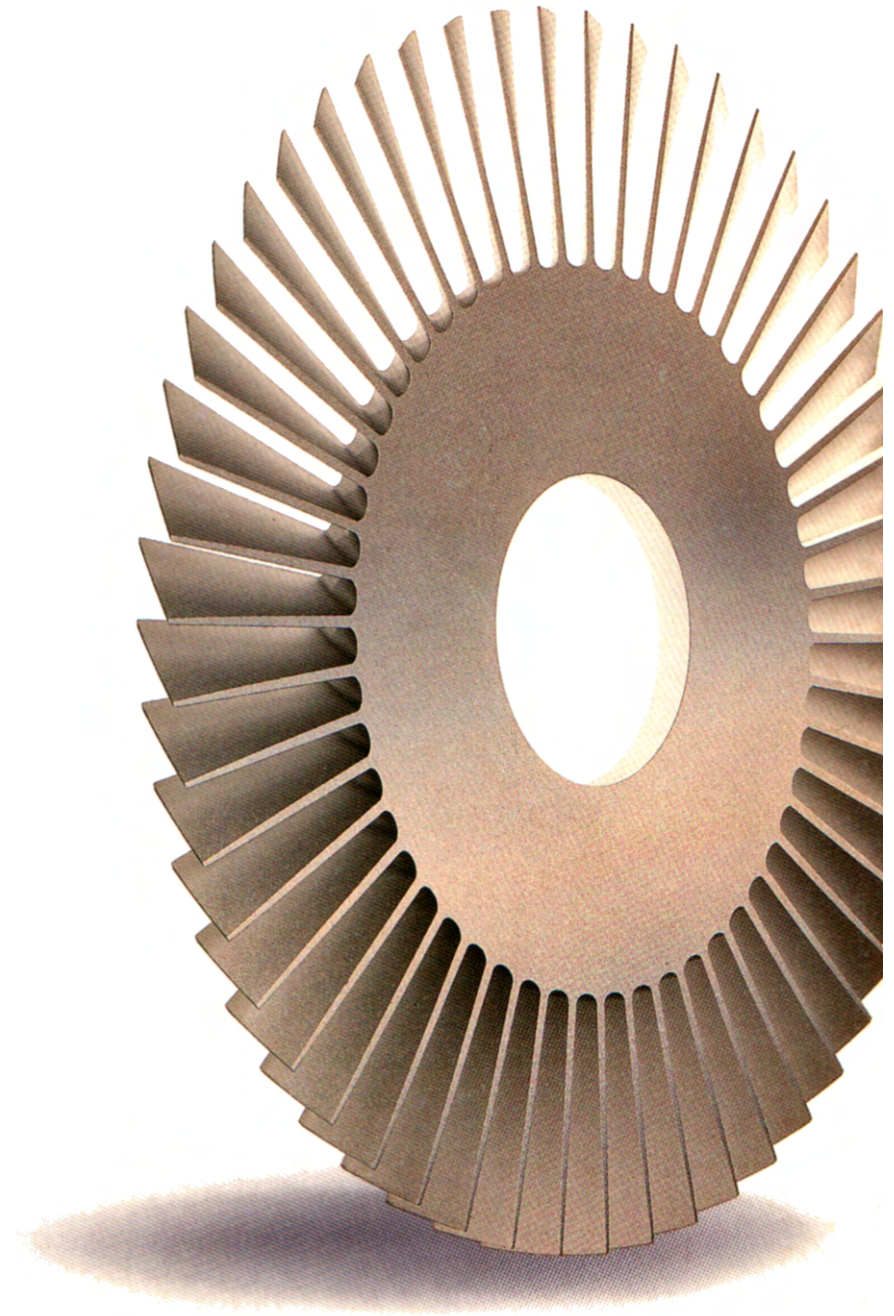


Tecnologia de vácuo

PARTE I: Conceitos básicos.



“Por mais de 100 anos ganhamos dinheiro fazendo NADA!”

(slogan da companhia Pfeiffer Vacuum fundada em 1890 por Arthur Pfeiffer)

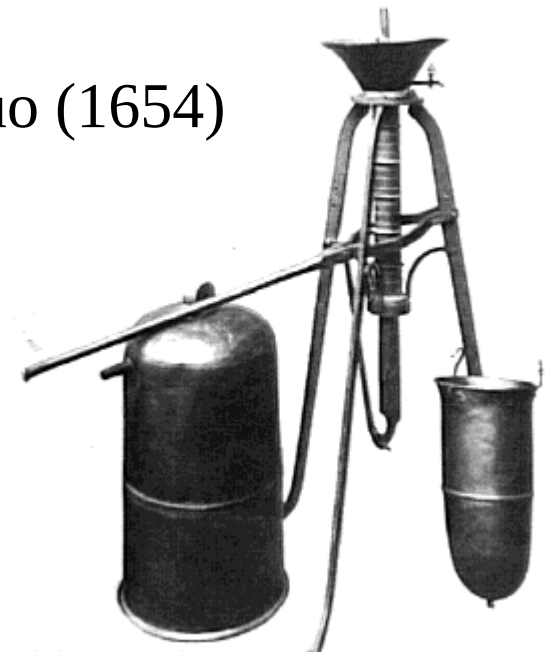
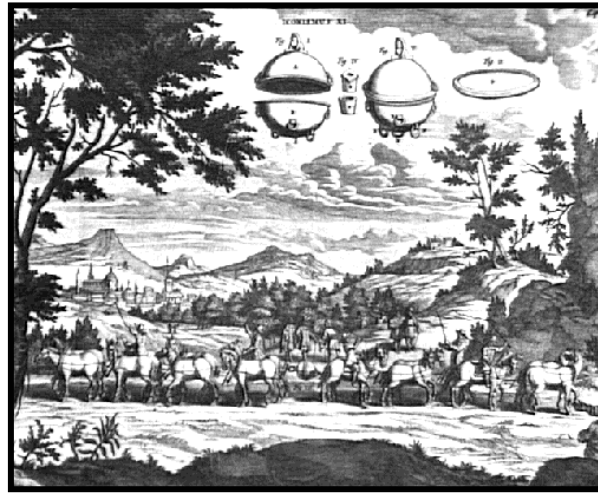
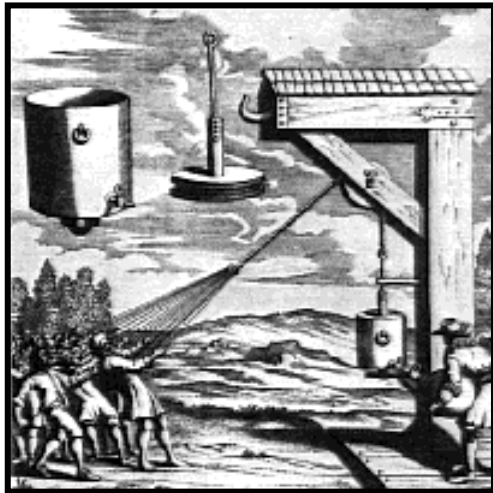


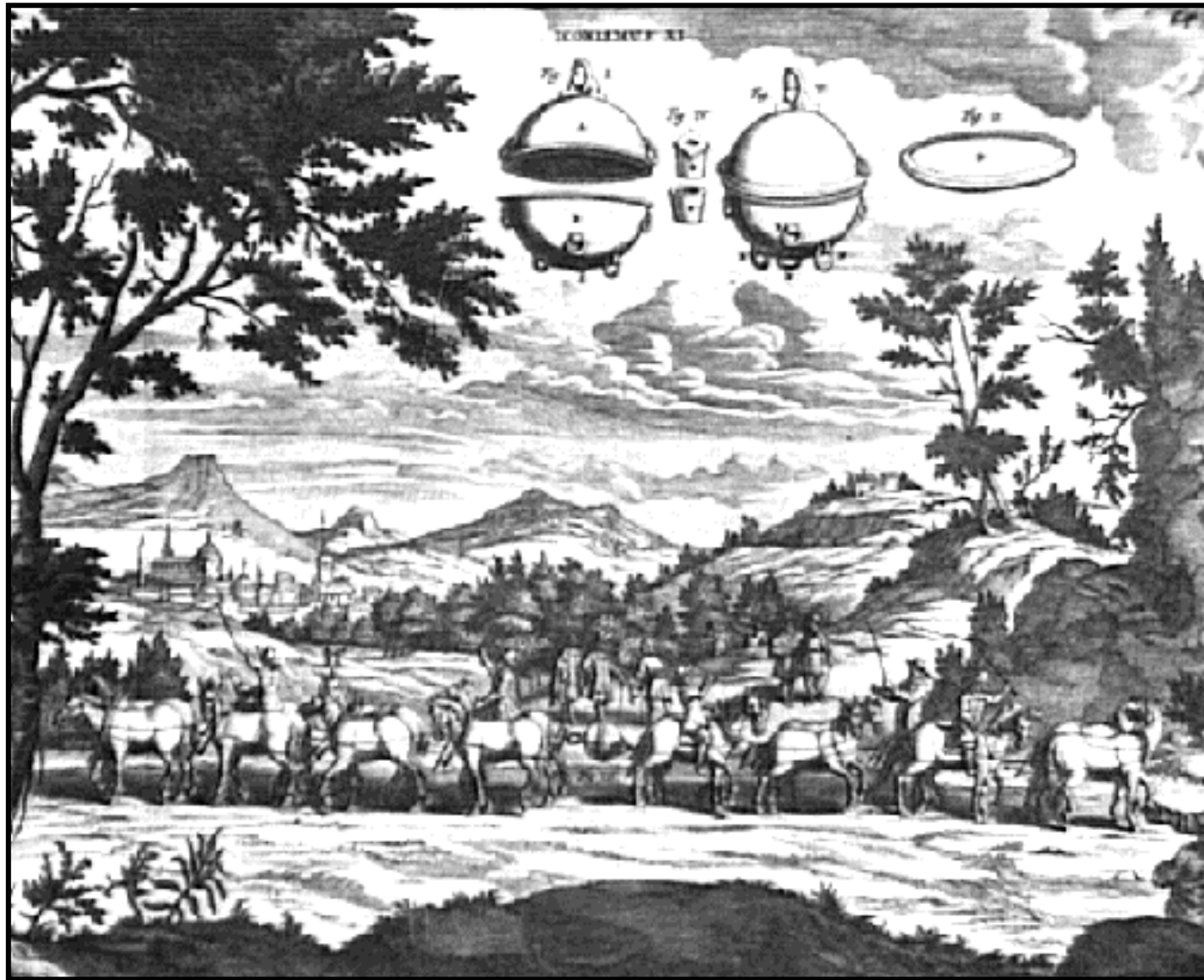
Histórico

- **Aristóteles e Seguidores:** a natureza abomina o vácuo
- **Galileo e Torricelli:** primeiros experimentos → barômetro (1644)

Durante muito tempo o conceito de vácuo se referia exclusivamente a ausência de matéria. Isto tornava o assunto diretamente conectado com mecânica de meio contínuos (fluidos), e ainda mais, com termodinâmica e teoria cinética dos gases.

- **Otto von Guericke:** primeira bomba de vácuo (1654)





As Esferas de Magdeburg
Otto Von Guericke - 1654

Nos dias de hoje, o conceito de vácuo como sendo o “nada absoluto” deveria tornar-se muito mais rigoroso, implicando não somente na ausência de matéria como de toda e qualquer partícula, com ou sem massa, inclusive todo tipo de radiação eletromagnética.

Contudo, o usual nos remete a noção de vácuo do século 17

Hoje, quando falamos em tecnologia vácuo, estamos nos referindo a conhecer e dominar os mecanismos, processos e métodos necessários para retirarmos todo o gás do interior de um recipiente (câmara) e o manter neste estado.

Vácuo: Estado dos gases, ou mistura de gases, rareficados com pressão inferior a pressão atmosférica.

Faixa de Pressão

Nomenclatura

1 bar - 1 mbar

vácuo grosseiro;
muitas vezes nem é considerado vácuo

1 - 10^{-3} mbar

vácuo fino;
tipicamente chamado pré-vácuo (PV)

10^{-3} - 10^{-7} mbar

alto vácuo (HV);
muitas vezes a região 10^{-3} - 10^{-4} mbar
é chamada simplesmente vácuo ou
vácuo médio!

abaixo de 10^{-8} mbar

ultra alto vácuo (UHV);
tipicamente usada para $\approx 10^{-10}$ mbar

- Uma classificação típica! -

Conceitos Fundamentais

Grandezas básicas:

- **Pressão:** 1 Torr = 1/760 atm. = 1.33 mbar = 1.33×10^2 Pa
- **Volume:** 1 m³ = 10³ litros = 10⁶ cm³
- **Temperatura:** 0° C → 273 Kelvin

Teoria cinética dos gases ou via distribuição de Maxwell-Boltzmann:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8.k.T}{\pi.m}} \quad \lambda = \frac{1}{\sqrt{2}.\pi.d_0^2.n} \quad \Gamma = \frac{n.v}{4} = n.\sqrt{\frac{k.T}{2\pi.m}}$$

velocidade
média

livre caminho
médio

numero de colisões com
as paredes / área / tempo

onde m = massa, d_0 = diâmetro e n = numero de partículas / volume

A partir dessas relações básicas obtemos algo ainda mais importante:

$$P = \frac{1}{3} n.m.\bar{v} \quad \Rightarrow \quad P.V = n.k.T \quad \text{ou} \quad P.V = N.R.T$$

$$\text{onde } n = \frac{N.N_A}{V} \quad \text{e} \quad R = N_A.k$$

e assim:

(a) $P_1.V_1 = P_2.V_2$

Lei de Boyle (N, T constantes)

(b) $V_1/T_1 = V_2/T_2$

Lei de Charles (N, P constantes)

(c) $P_1/N_1 = P_2/N_2$

Lei de Avogadro (T, V constantes)

adicionalmente:

$$\varepsilon = \frac{3}{2}.k.T \quad \text{energia media}$$

$$P_{total} = \sum_j P_j^{parcial} \quad \text{lei de Dalton}$$

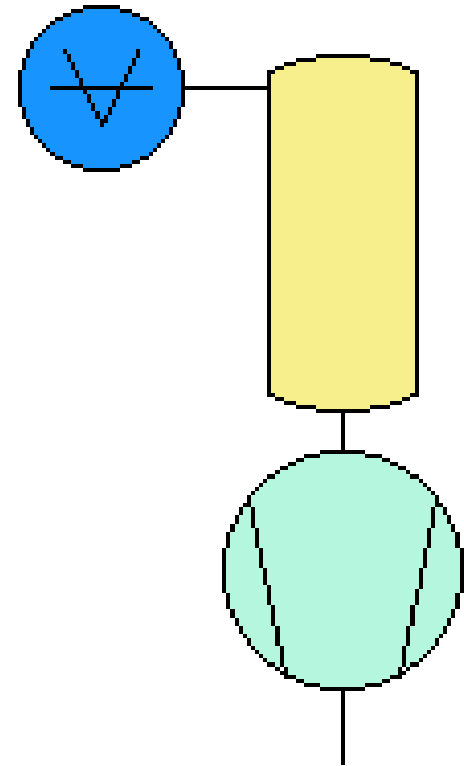
Exemplo

Consideremos uma câmara sendo evacuada de uma pressão inicial $P_1=1$ bar ($\approx$ atm) até atingir uma pressão final $P_2=10^{-3}$ mbar.

Então, para Volume e Temperatura constantes, usando as relações obtidas para um gás ideal, teremos:

$$\begin{aligned}P_1/N_1 &= P_2/N_2 \\ \Rightarrow P_1/P_2 &= N_1/N_2 = 10^6 \\ N_2/N_1 &= 10^{-6}\end{aligned}$$

ou seja, **99.9999 %** das partículas do gás foram removidas do interior do recipiente. Restaram **0.00001%** delas e isto é **MUITO!**

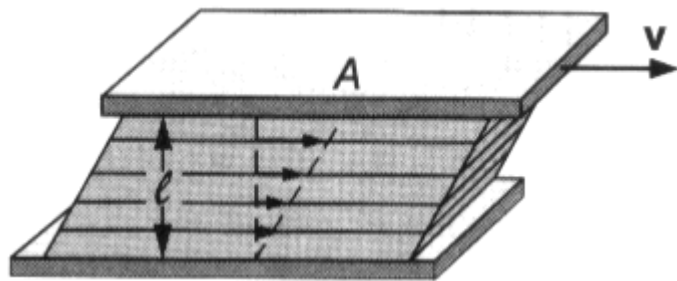


Viscosidade

Supondo uma relação linear entre as forças dissipativas (viscosas) e a velocidade (fluidos Newtonianos), temos para os gases ideais:

$$\eta = \frac{1}{3} n.m.\bar{v}.\lambda \quad [1 \text{ Poise}] = [0.1 \text{ N.s/m}^2]$$

ou segundo Kennard: $\eta = \gamma.n.m.\bar{v}.\lambda$ com $\gamma = 0.4999$ (+realístico)



A viscosidade está relacionada com a transferência de momentum de uma placa para outra. A eficiência deste processo dependerá do número de moléculas.

Para gases rarefeitos adota-se: $\eta = \frac{P.m.\bar{v}}{4.k.T}$ viscosidade molecular livre

Condutividade Térmica

Uma análise simples do fluxo de calor, H , entre duas superfícies (ao longo de uma coordenada y) com $T_1 < T_2$ fornece:

$$H = A.k_T.\frac{dT}{dy} \quad \text{e} \quad k_T = \eta.C_V \quad \text{condutividade térmica}$$

onde A = área e C_V = calor específico do gás (V constante). Contudo, uma análise mais detalhada fornece:

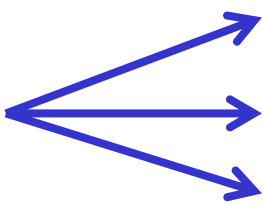
$$k_T = \frac{1}{4} \left(9 \frac{C_P}{C_V} - 5 \right) \eta.C_V$$

onde C_P = calor específico (T constante).

Para $\lambda \gg d$ (d = uma dimensão característica do sistema) estas relações deixam de ser válidas e o processo de transferência de calor será primeiramente um regime misto e depois exclusivamente efetuado por radiação.

Fluxo de Gases

O fluxo de um gás pode ser laminar ou turbulento. Isto é caracterizado pelo numero de Reynolds:

$$\Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta}$$


- $\Re > 2200$ fluxo turbulento
- $\Re < 1200$ fluxo laminar
- $1200 < \Re < 2200$ indeterminado

onde ρ = densidade do fluido (se constante $\rightarrow$ incompressível; se variável $\rightarrow$ compressível) e v = velocidade característica do fluido.

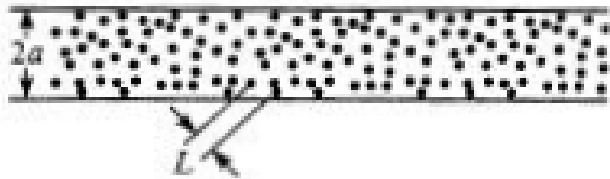
Para fluxos não turbulentos:

$$-\nabla P + \eta \cdot (\nabla^2 \cdot \vec{v}) + \frac{\eta}{3} [\nabla \cdot (\nabla \cdot \vec{v})] + \rho \cdot \vec{g} = \rho \cdot \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \cdot \vec{v} \right)$$

que constitui a chamada equação de Navier-Stokes (eq. não linear).

Fluxos laminares são caracterizados pelo numero de Knudsen, ou seja:

$$K_n = \frac{\lambda}{d}$$



$K_n < 0.01$ fluxo viscoso
 $\Rightarrow \lambda \ll d$ e portanto as
características do fluxo são
determinadas por colisões
entre as moléculas que
compõem o gás

↓
bombeamento por
diferença de pressão

**Região
de
transição
(Knudsen)**



$K_n > 1$ fluxo molecular
 $\Rightarrow \lambda \approx d$ e as características
do fluxo serão
determinadas por colisões
entre moléculas e paredes
(principalmente)

↓
bombeamento por
transferencia de momentum

Fluxo Volumétrico ou Velocidade de Bombeamento

A razão na qual um gás flui através de um dado plano, por exemplo ao longo de uma tubulação ou na bomba, é descrito em termos do chamado fluxo volumétrico que é definido como o volume do gás, a uma dada temperatura e pressão, cruzando este plano por unidade de tempo, ou seja:

$$S = \frac{dV}{dt} \quad [\text{litros/s}] \text{ ou } [\text{m}^3/\text{h}]$$

A velocidade de bombeamento, ou vazão, depende intimamente das características da bomba e do gás que está sendo bombeado. É normalmente especificada para N_2 . Para outros gases usamos:

$$S_{gas} = S_{N_2} \sqrt{\frac{M_{N_2}}{M_{gas}}}$$

que falha grosseiramente para gases muito leves (H_2 ou He).

Throughput ou Fluxo

O fluxo volumétrico não fornece informações sobre a quantidade de gás que esta sendo efetivamente transportada e que varia significativamente com a pressão. Define-se portanto o throughput como:

$$Q = \frac{d}{dt}(P.V) = P \frac{dV}{dt} + V \frac{dP}{dt} = P.S + V \frac{dP}{dt}$$

onde, em termos das correspondentes unidades SI, temos:

$$[Q] = \text{Pa.m}^3/\text{s} = \text{N.m/s} = \text{J/s} = \text{W (Watt)}$$

Então Q representa o fluxo de energia por unidade de tempo, ou seja, a potência, efetivamente empregada no transporte do gás.

Para $T = \text{constante}$ é equivalente ao fluxo de massa e portanto ao numero de partículas transportadas.

Condutividade

A resistência ao fluxo de gás oferecida pelos componentes do sistema, por exemplo a tubulação que conecta a bomba na câmara, possui uma considerável influencia na velocidade de bombeamento e na pressão final obtida. Define-se condutividade como o quociente:

$$C = \frac{Q}{|P_2 - P_1|} \Rightarrow \frac{1}{C} = \frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2}$$

que proporciona uma avaliação quantitativa da resistência oferecida pela tubulação ao fluxo gasoso. A impedância é dada por: $L=1/C$.

A partir disso, definimos a velocidade efetiva de bombeamento como:

$$S_{ef} = \frac{S.C}{S + C}$$

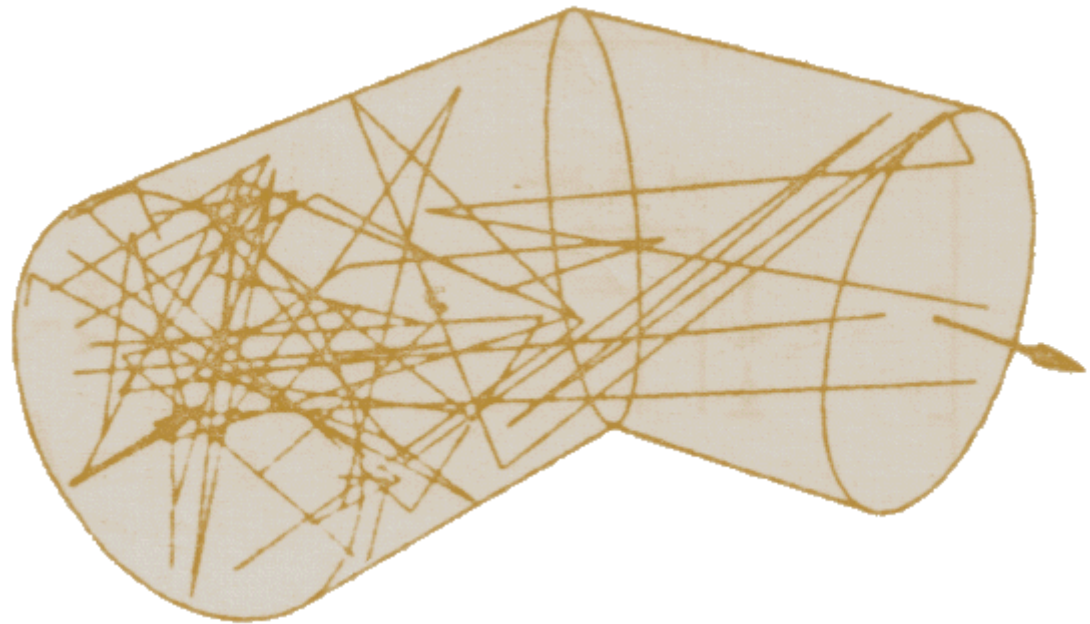
onde S é a velocidade nominal especificada para a bomba em uso.

A condutividade de uma dada tubulação esta intimamente conectada com sua **geometria** e com as **condições instantâneas de operação da bomba**. Via de regra é obtida via a compilação sistemática de dados experimentais ou mesmo via simulações.

De uma forma geral a **associação** de elementos fornece:

$$\frac{1}{C_{total}} = \sum_i \frac{1}{C_i} \quad \text{serie}$$

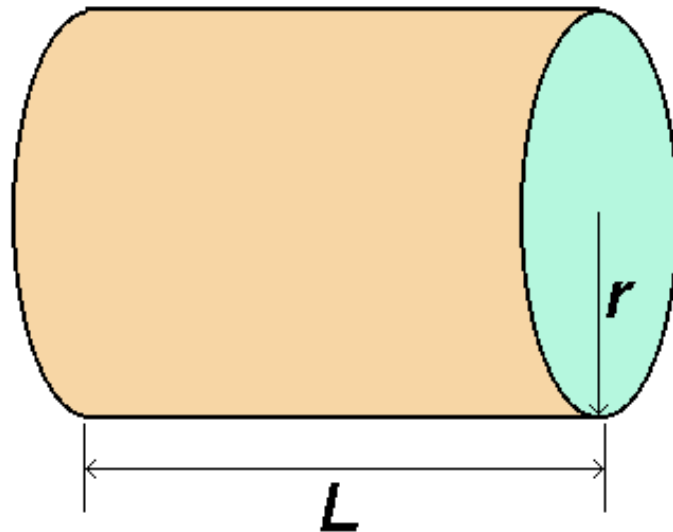
$$C_{total} = \sum_i C_i \quad \text{paralelo}$$



O regime de fluxo também é fundamental para a determinação de C.

Exemplo

Para um tubo cilíndrico, ou um orifício, podemos usar a estimativa:



L/r	k
$\cong 0$	1,00
1	0,73
2	0,57
4	0,40
8	0,25

$$C = k \cdot \left[3,64 \left(\pi \cdot r^2 \right) \cdot \sqrt{\frac{T}{m}} \right]$$

Evolução da Pressão Durante o Bombeamento

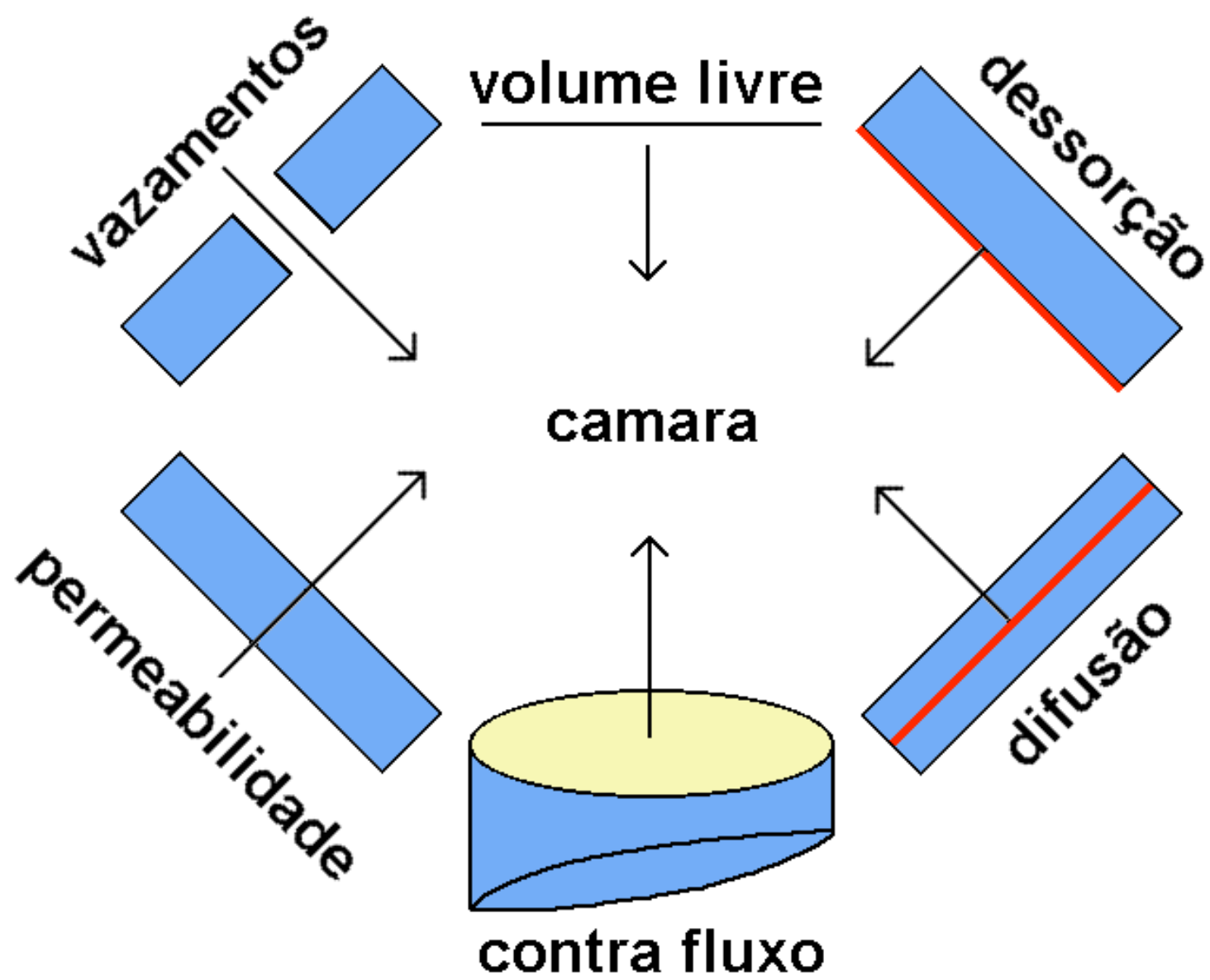
A equação que descreve a dependência temporal da pressão em um sistema sob bombeamento (fluxo viscoso) é conhecida como equação de Gaede, sendo derivada diretamente da definição de throughput, ou seja:

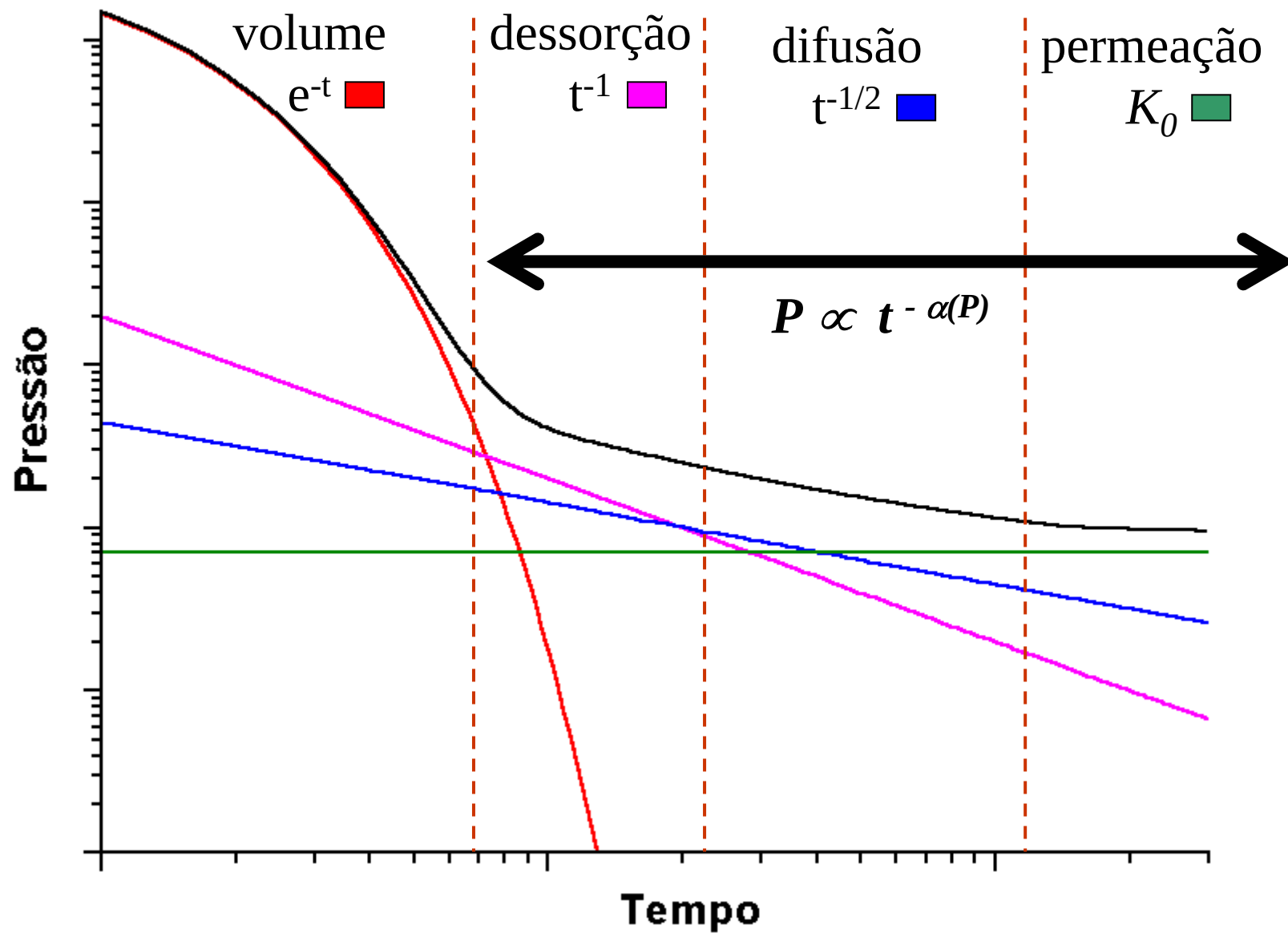
$$Q_b = P.S + V \frac{dP}{dt} = Q_f \quad \Rightarrow \quad P.S - Q_f = -V \frac{dP}{dt}$$

Para $Q_f = \text{constante}$ obtemos:

$$P = P_{\text{inicial}} \cdot e^{-S.t/V} + \frac{Q_f}{S}$$

Este resultado corresponde ao bombeamento do gás livre dentro da câmara, sendo conhecido como **bombeamento de volume**. Há outros comportamentos, seqüenciais, da pressão em função do tempo, de acordo com o termo de fontes considerado (Q_f) e a faixa de pressão.





$$P = P_0 \cdot e^{-S \cdot t / V} + \frac{Q_{des}}{S} t^{-1} + \frac{Q_{dif}}{S} t^{-1/2} + K_0$$

Q_{des} é via de regra escrito como:

$$Q_{des} = \sum_j q_j \cdot A_j$$

onde A_j é a área do material e q_j sua respectiva taxa de degasing.

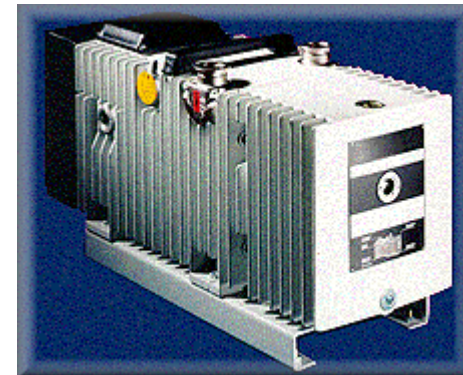
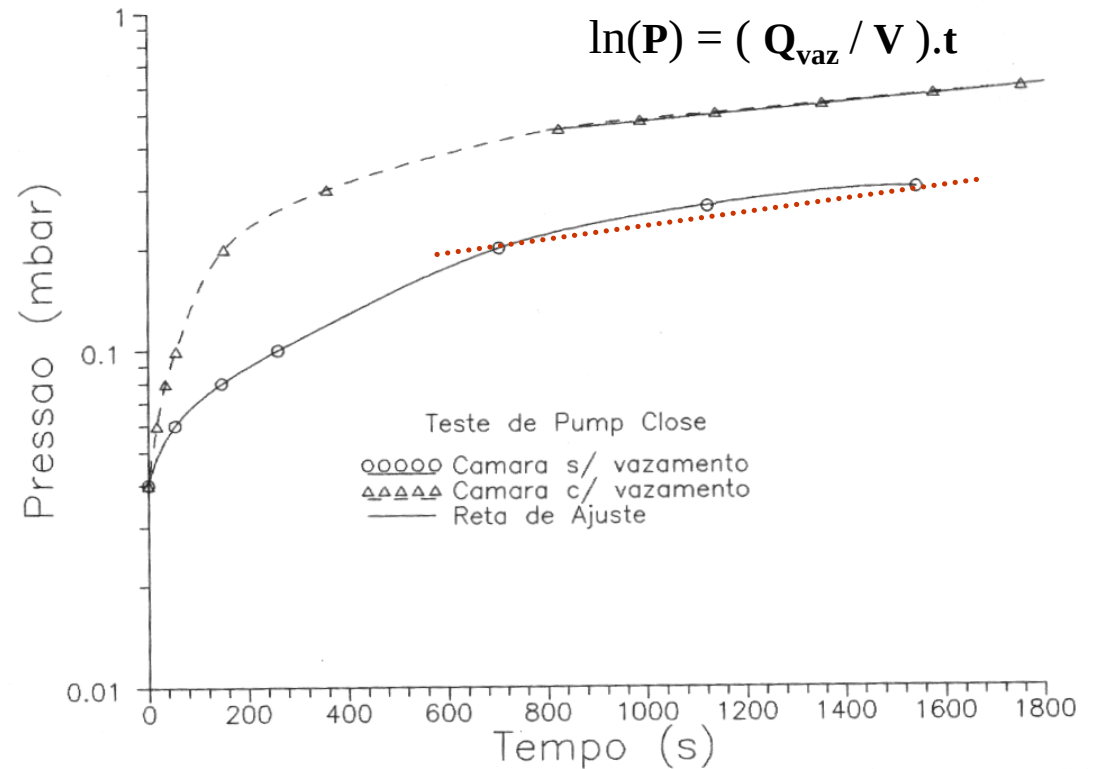
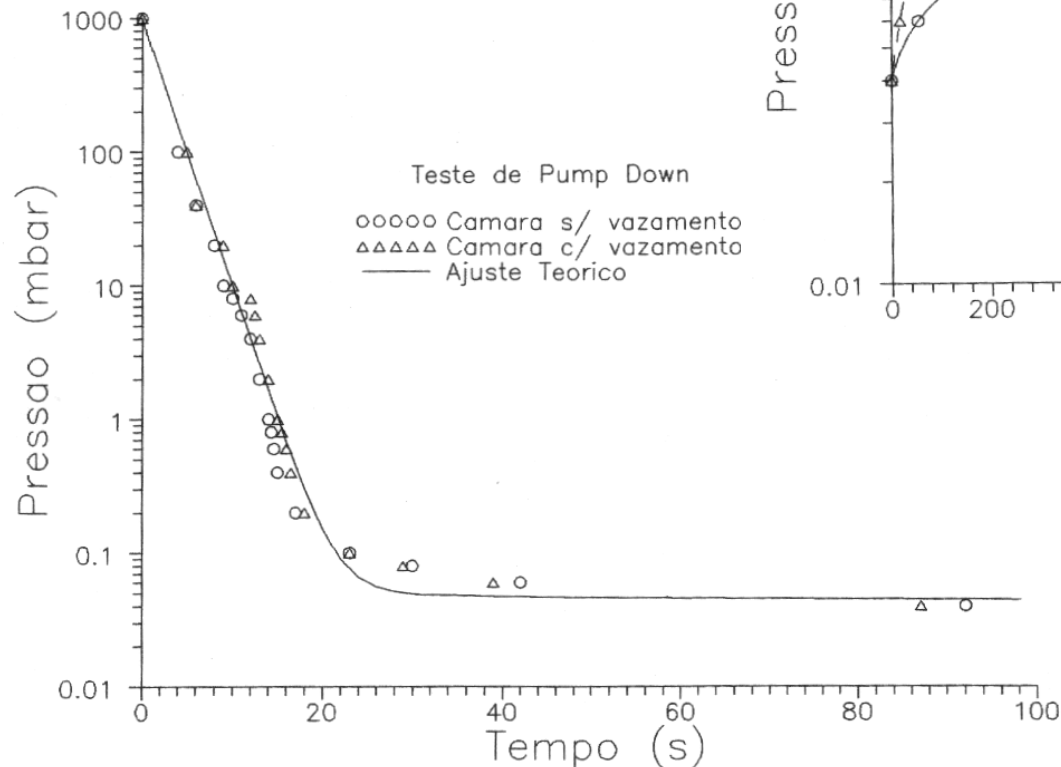
Os demais termos, Q_{dif} e K_0 assumem formas bem mais complexas, dependendo sempre dos materiais envolvidos.

<i>Metals and glasses</i>	<i>Outgassing rate (mbar l s⁻¹ cm⁻² × 10⁻¹⁰)</i>	
	<i>1 hour at vacuum</i>	<i>4 hours at vacuum</i>
Aluminium	80	7
Copper (mechanically polished)	47	7
OFHC copper (raw)	266	20
OFHC copper (mechanically polished)	27	3
Mild steel (slightly rusty)	58 520	199
Mild steel, Cr plate (polished)	133	13
Mild steel, Ni plate (polished)	40	4
Mild steel, Al spray coating	798	133
Molybdenum	67	5
Stainless steel (unpolished)	266	20
Stainless steel (electropolished)	66	5
Molybdenum glass	93	5
Pyrex (Corning 7740) (raw)	99	8
Pyrex (Corning 7740) (1 month at atmosphere)	16	3

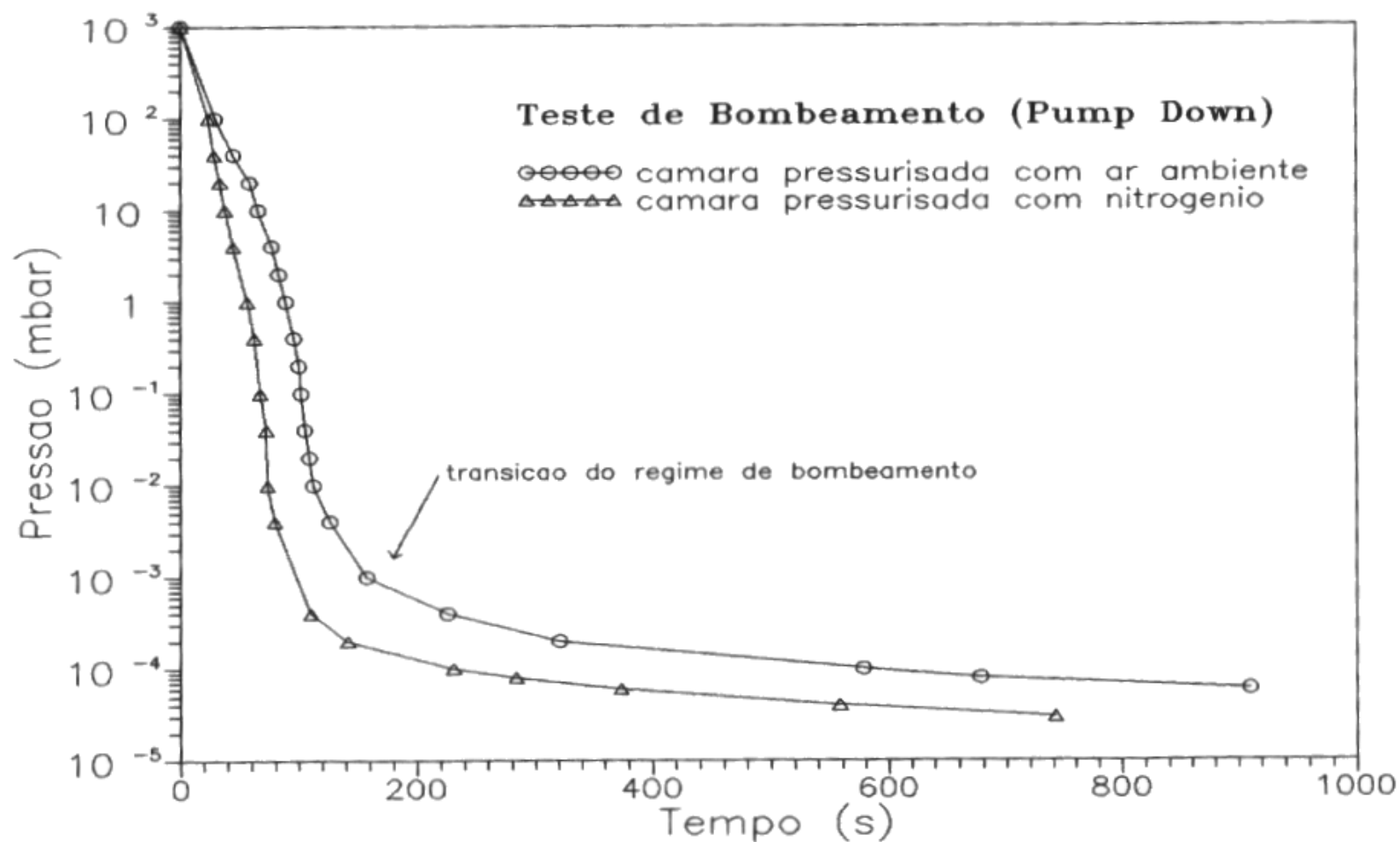
<i>Polymers, ceramics elastomers, etc.</i>	<i>Outgassing rate (mbar l s⁻¹ cm⁻² × 10⁻⁸)</i>	
	<i>1 hour at vacuum</i>	<i>4 hours at vacuum</i>
Celluloid	1 330	665
Kel F	5	3
Mylar (Melinex)	333	66
Nylon	1 596	798
Nitrile	—	63
Plexiglass (Perspex)	400	266
Polyethylene	33	16
Polyurethane	67	33
PTFE (Teflon, Fluon)	40	20
PVC	133	3
Fluoroelastomer (Viton* A)	152	15
Porcelain (glazed)	86	40
Steatite	12	4

Alguns Testes e Exemplos

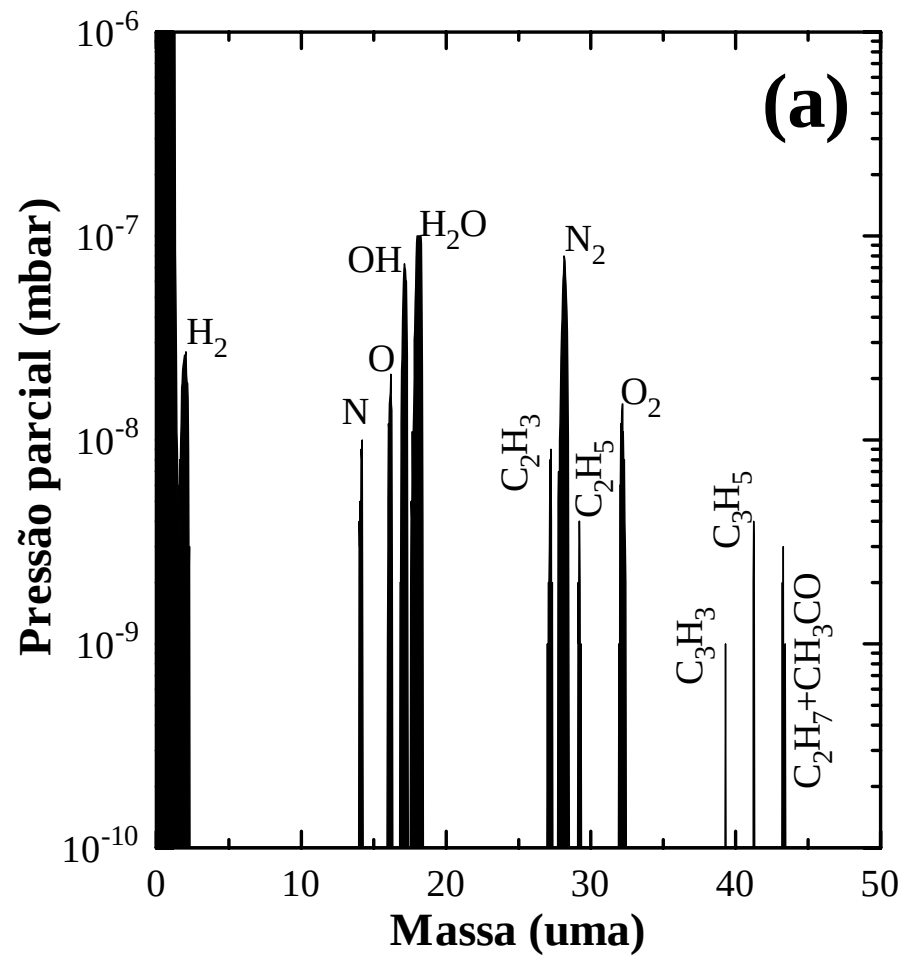
- câmara em ANSI 304 NL com $V \approx 2.1$ litros
- bomba mecânica



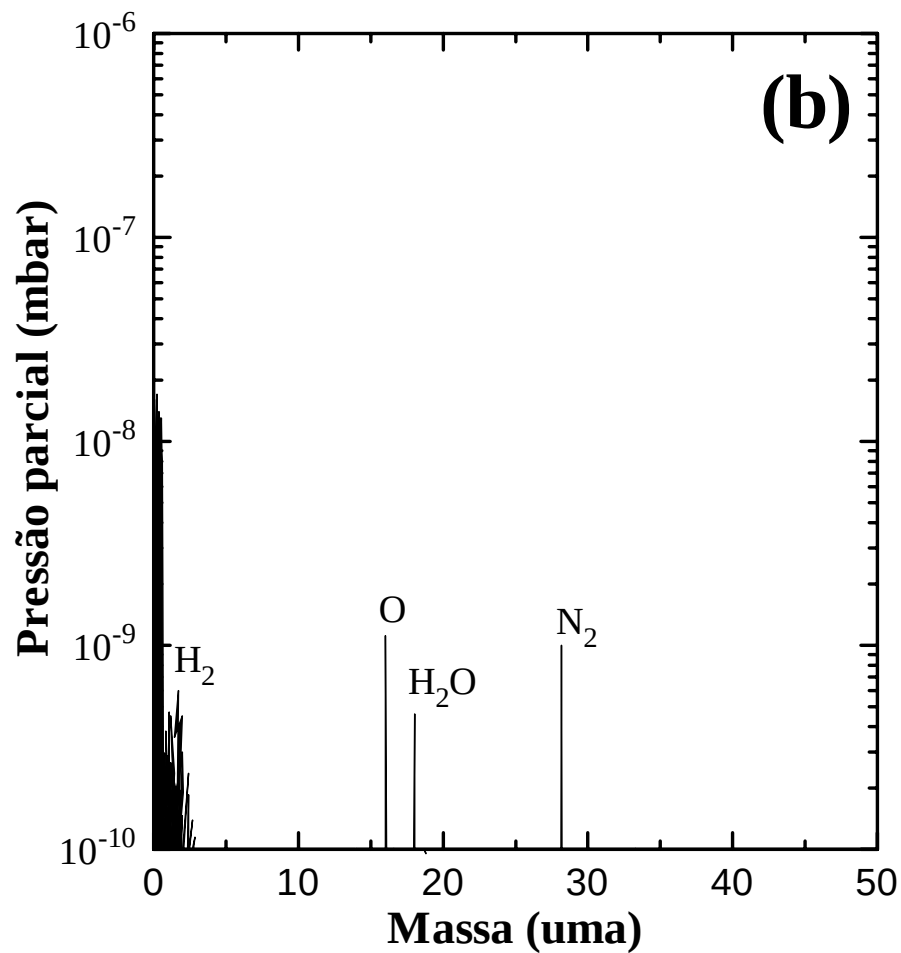
- câmara em ANSI 304 NL com $V \approx 28.4$ litros
- sistema de bombeamento turbo-molecular TPH-330 + bomba mecânica.



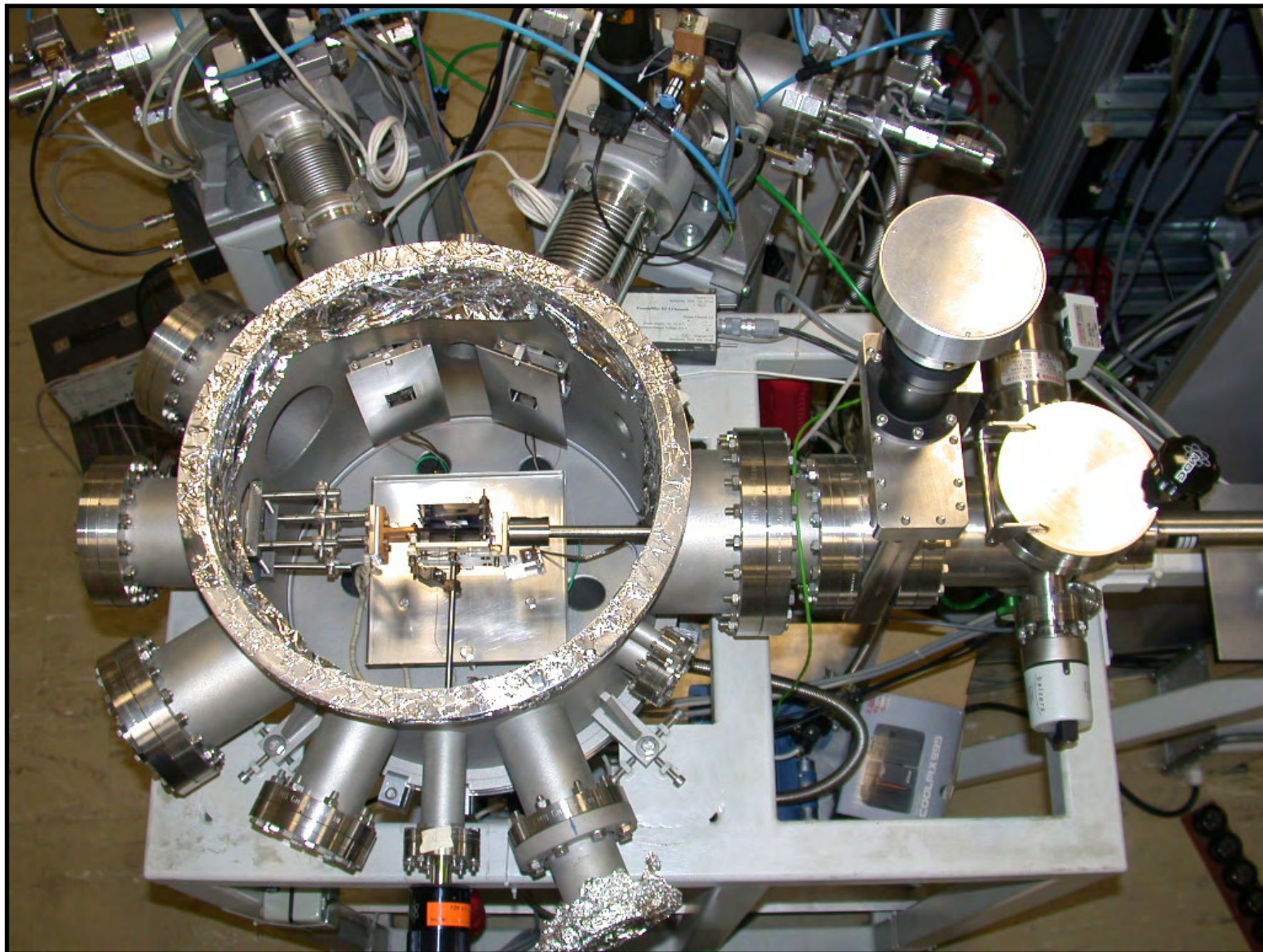
Analises RGA do exemplo anterior:

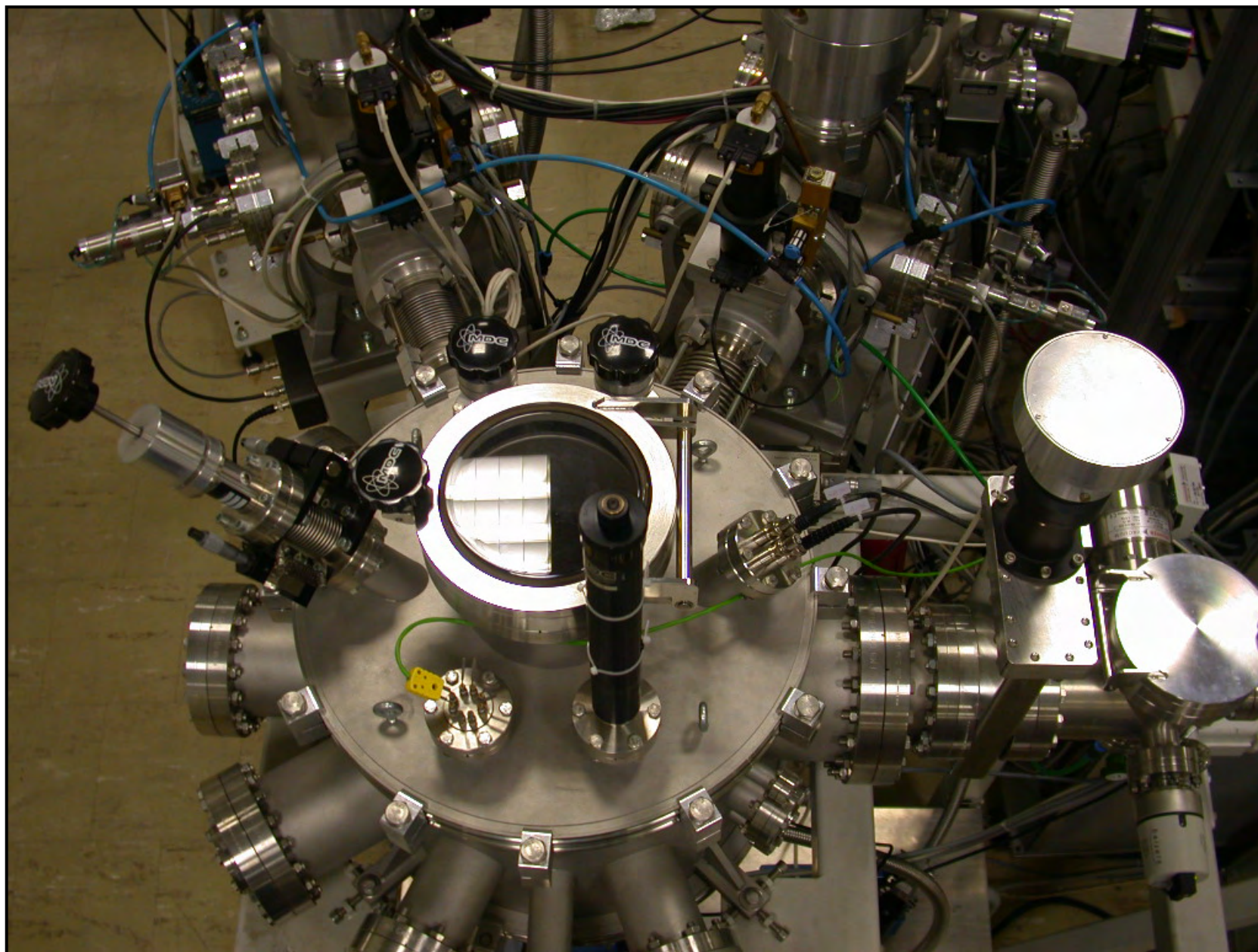


sem trap



com trap LN_2





Referencias

- A user's guide to vacuum technology, John F. O'Halon, ed. John Willey & Sons (1980).
- Modern vacuum practice, ed. Edwards Vacuum.
- The generation of rough and medium vacuum, ed. Pfeiffer Vacuum.
- Working with turbo molecular pumps, ed. Pfeiffer Vacuum.
- Vacuum technology, ed. Leybold Vacuum