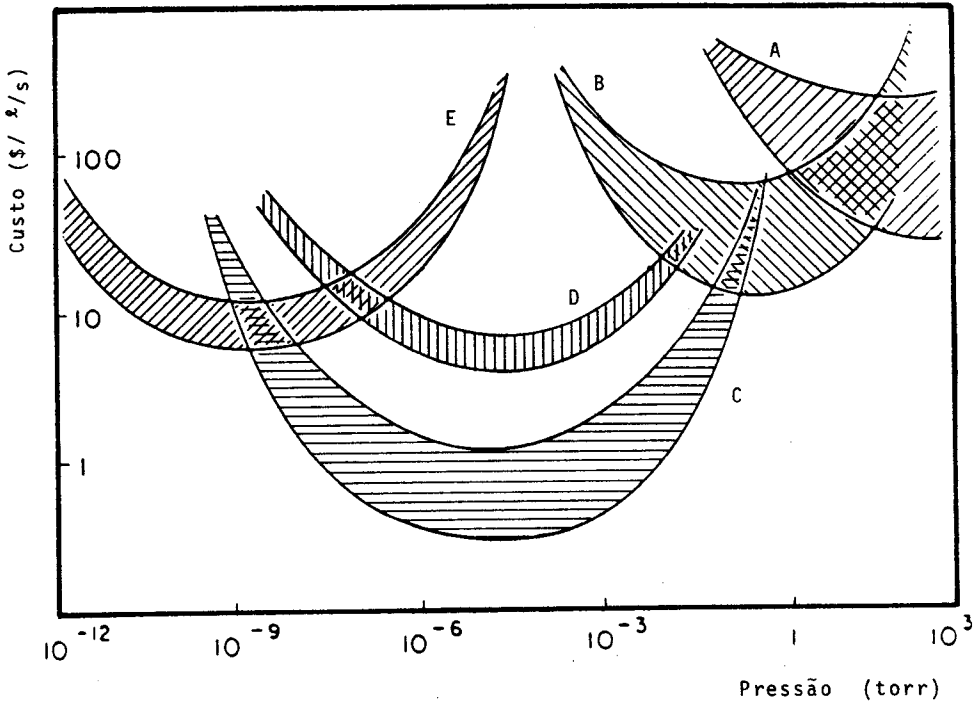
PRESSÕES FINAIS TÍPICAS EM TORR				
	FLUIDOS PARA BOMBA DE DIFUSÃO			
	Mercúrio	Silicone 702 Apiezon B	Silicone 704 Apiezon C	Silicone 705 Convalex 10
PRESSÃO DE VAPOR A 15°C	10 ⁻³	5 × 10 ⁻⁶	5 × 10 ⁻⁸	5 × 10 ⁻¹⁰
Bomba de Difusão + Baffle a 15°C e gasket de metal	10 ⁻³	5 × 10 ⁻⁶	5 × 10 ⁻⁸	5 × 10 ⁻¹⁰
Bomba de Difusão + Baffle a 15°C e gasket de Viton	10 ⁻³	5 × 10 ⁻⁶	5 × 10 ⁻⁶	10 ⁻⁹
Bomba de Difusão + Válvula-Baffle e gasket de metal	10 ⁻³	5 × 10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	5 × 10 ⁻⁶
Bomba de Difusão + Válvula-Baffle e gasket de Viton	10 ⁻³	5 × 10 ⁻⁶	5 × 10 ⁻⁷	5 × 10 ⁻⁷
Bomba de Difusão + Baffle a -20°C e gasket de metal	10 ⁻⁴	10 ⁻⁷	10 ⁻¹⁰ *	< 10 ⁻¹⁰
Bomba de Difusão + Baffle a -20°C e gasket de Viton	10 ⁻⁴	10 ⁻⁷	10 ⁻⁹	10 ⁻⁹
Bomba de Difusão + Trap com Nitrogênio Líquido e gasket de metal	10 ⁻⁸	< 10 ⁻⁹ *	< 10 ⁻¹⁰ *	< 10 ⁻¹⁰
Bomba de Difusão + Trap com Nitrogênio Líquido e gasket de Viton	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻⁹	10 ⁻⁹
Bomba de Difusão + Baffle a -20 °C e Trap com Nitrogênio Líquido e gasket de metal	10 ⁻⁹	< 10 ⁻⁹ *	< 10 ⁻¹⁰ *	< 10 ⁻¹⁰
Bomba de Difusão + Baffle a -20 °C e Trap com Nitrogênio Líquido e gasket de Viton	10 ⁻⁹	10 ⁻⁹	10 ⁻⁹	10 ⁻⁹
Bomba de Difusão + Baffle a 15°C + Válvula e gasket de viton	10 ⁻³	5 × 10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	5 × 10 ⁻⁸
Bomba de Difusão + Baffle a -20°C + Válvula e gasket de viton	10 ⁻⁹	10 ⁻⁷	5 × 10 ⁻⁸	5 × 10 ⁻⁸

* Somente para os óleos de silicone

VELOCIDADES DE BOMBEAMENTO DE UMA BOMBA DE 500 l/s (VELOCIDADE NOMINAL)

	Ar	Oxigênio	Vapor de Água
Bomba de Difusão apenas	500	500	500
Bomba de Difusão + baffle	270	260	300
Bomba de Difusão + trap com nitrogênio líquido	180	175	1900
Bomba Iônica do tipo "sputter-ion"	500	285	525

TIPOS DE BOMBAS



- A - Bombas Mecânicas
- B - Bombas Roots
- C - Bombas de Difusão
- D - Bombas Turbo-moleculares
- E - Bombas Iônicas

Segundo M.H. Hablanian, em "Vacuum Physics and Technology" editado por G.L. Weissler e R.W. Carlson - Academic Press - 1979.

Impresso na Gráfica do Instituto de Física da USP

* 1992 * reimpressão