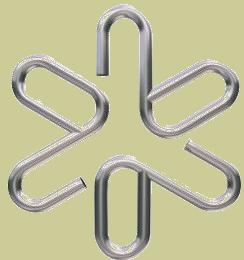


Ciência e Tecnologia do Vácuo



2024



Uma visão geral da disciplina

Prof. Nilberto H. Medina

Resumo

- Resumo Histórico
- Conceitos gerais
- Sistemas de Vácuo
- Informações gerais

Resumo Histórico

- O que é VÁCUO?
 - no dicionário: *um lugar onde não contém nada; espaço imaginário ou real não ocupado por coisa alguma*
 - no cotidiano: “presença” do nada.

É possível criar um espaço de ausência total de matéria? Existe o vazio absoluto?

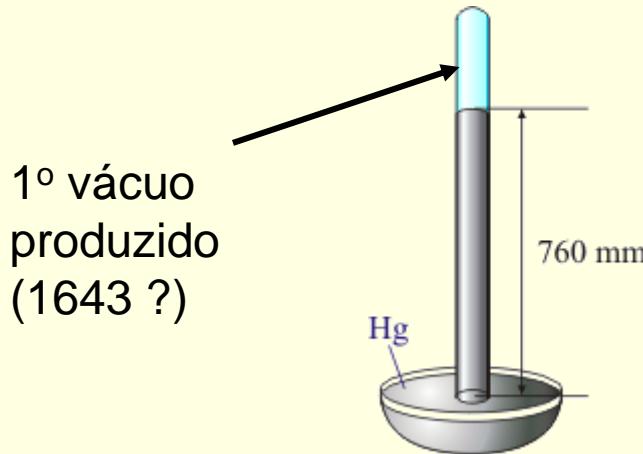
Resp.: Não, aparentemente.

Definição dada pela American Vacuum Society:

É um dado espaço preenchido com gás a uma pressão abaixo da atmosférica ($< 2,5 \times 10^{19}$ moléculas/cm³).

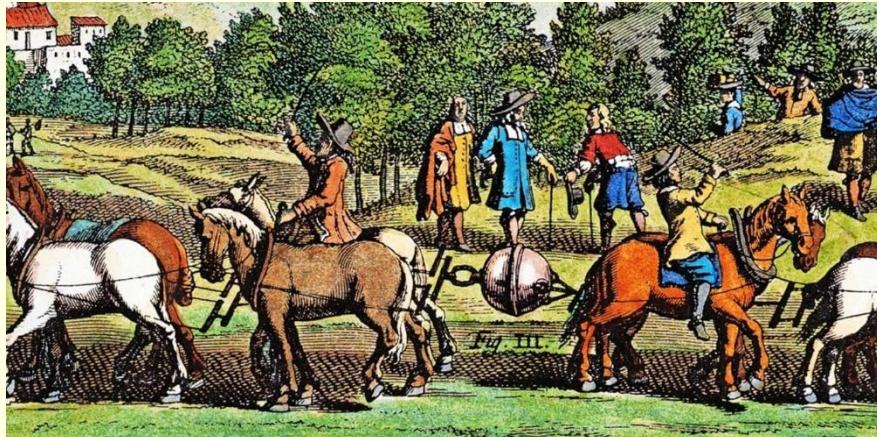
Resumo Histórico

- Na Grécia antiga, filósofos debatiam sobre a existência do vazio absoluto.
- “A natureza tem horror ao vácuo...”
Aristóteles (384 – 322 a.C.)
- Século XVII – Galileo Galilei, Torricelli e o barômetro de tubo fechado.



Resumo Histórico

- Século XVII – Primeira notícia da medida de um sistema em baixa pressão (~ 6 mmHg) – Boyle
- Vácuo torna-se interesse do grande público. Desenvolvimento para o entretenimento.



Primeiros modelos de Otto von Guericke - 1640

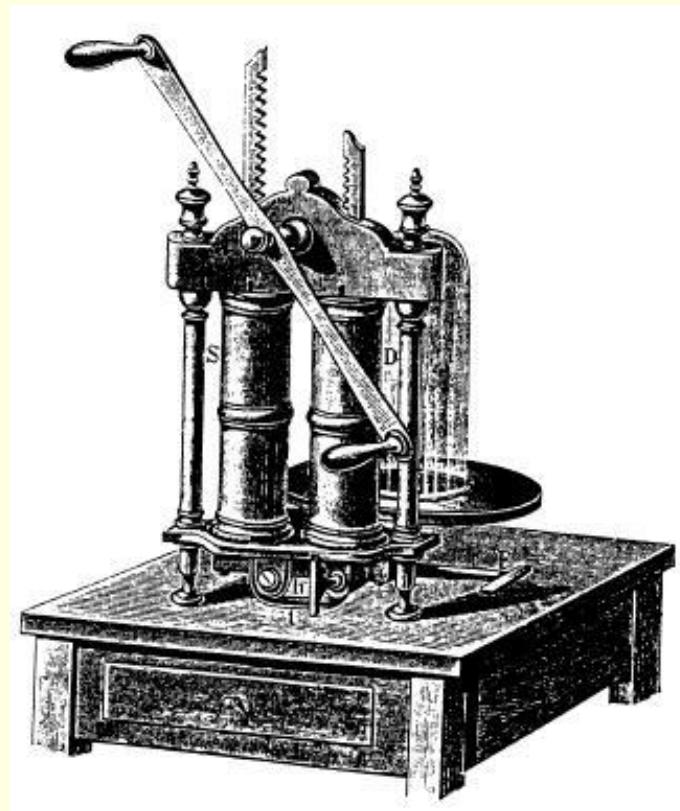




Joseph Wright's painting (1768) of a popular after-dinner demonstration of the effects of vacuum on a small animal. The effects of the lack of atmosphere on a cockatoo is being observed and air was then admitted just in time (in most cases) to save the creature's life.

Resumo Histórico

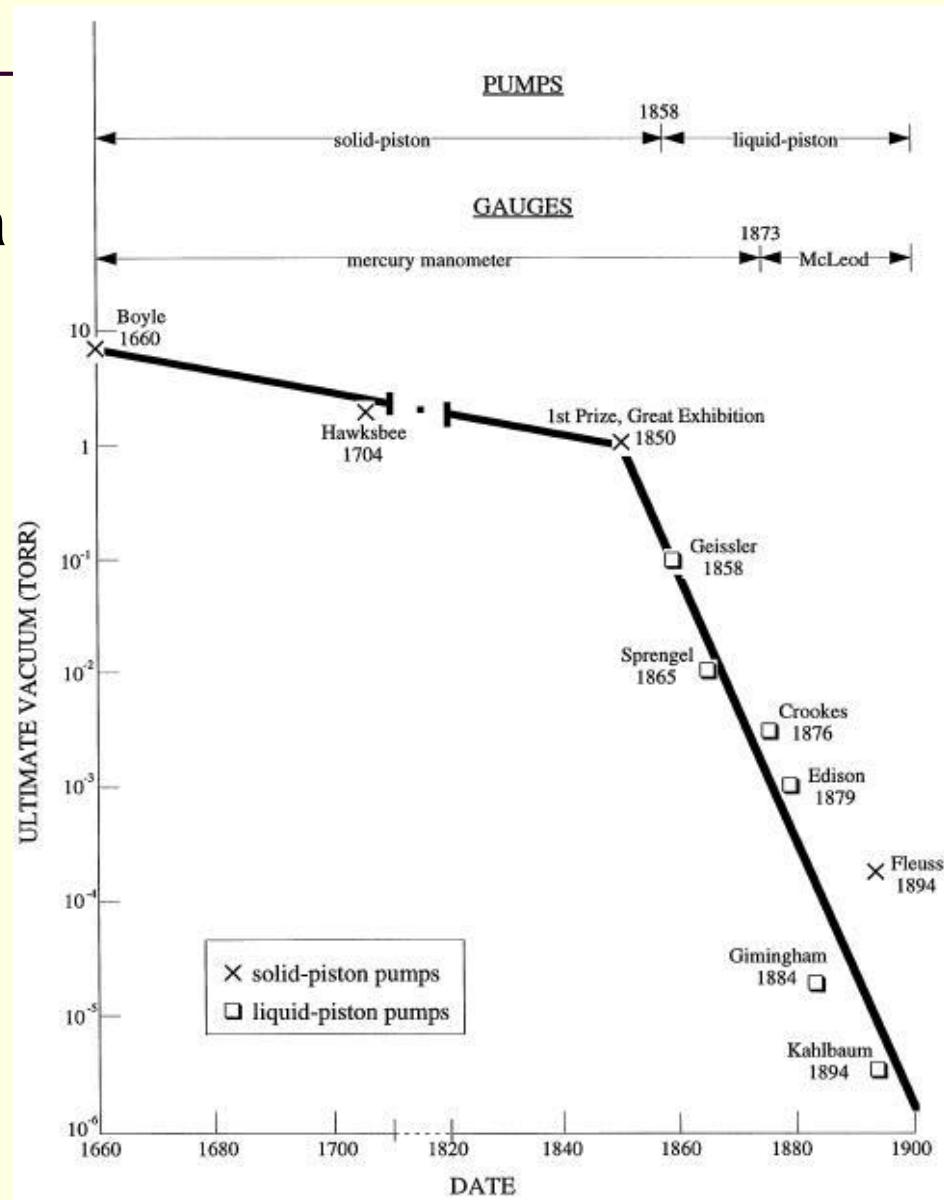
- Maiores esforços concentravam-se no desenvolvimento das bombas de vácuo
- Bombas de pistão duplo começam a ser comercializados (1850).
- Emprego da tecnologia de vácuo na indústria



Bomba de 2 pistões
1850

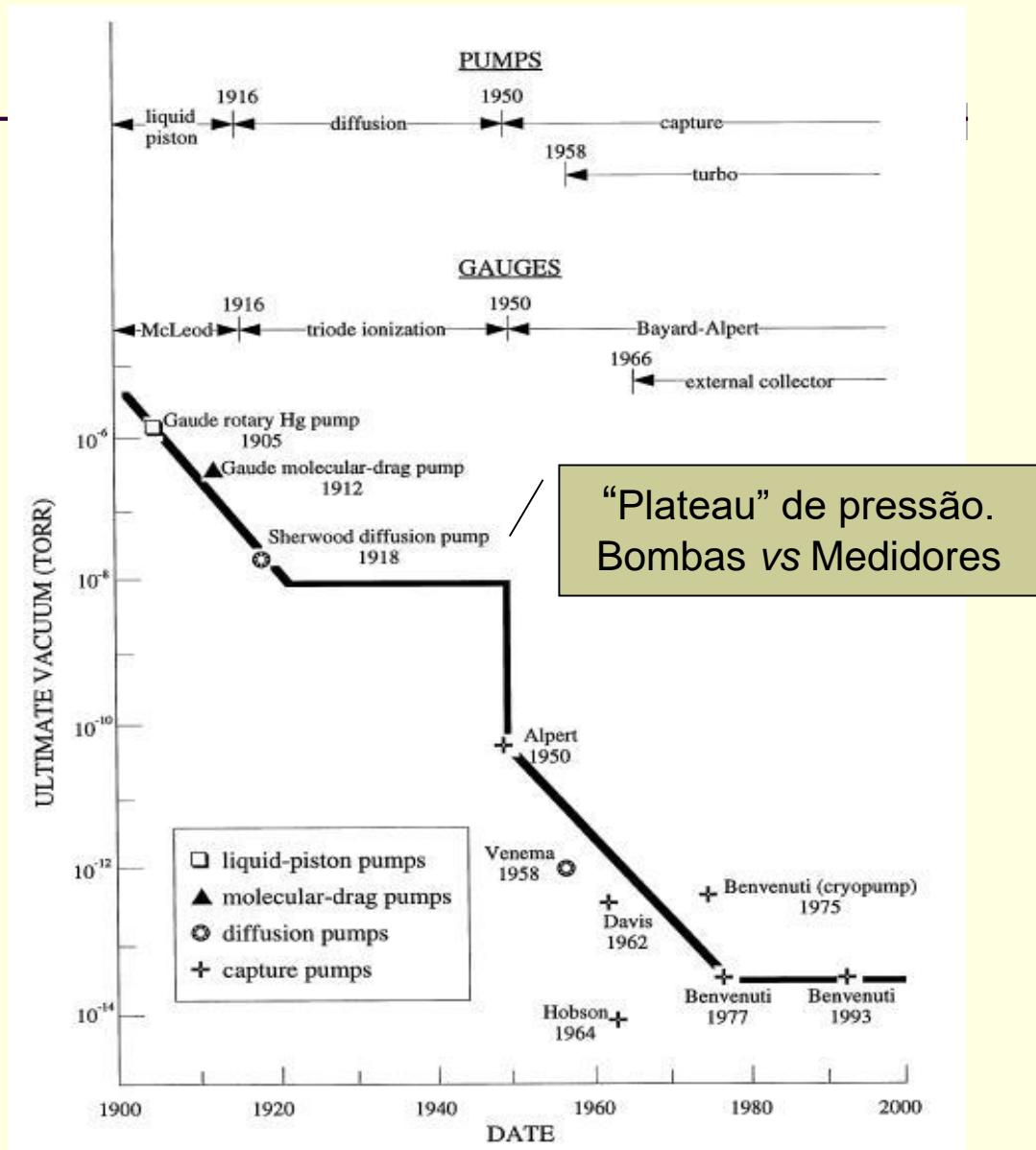
Resumo Histórico

■ Panorama da evolução da tecnologia de vácuo até 1900



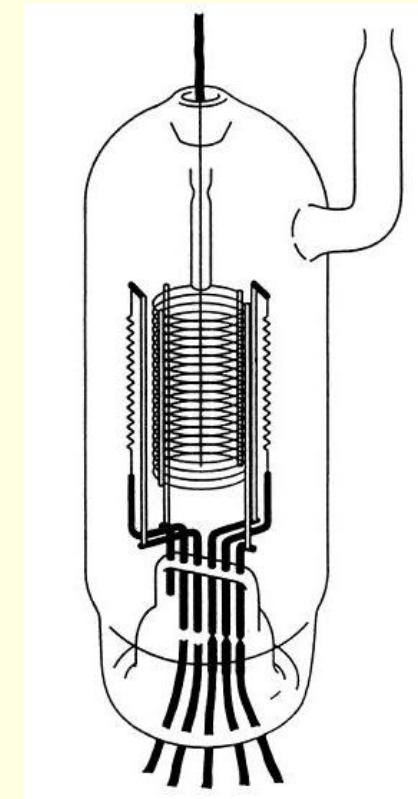
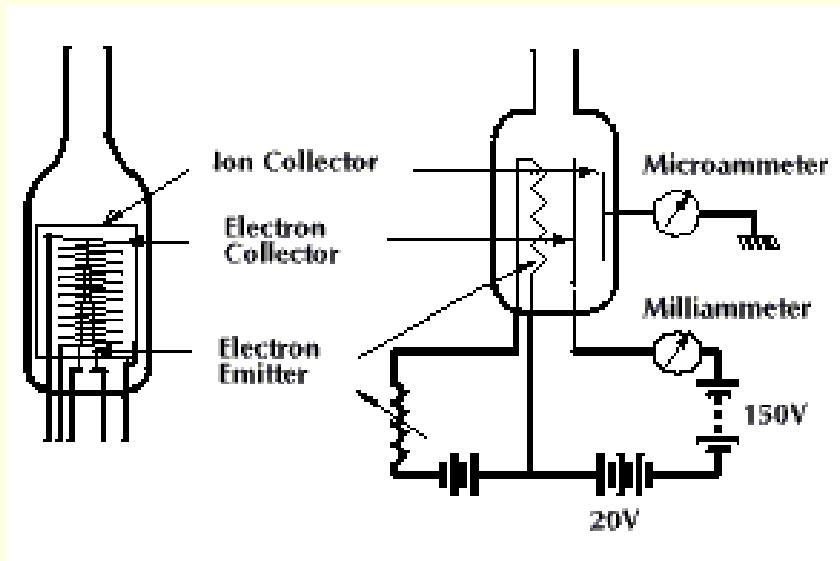
Resumo Histórico

- Evolução da tecnologia de vácuo 1900-2000
- Desenvolvimento constante
- Era dos grandes aceleradores



Resumo Histórico

- 1950 – Tríodo de ionização e o manômetro Bayard-Alpert



Limitação inferior na medida de pressão (10^{-8} Torr)

Conceitos Gerais

- Pressão: **força exercida por unidade de área.**
Unidades de medidas de pressão.

Unidades: atm, mmHg, torr, bar (dina/cm²) e Pa (N/m²)

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg}$$

$$1 \text{ mmHg} = 1 \text{ Torr}$$

$$1 \text{ bar (dina/cm}^2\text{)} = 100000 \text{ Pa}$$

Pré-vácuo: $> 10^{-3}$ Torr

Alto-vácuo: até 10^{-7} Torr

Ultra-alto-vácuo: $< 10^{-8}$ Torr

Livre caminho médio

$$\lambda = \frac{5 \times 10^{-3} \text{ cm}}{P(\text{Torr})}$$

Pré-vácuo: $\approx 10^{-3}$ Torr \rightarrow 5 cm

Alto-vácuo: $\approx 10^{-5}$ Torr \rightarrow 5 m

Ultra-alto-vácuo: $\approx 10^{-8}$ Torr \rightarrow 5 km

Unidades

Tabela de conversão

	bar	mbar	Pa (N/m ²)	atm	torr
bar	1	10^3	10^5	0,986923	750,062
mbar	10^{-3}	1	10^2	$0,9869 \times 10^{-3}$	0,750062
Pa	10^{-5}	10^{-2}	1		$0,75 \times 10^{-2}$
atm	1,0132	$1,0132 \times 10^3$	$1,0132 \times 10^5$	1	760
torr	$1,3332 \times 10^{-3}$	1,33322	$1,33322 \times 10^2$	$1,3158 \times 10^{-3}$	1

Conceitos Gerais

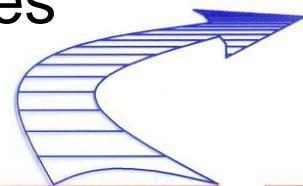
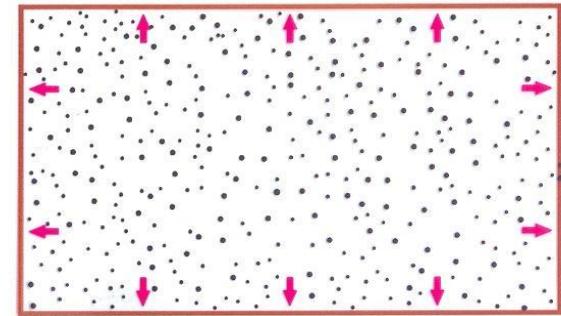
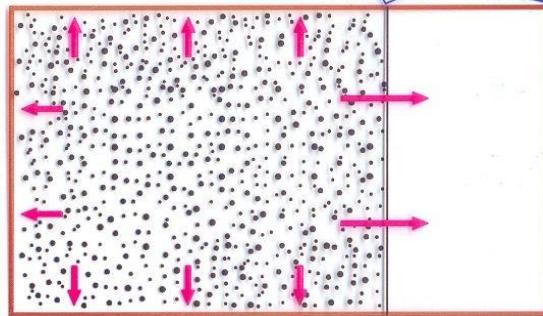
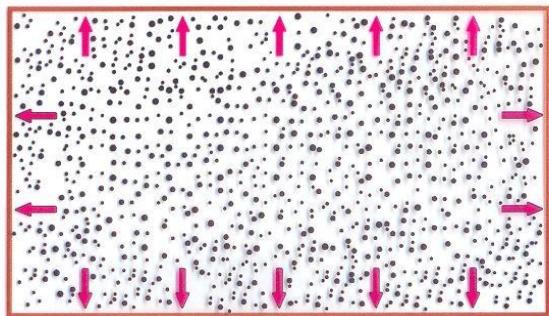
■ Alguns dados à temperatura ambiente

Pressão (Torr)	760	1,0E-03	1,0E-08	1,0E-10	1,0E-12	1,0E-14	1,0E-16
Caminho livre médio	7 μm	5 cm	5 km	500 km	5×10^5 km	5×10^6 km	5×10^8 km
Núm. de moléculas colidindo em cm^2/s	$3,0 \times 10^{23}$	$3,5 \times 10^{17}$	$3,5 \times 10^{12}$	$3,5 \times 10^{10}$	$3,5 \times 10^8$	$3,5 \times 10^6$	$3,5 \times 10^4$

$$\lambda = \frac{5 \times 10^{-3} \text{ cm}}{P(\text{Torr})}$$

Regimes de escoamento de gases

Regime Viscoso



Regimes de Escoamento de Gases

Regime Viscoso:

Massa de gás, colisões entre moléculas, depende da viscosidade do gás,
 λ pequeno, $\lambda \ll D$

Velocidades altas – fluxo turbulento

Velocidades baixas – fluxo laminar

$D.P \geq 1$ (cm Torr) (fluxo viscoso)

Regime Molecular:

Colisões das moléculas com as paredes do sistema,
 λ grande, $\lambda \gg D$

$D.P \leq 10^{-2}$ (cm Torr) (fluxo molecular)

Conceitos Gerais

■ Grandes aceleradores

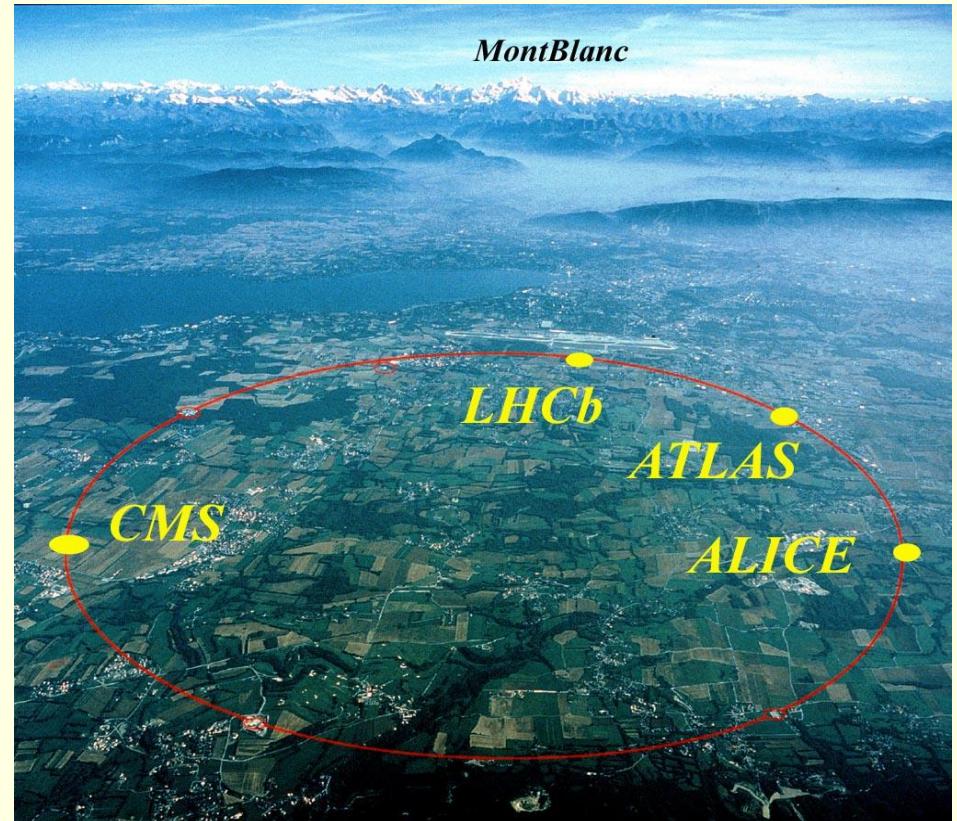
Ultra alto vácuo

CERN

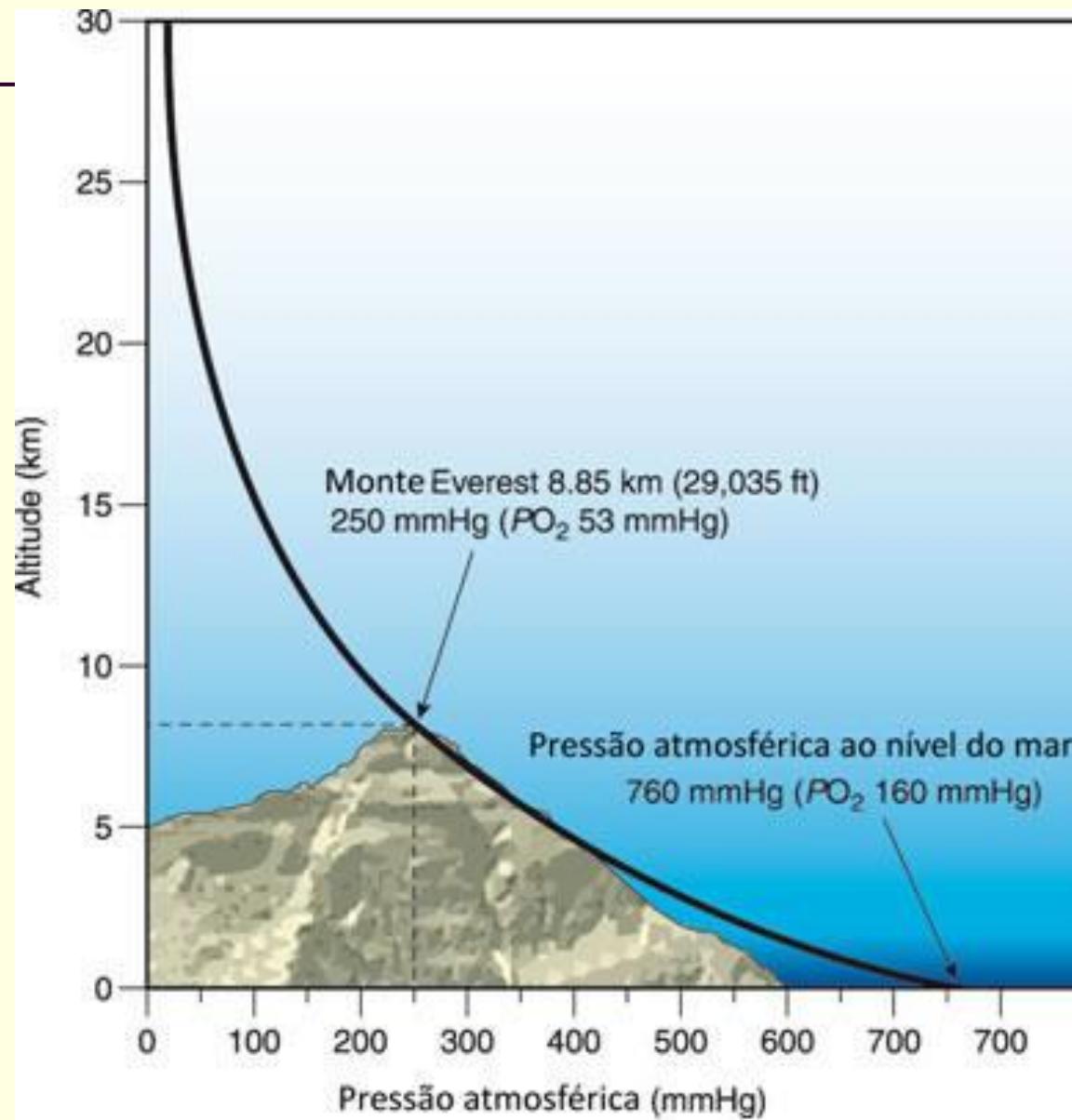
RHIC



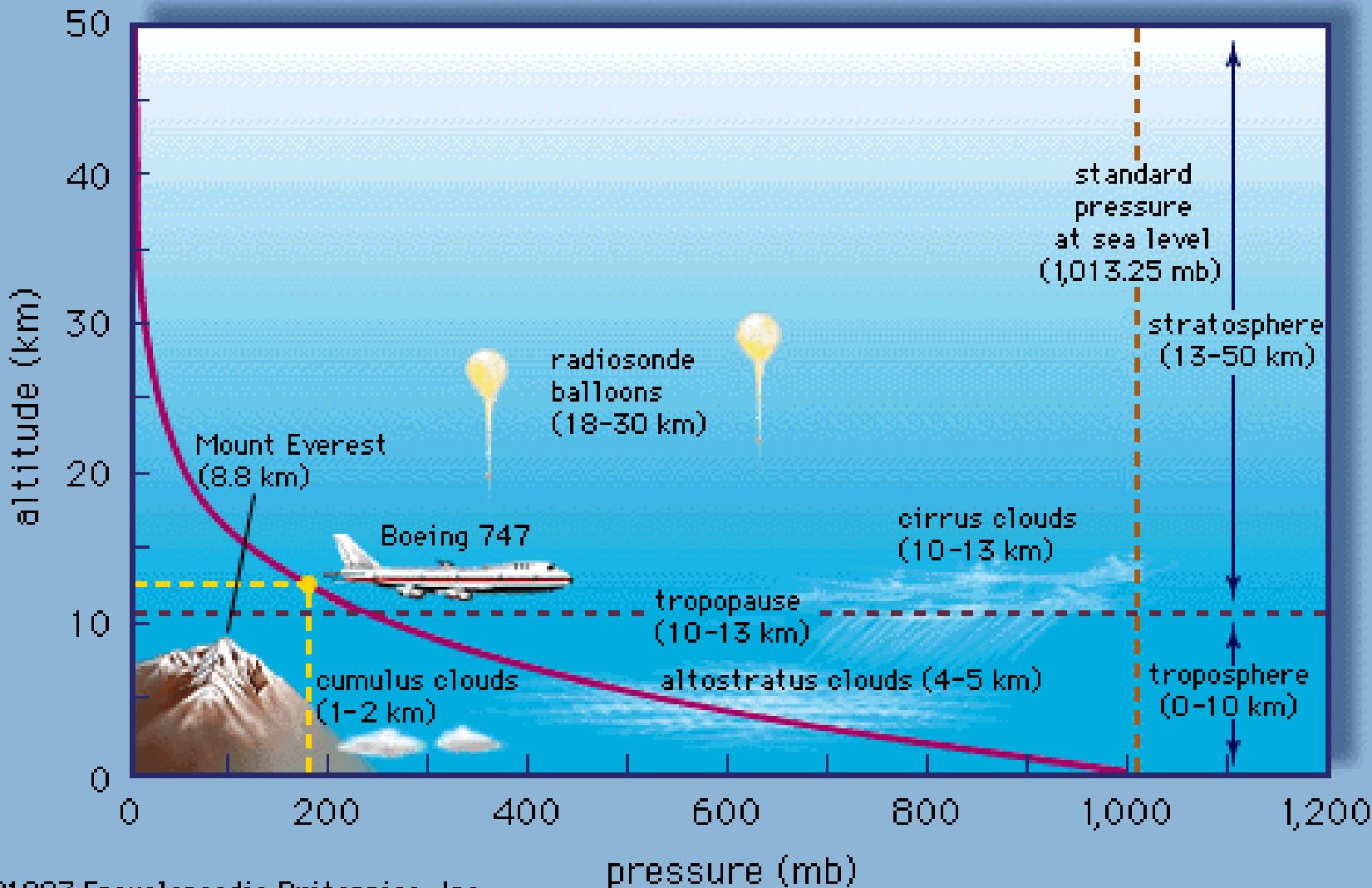
MontBlanc



Conceitos Gerais

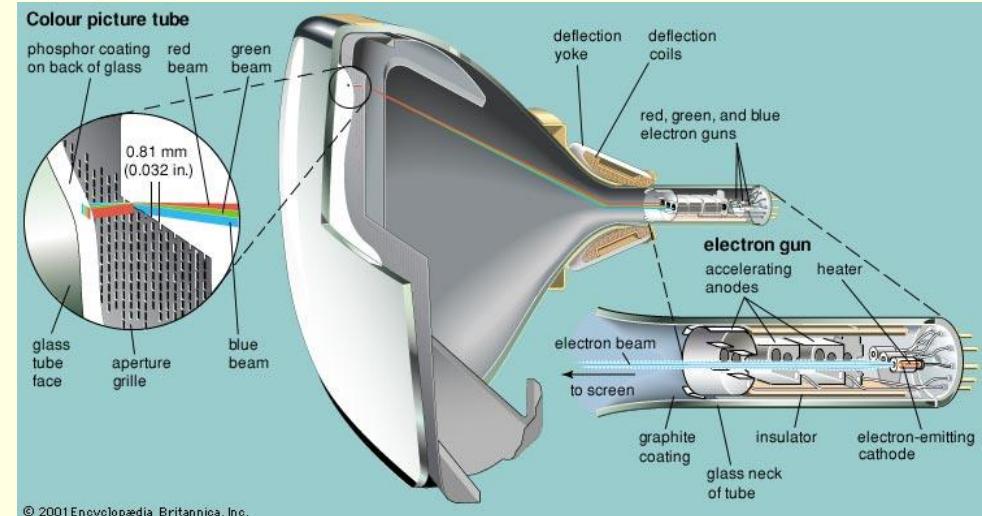


Conceitos Gerais



Aplicações

Physical Situation	Objective	Applications
Low pressure	Achieve pressure difference	Holding, Lifting, Transport, Forming
Low molecular density	Remove active atmospheric constituents Decrease energy transfer	Lamps, Packaging, Leak detection Thermal insulation, Electrical insulation
Large mean free path	Avoid collisions	Electron tubes, cathode ray tubes, television tubes, photomultipliers, Accelerators, Storage rings, ...



Aplicações

Ciência Básica
Física Aplicada

Metalurgia a vácuo
Microeletrônica
Aeronáutica

Embalagens
Fontes de íons
Microscópios eletrônicos

Física Nuclear
Estudos de Plasma

Filmes finos
Cristalografia
Simulação Espacial

Espectrômetro de massa
Aceleradores de partículas
Secagem de plásticos

Física Atômica
Nanotecnologia

Criogenia
Têmpera de metais
Cinescópios

Feixes moleculares
Difração de elétrons
Sputtering de metais

Outros Exemplos:

Produção de lâmpadas e válvulas eletrônicas

Desgaseificação de metais fundidos e líquidos

Soldas por bombardeamento eletrônico

Estudo de superfícies e de novos materiais

Secagem de alimentos e lyophilização

Ciência e Tecnologia do Vácuo

4300323

Professor:

Nilberto Heder Medina (Teoria e Laboratório)

Laboratório Aberto de Física Nuclear, sala 206

Sala de Aula (teoria): 2003, Ala II

Laboratório: sala 1008 Ala II – Andar térreo

tel: 3091-6763

medina@if.usp.br

Laboratório Didático:

<http://portal.if.usp.br/tecvac> (apostilas)

Sociedade Brasileira de Vácuo:

<http://www.sbvacuo.org.br/>

edisciplinas.usp.br

<https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=122032> (material didático)

Programa da disciplina

Introdução à Tecnologia do Vácuo
Teoria Cinética dos Gases
Bombas e Medidores
Escoamento de gases (regimes)
Condutâncias
Variações da pressão
Fontes de gases de um sistema
Vazamentos: Modelos e Detecção
Armadilhas
Permeação e desgaseificação
Evaporação
Cálculos de Sistemas de Vácuo e Aplicações

Sistemas de Vácuo

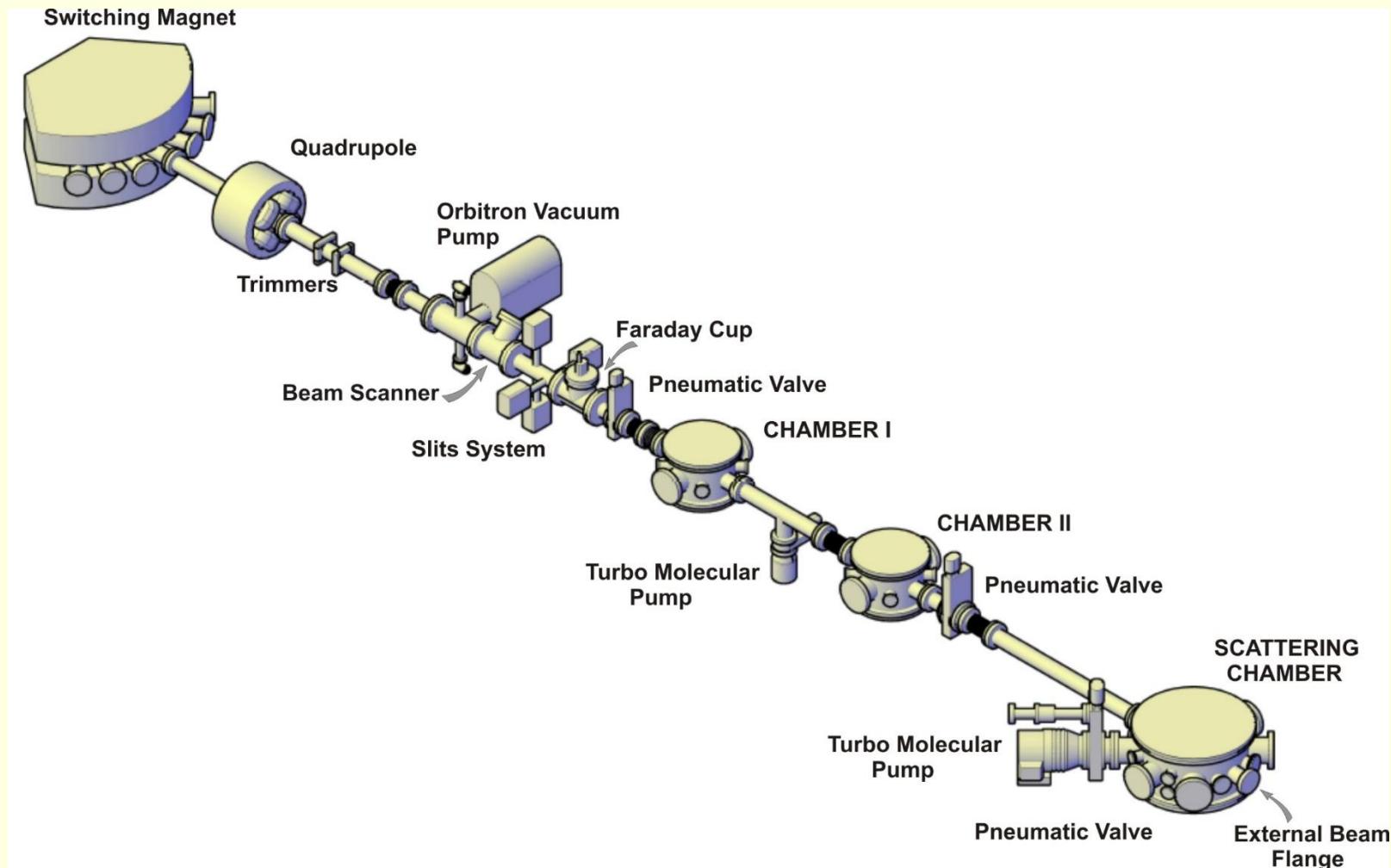
Exemplos



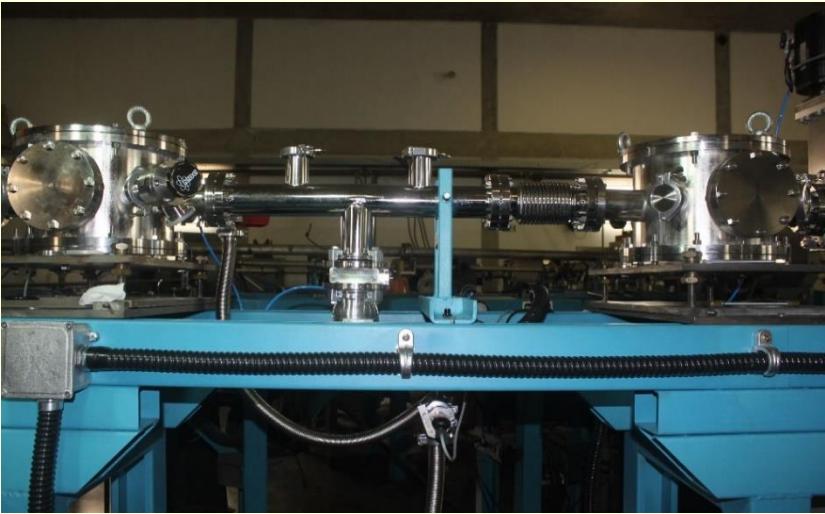
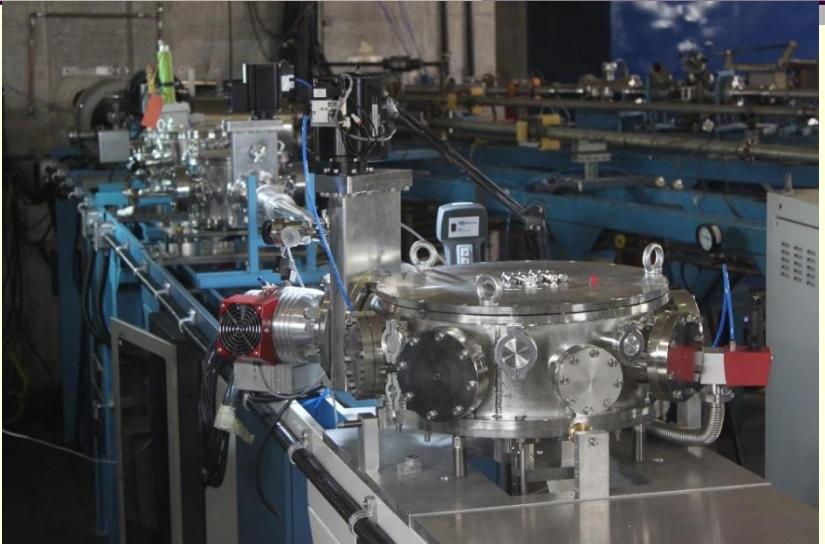
Sala Experimental do acelerador Pelletron



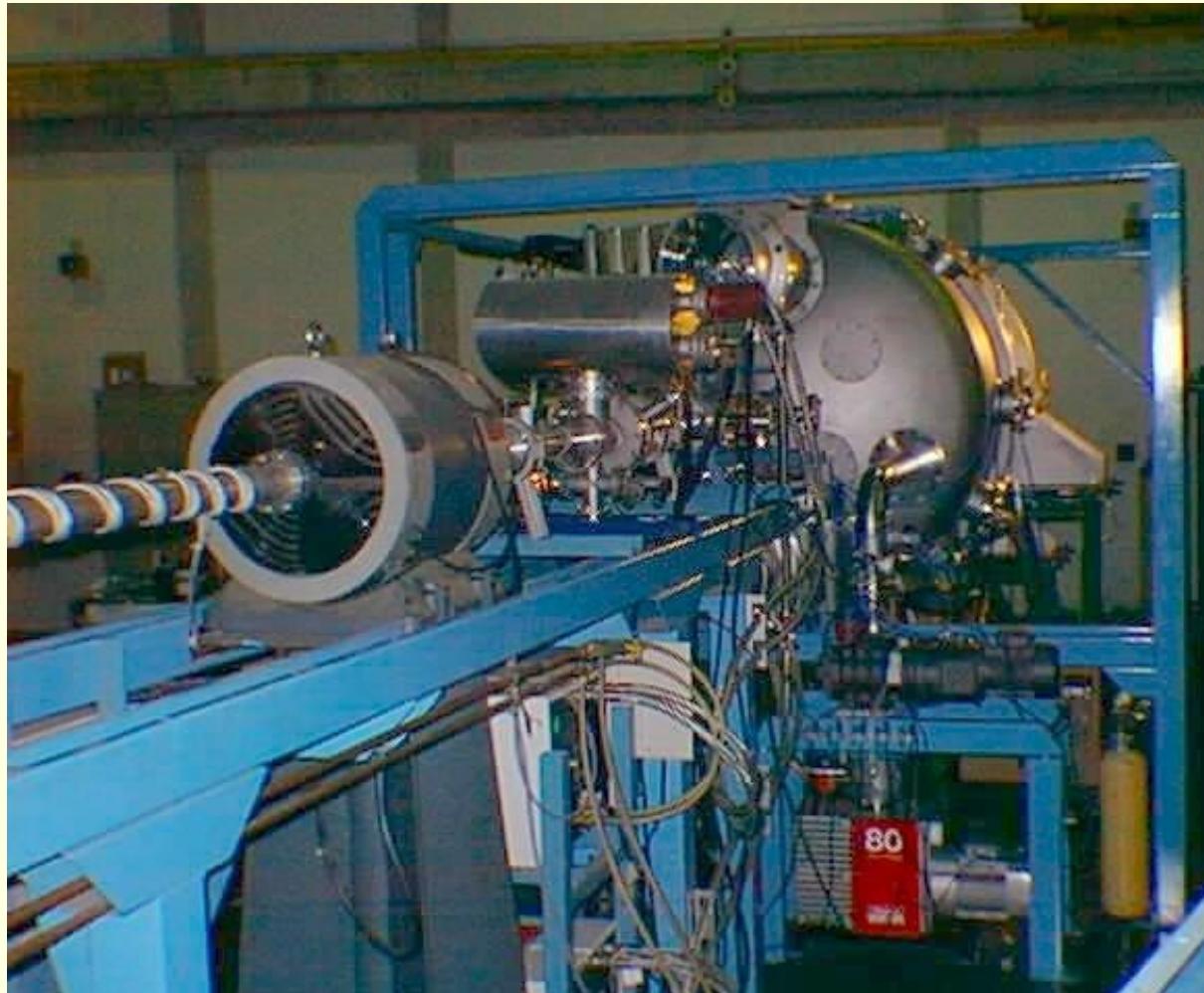
Canalização 0° do Acelerador Pelletron



Canalização 0° do Acelerador Pelletron

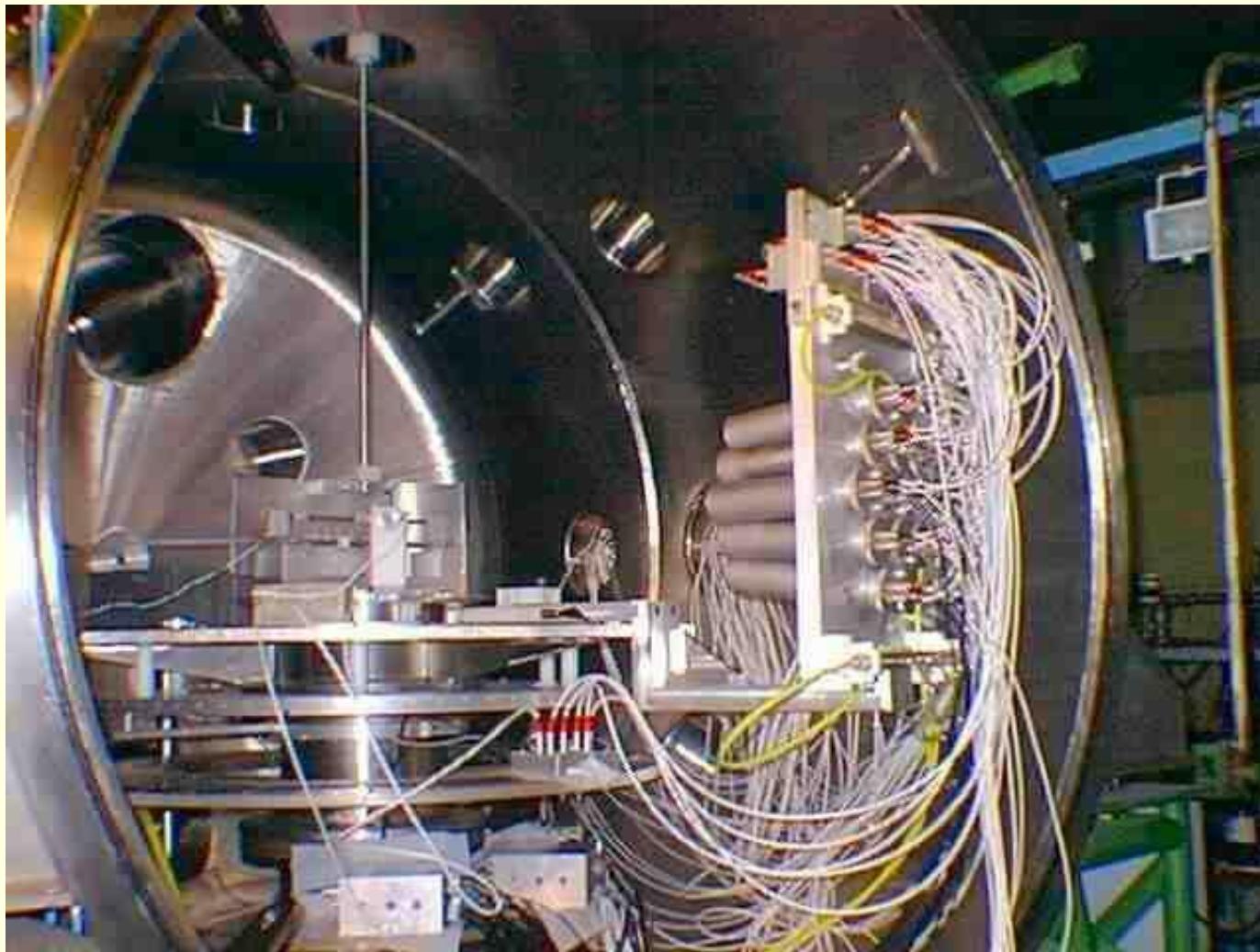


Canalização 15º do Acelerador Pelletron

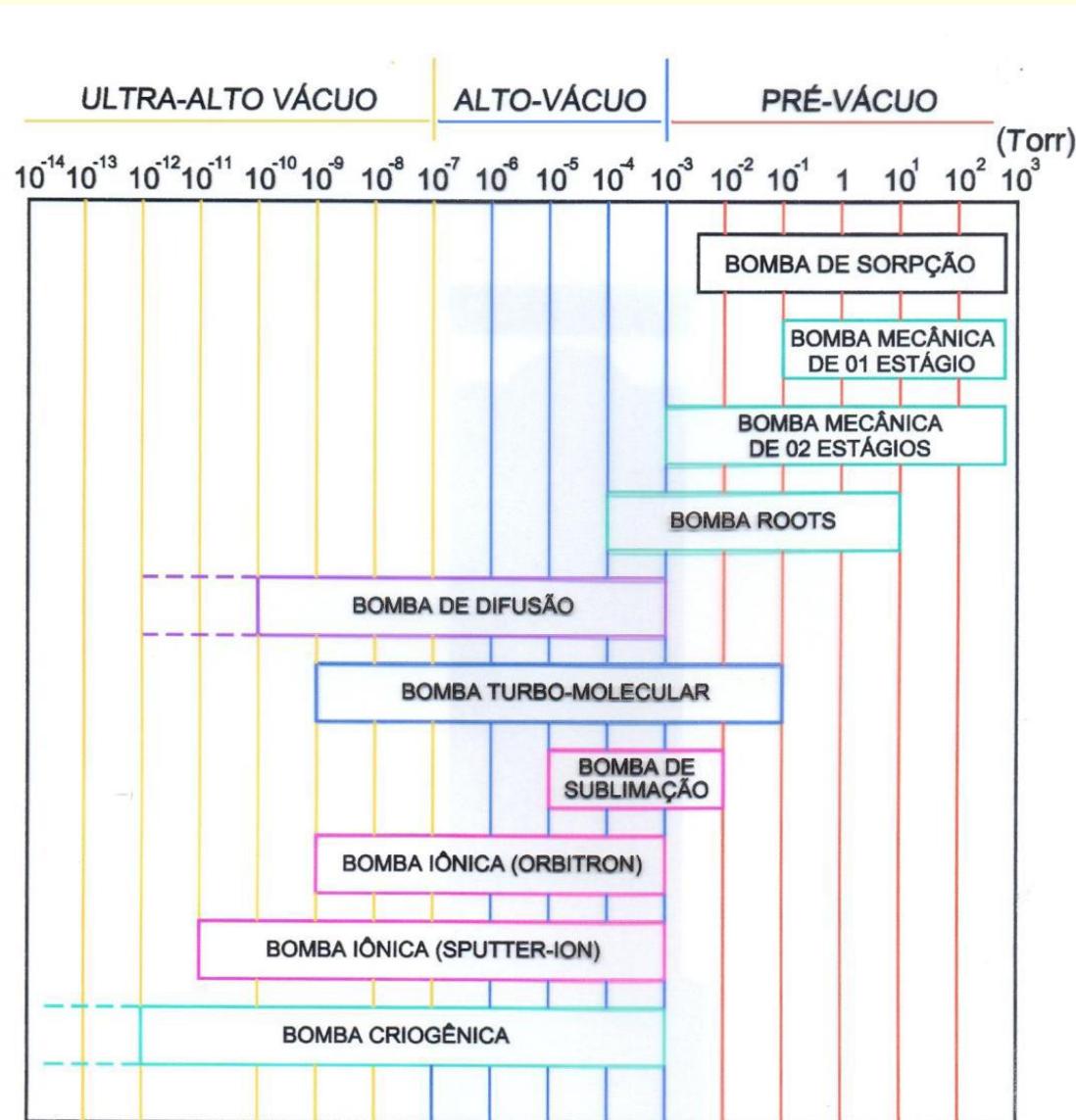


Atualmente está sendo montada no novo acelerador LINAC

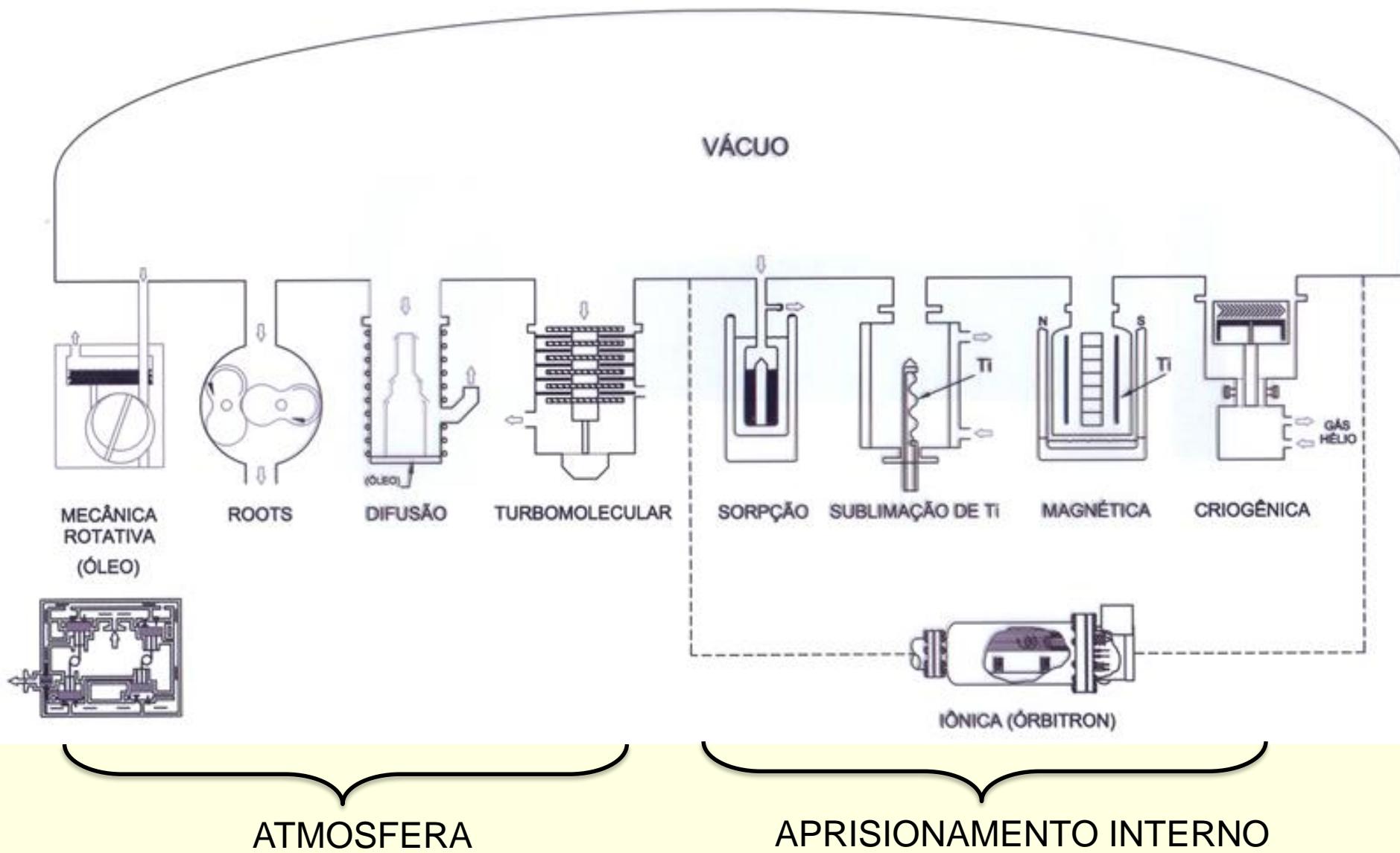
Interior de uma Câmara de Espalhamento



Bombas de Vácuo



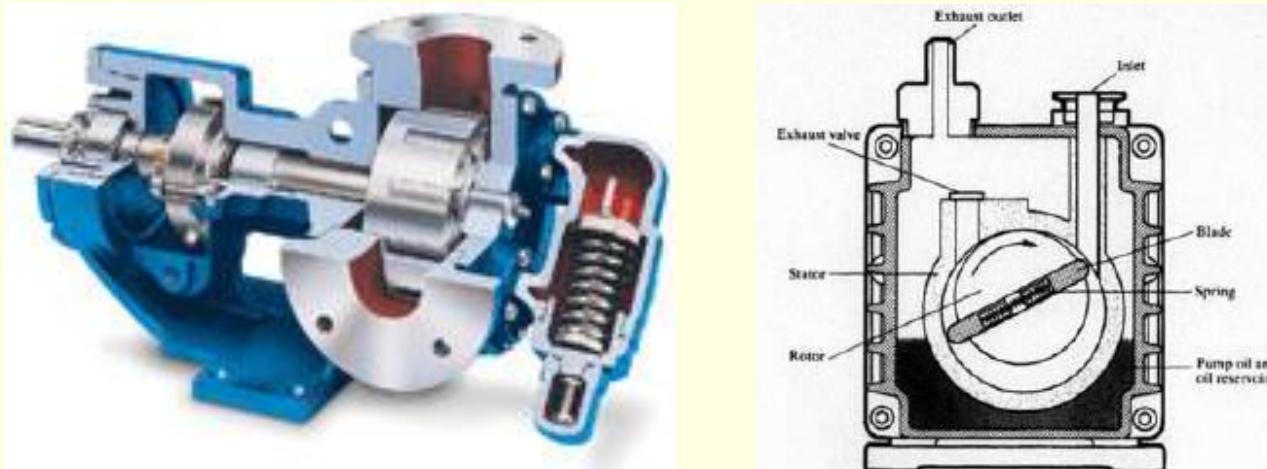
Bombas de Vácuo



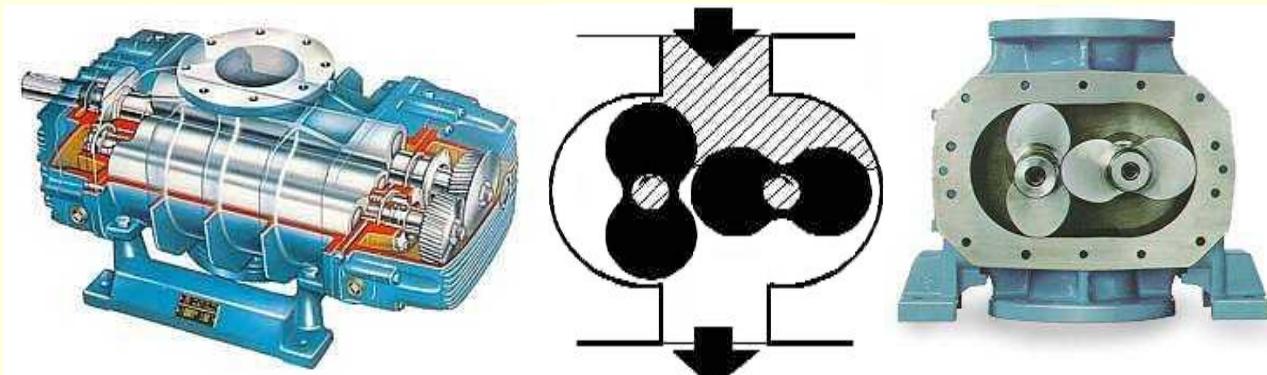
Pré-vácuo

Bombas mecânicas

Bombas rotativas

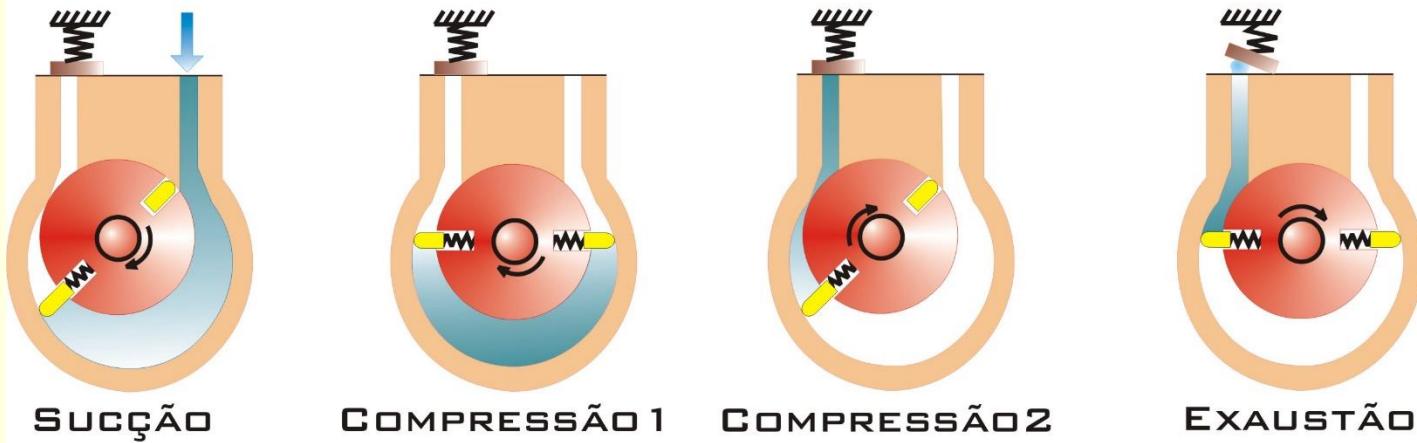


Bombas roots



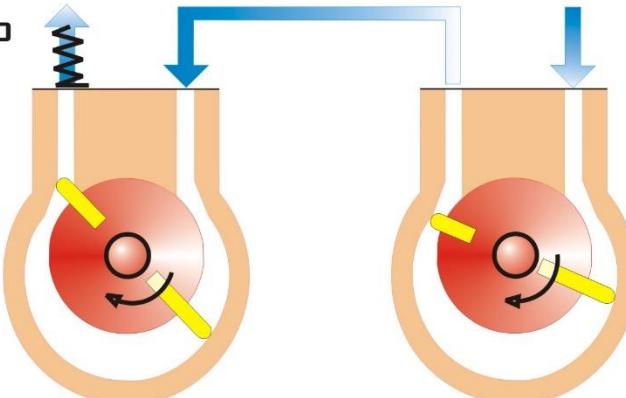
Bomba rotativa

BOMBA ROTATIVA SELADA À ÓLEO



PROCESSO DE ESCAPE DE BOMBAS SELADAS À ÓLEO DE 2 ESTÁGIOS

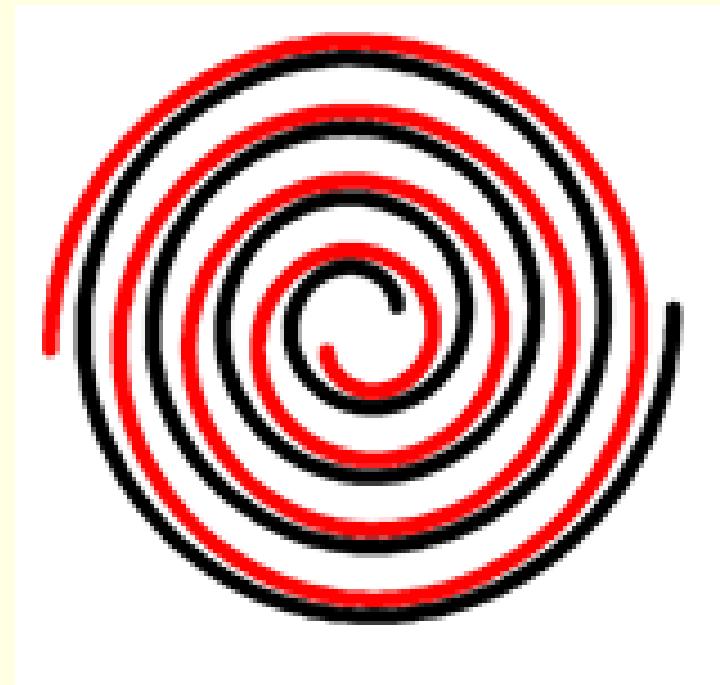
EXAUSTÃO
VÁLVULA PORTA DE
 SUCESSÃO



Funções do óleo:

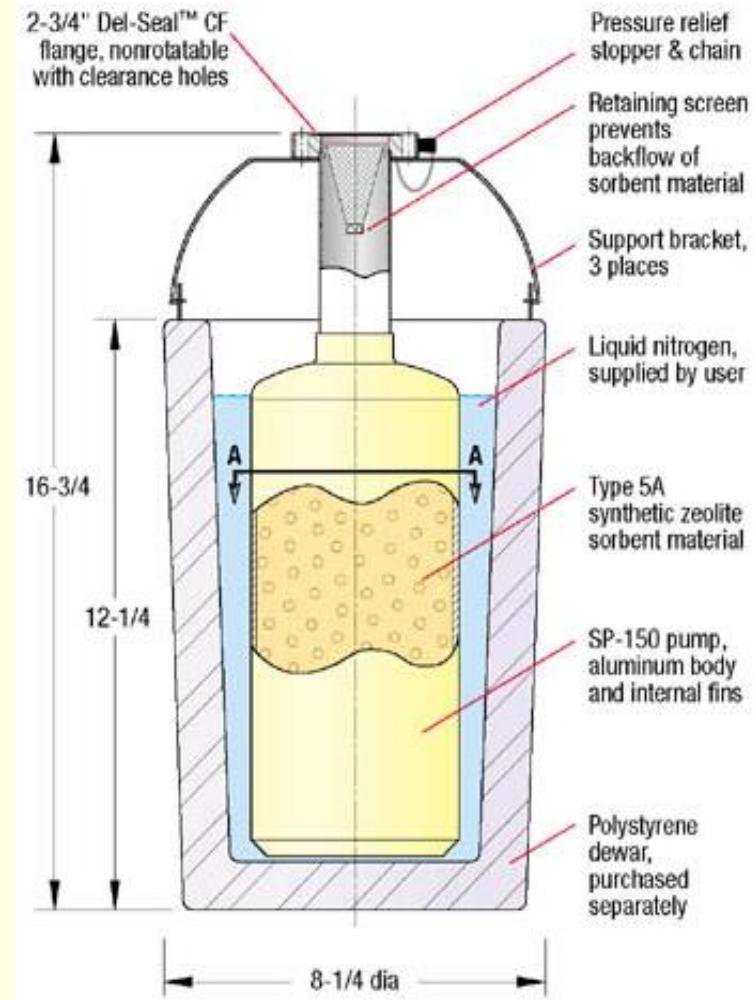
- Vedaçāo
- Lubrificaçāo e ação anti-corrosiva
- refrigeração

Bomba Scroll



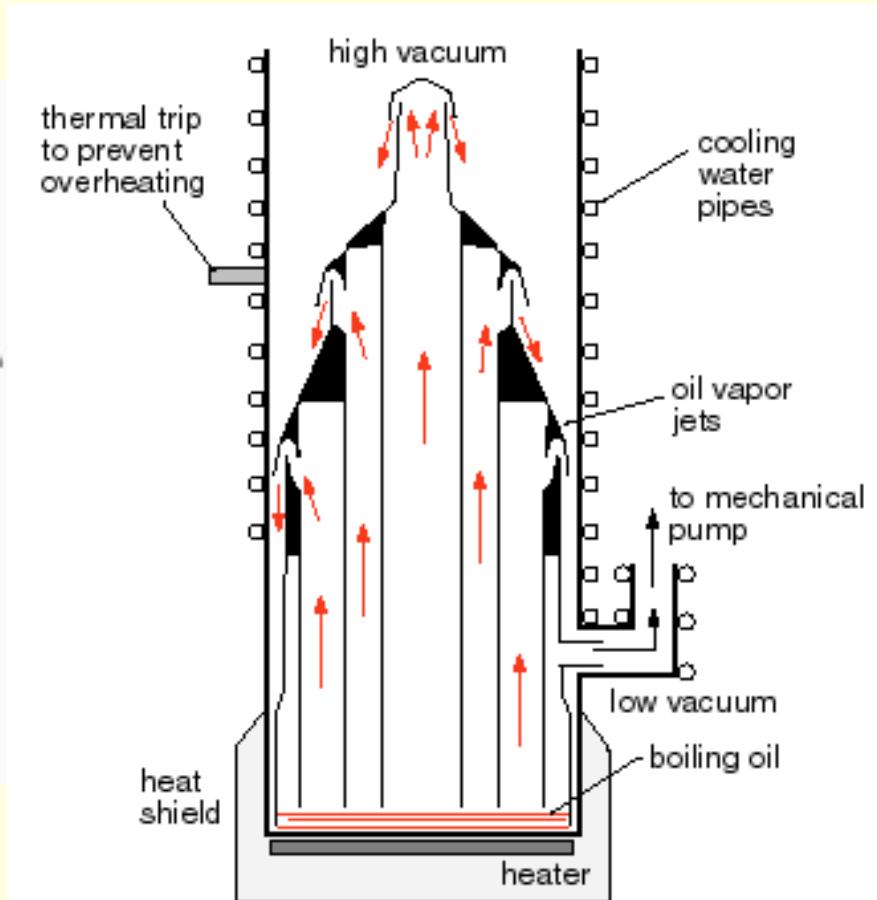
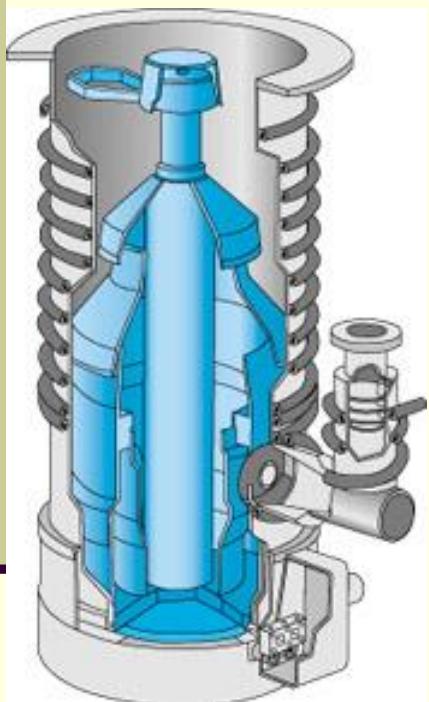
Pré-vácuo

Bombas de sorção



Alto-vácuo

Bomba Difusora



Exemplos de Bombas Difusoras



Acelerador de Partículas

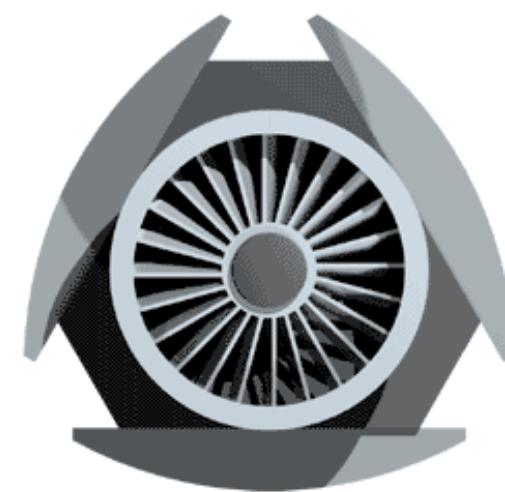
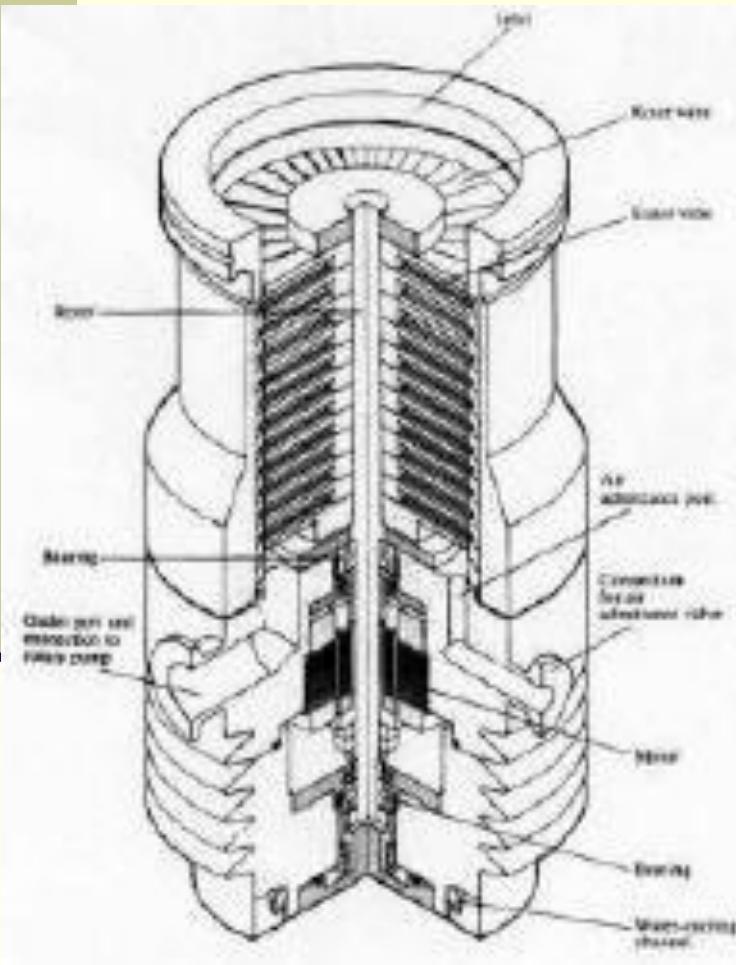
Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia



<https://www.ivicorp.com/diffusion-pumps/>

Alto-vácuo

Bomba Turbo-molecular



Bomba Turbo Molecular - Pfiffer

PFEIFFER VACUUM



<https://www.youtube.com/user/PfeifferVacuum>

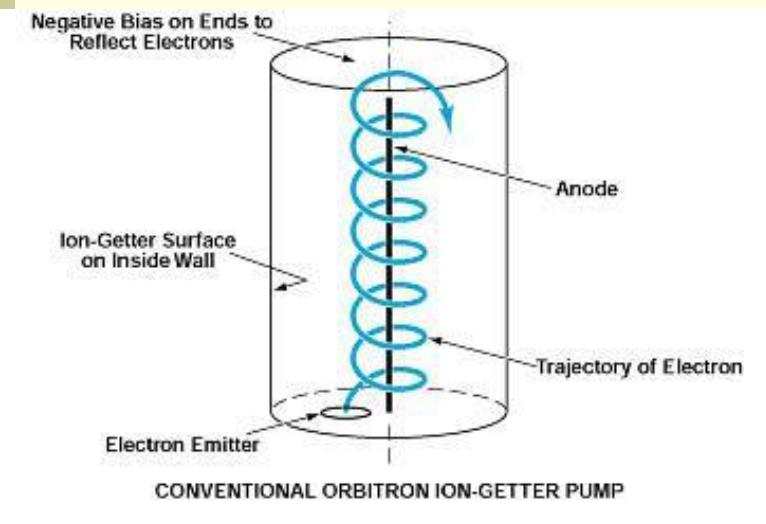
Alto-vácuo

Bomba criogênica

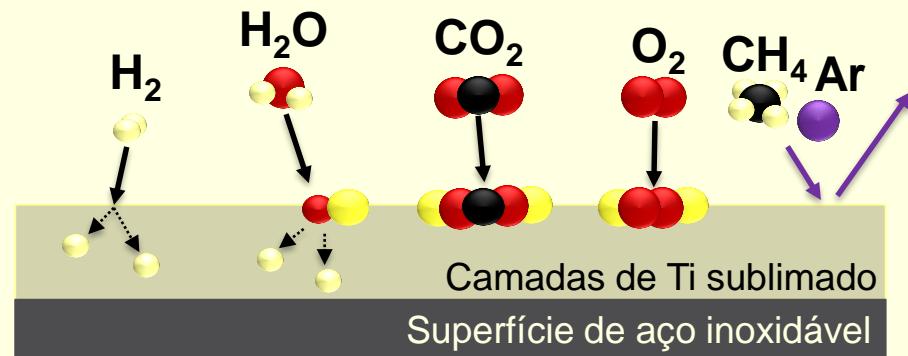
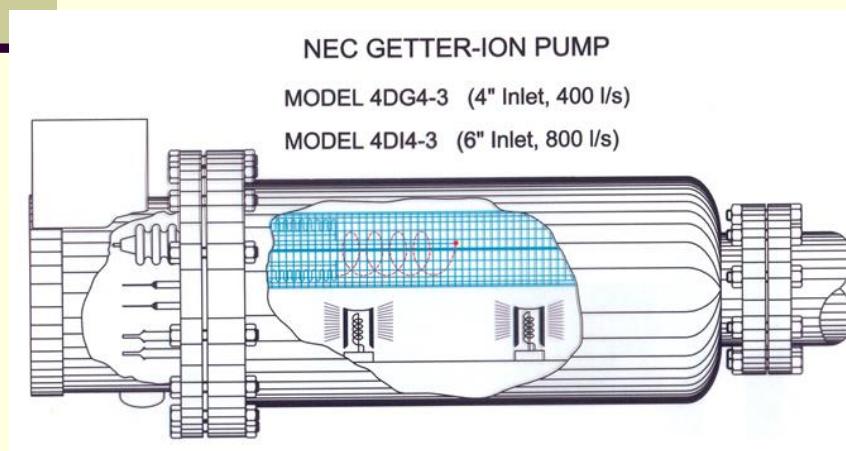
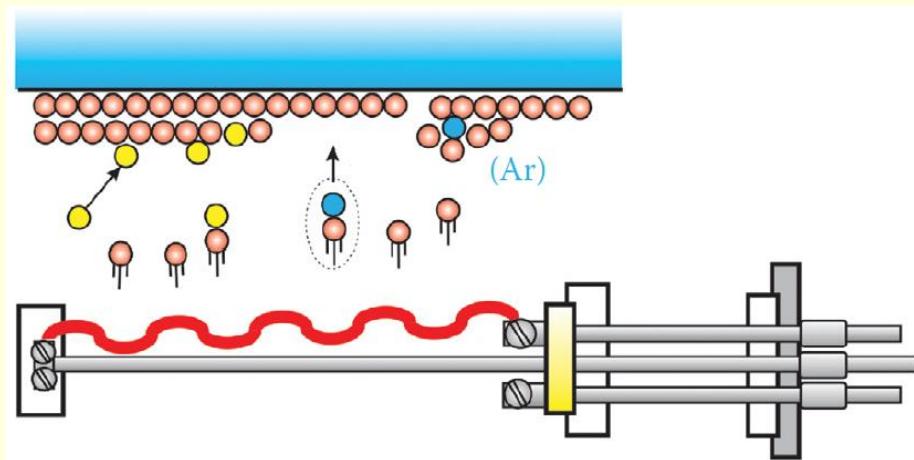


Alto-vácuo

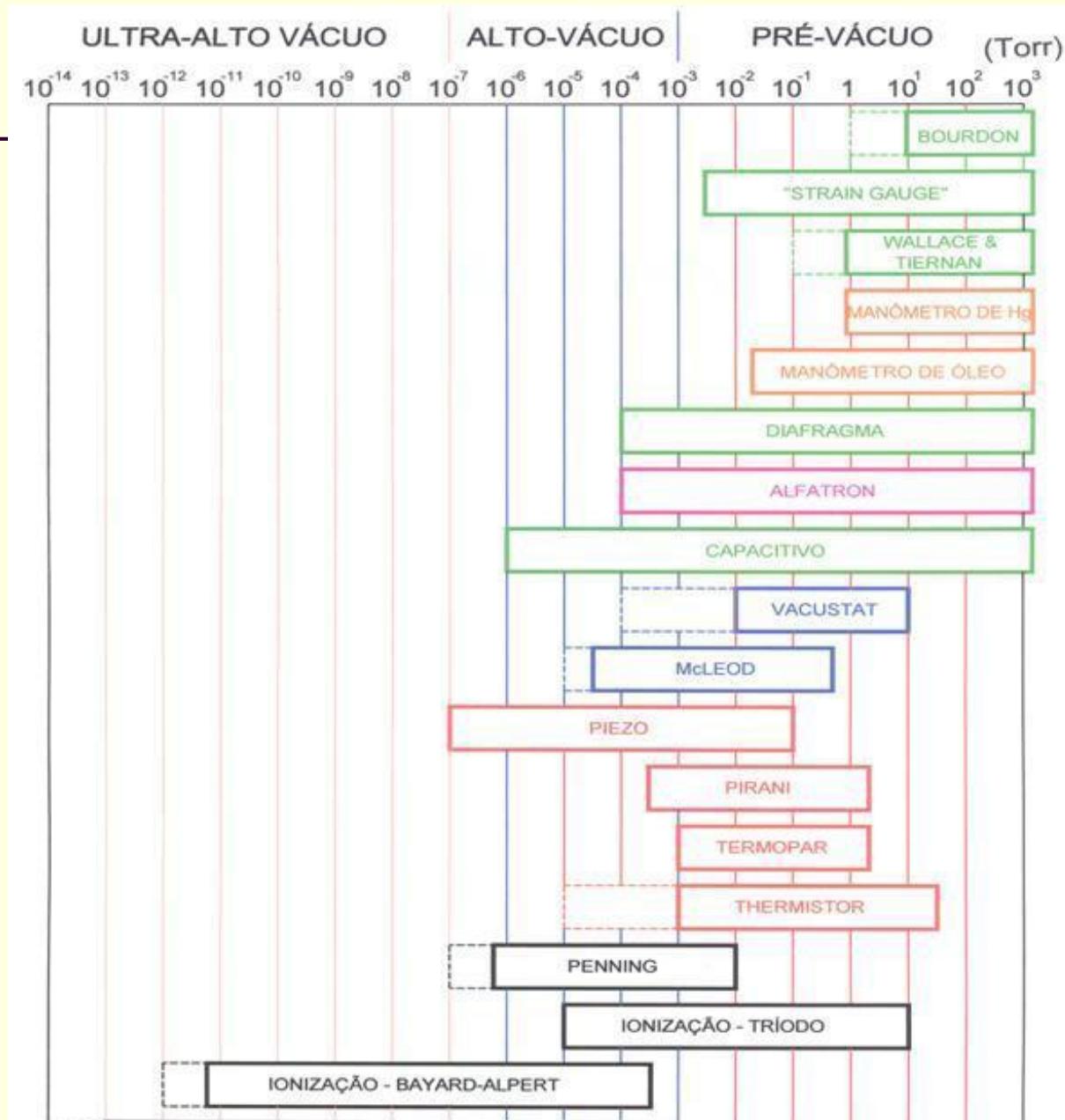
Bomba iônica (orbitron)



Bomba de sublimação



Medidores de Pressão



Manômetros mecânicos

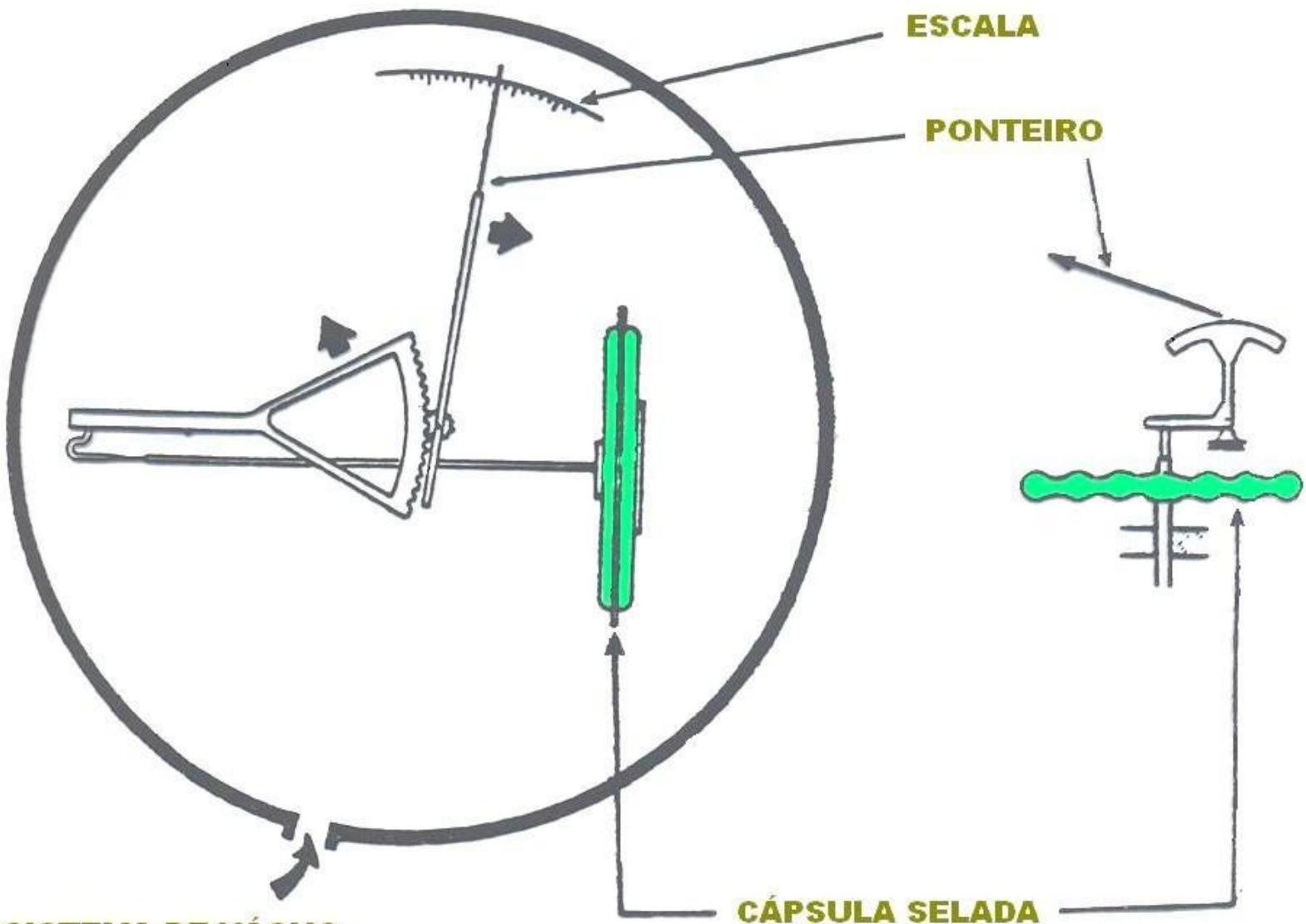
Bourdon



Wallace-Tiernan

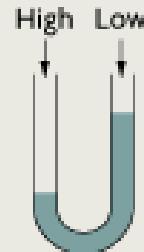
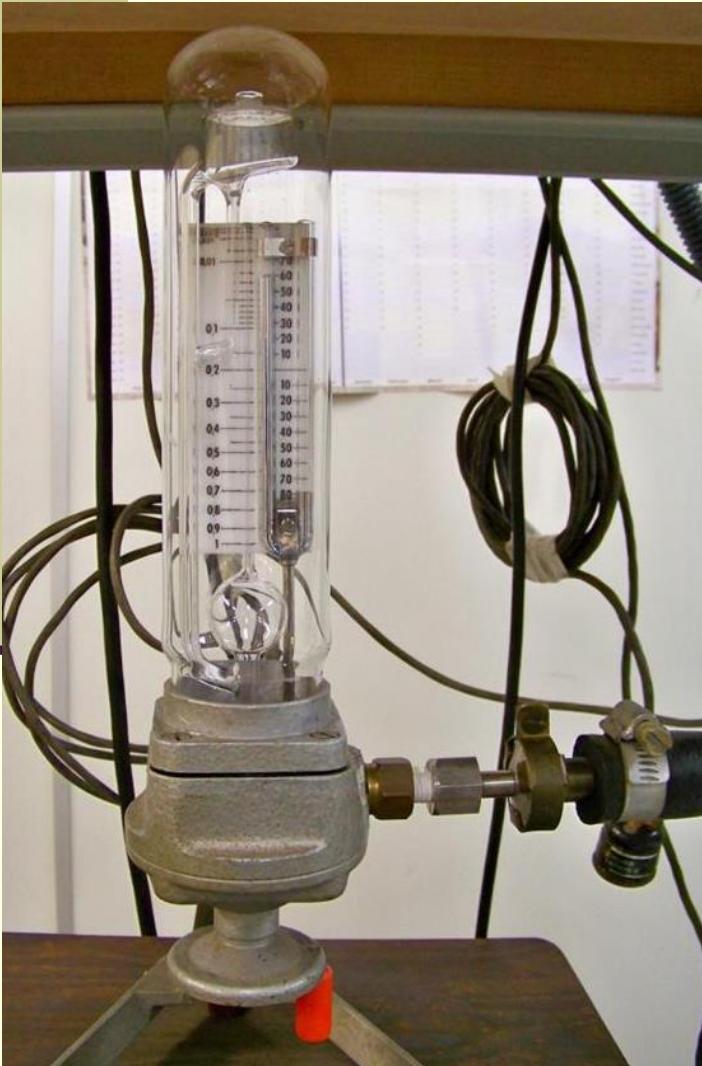


Wallace-Tiernan

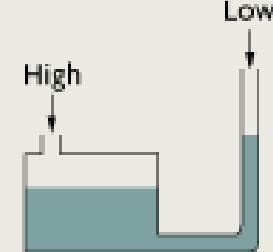


Manômetros de mercúrio

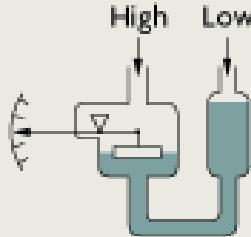
Kammerer (McLeod + Tubo em U)



A) U-Tube Manometer



B) Well (Reservoir) Manometer

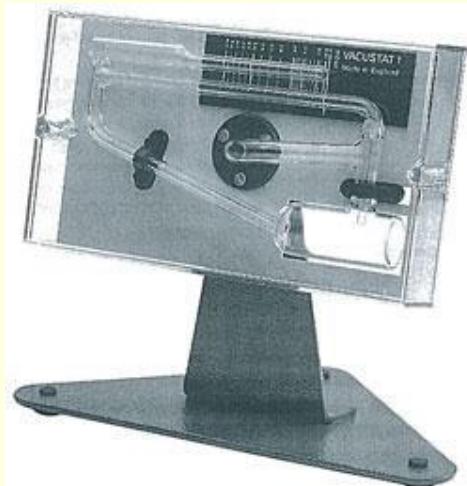


C) Float Manometer



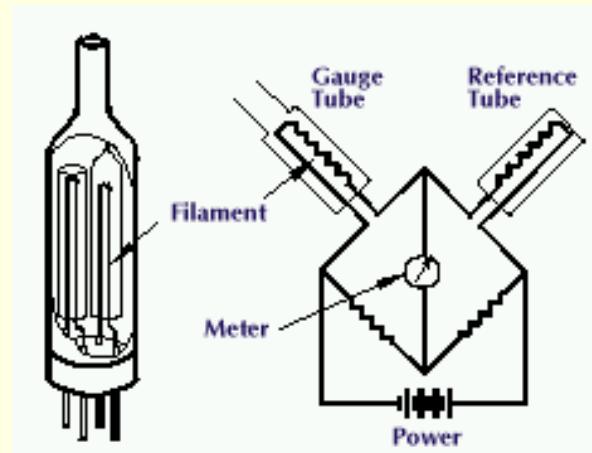
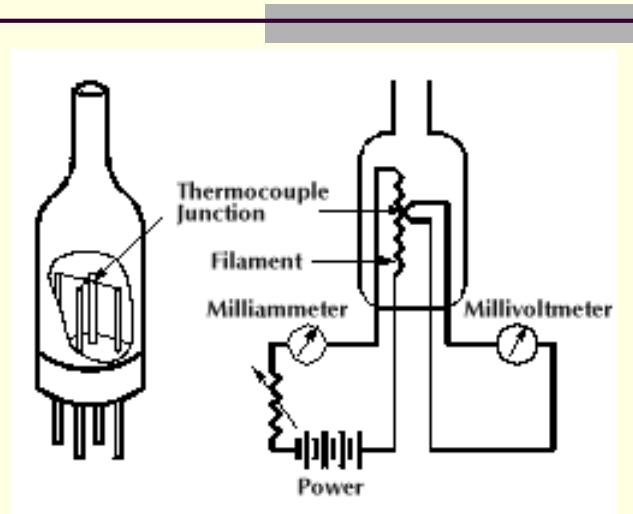
D) Inclined Manometer

Vacustat

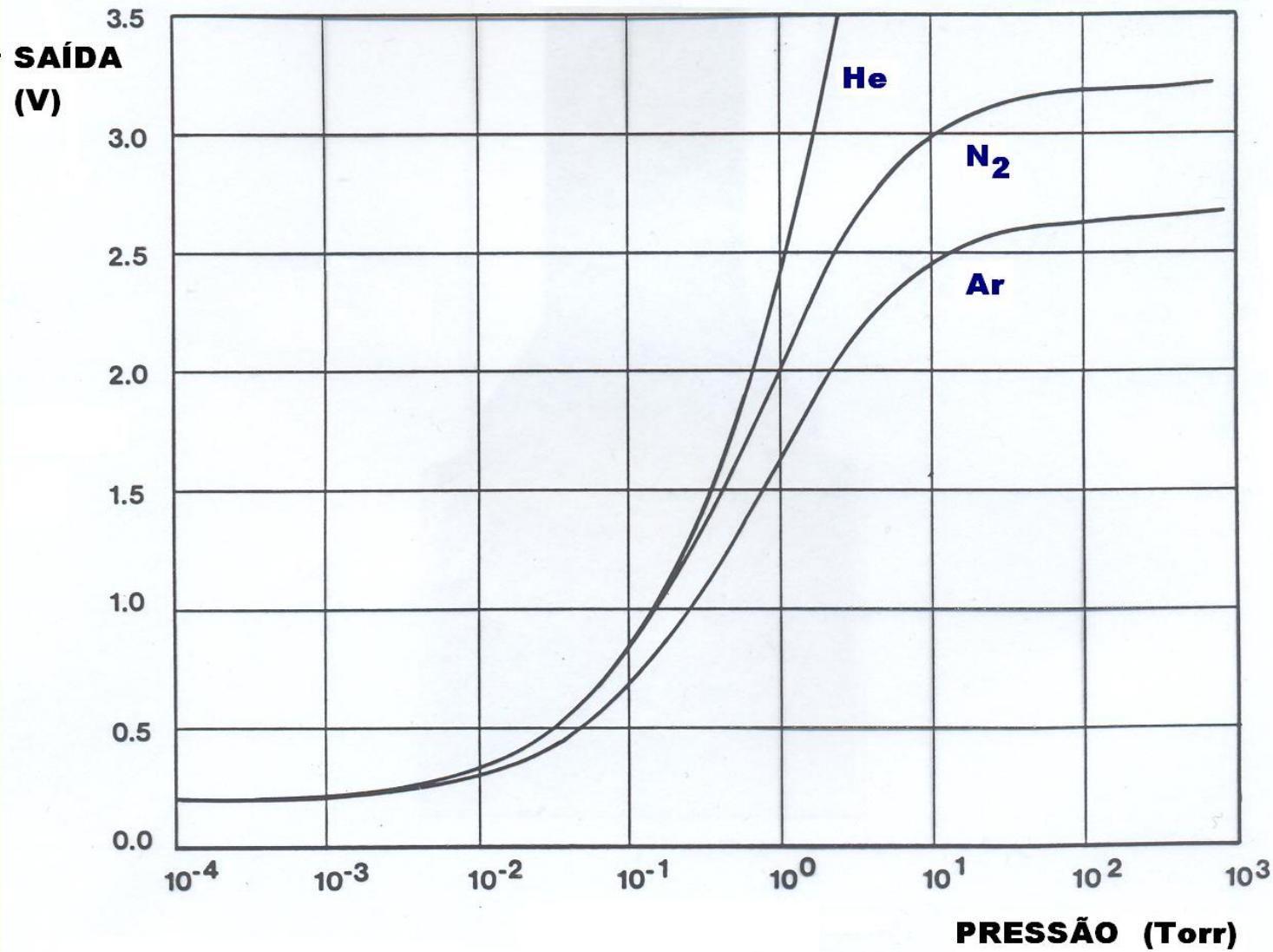


Manômetros de termo-condutividade

Termopar, Pirani e thermistor

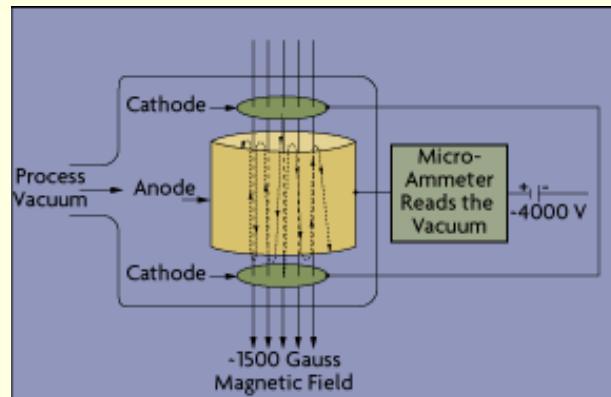
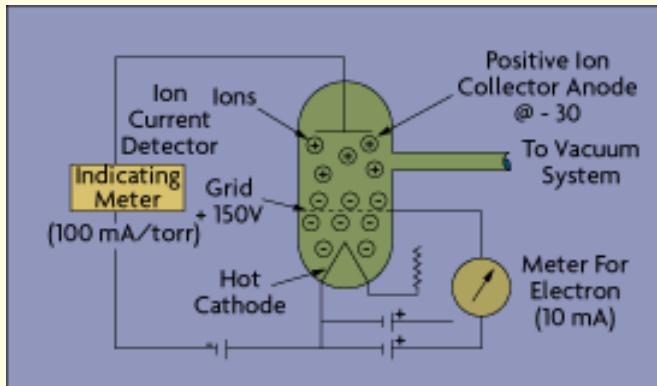


PIRANI – CURVA DE RESPOSTA

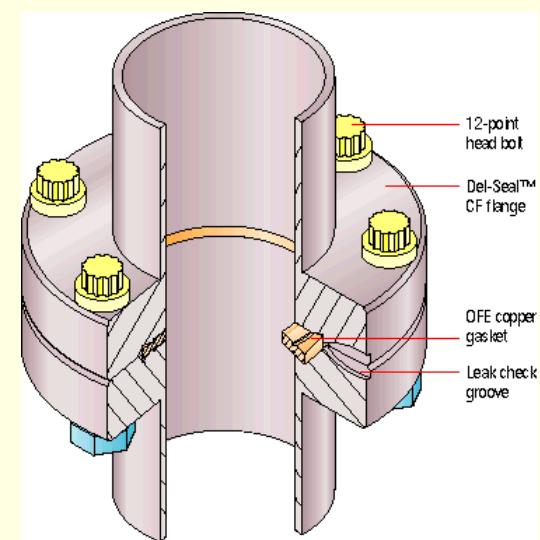
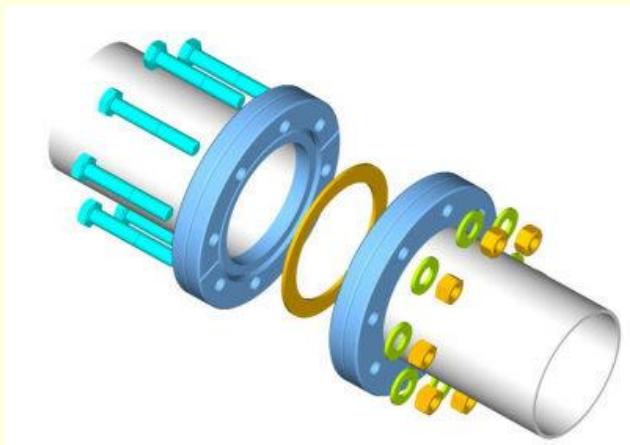


Manômetros de ionização

Triodo, Bayard-Alpert e Penning

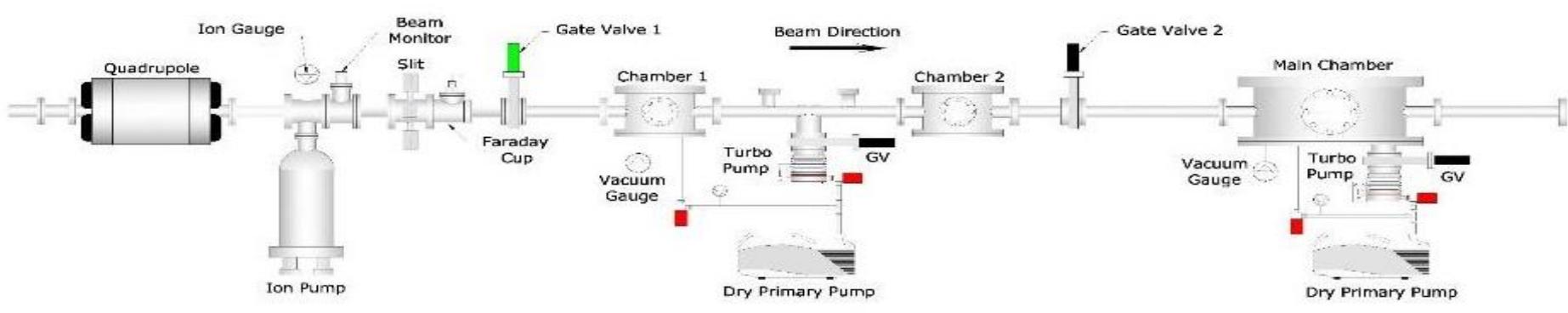


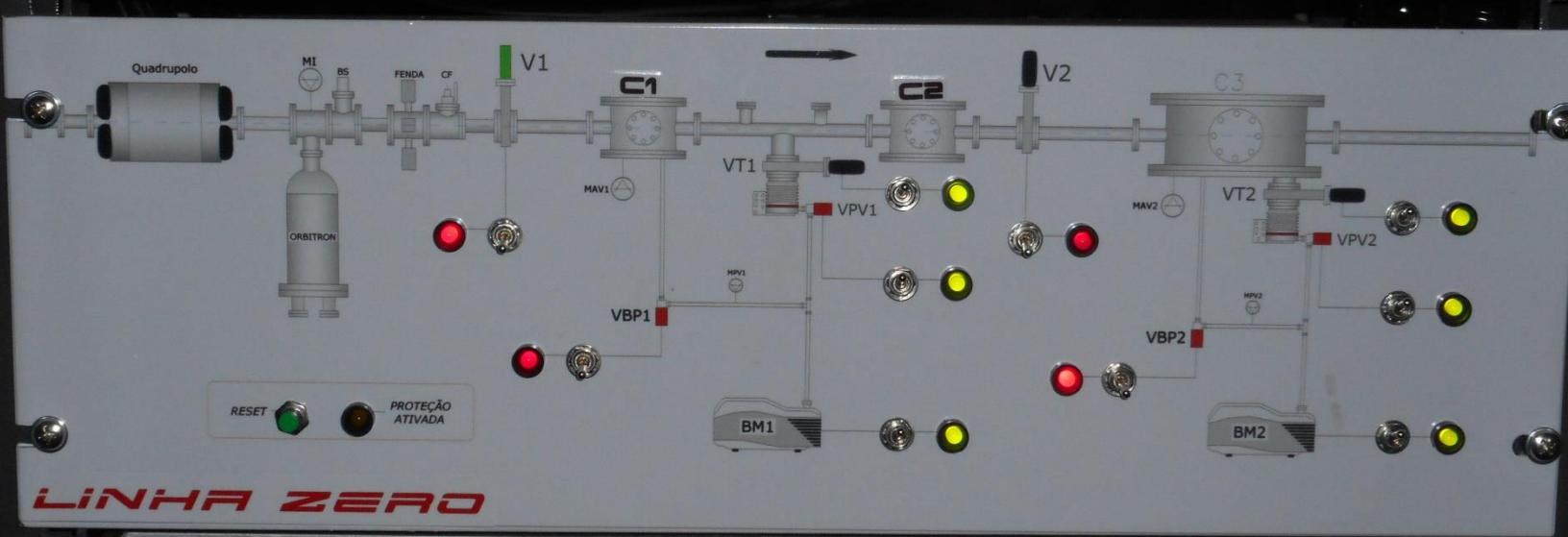
Selagem com o-rings, gasket ou conflat



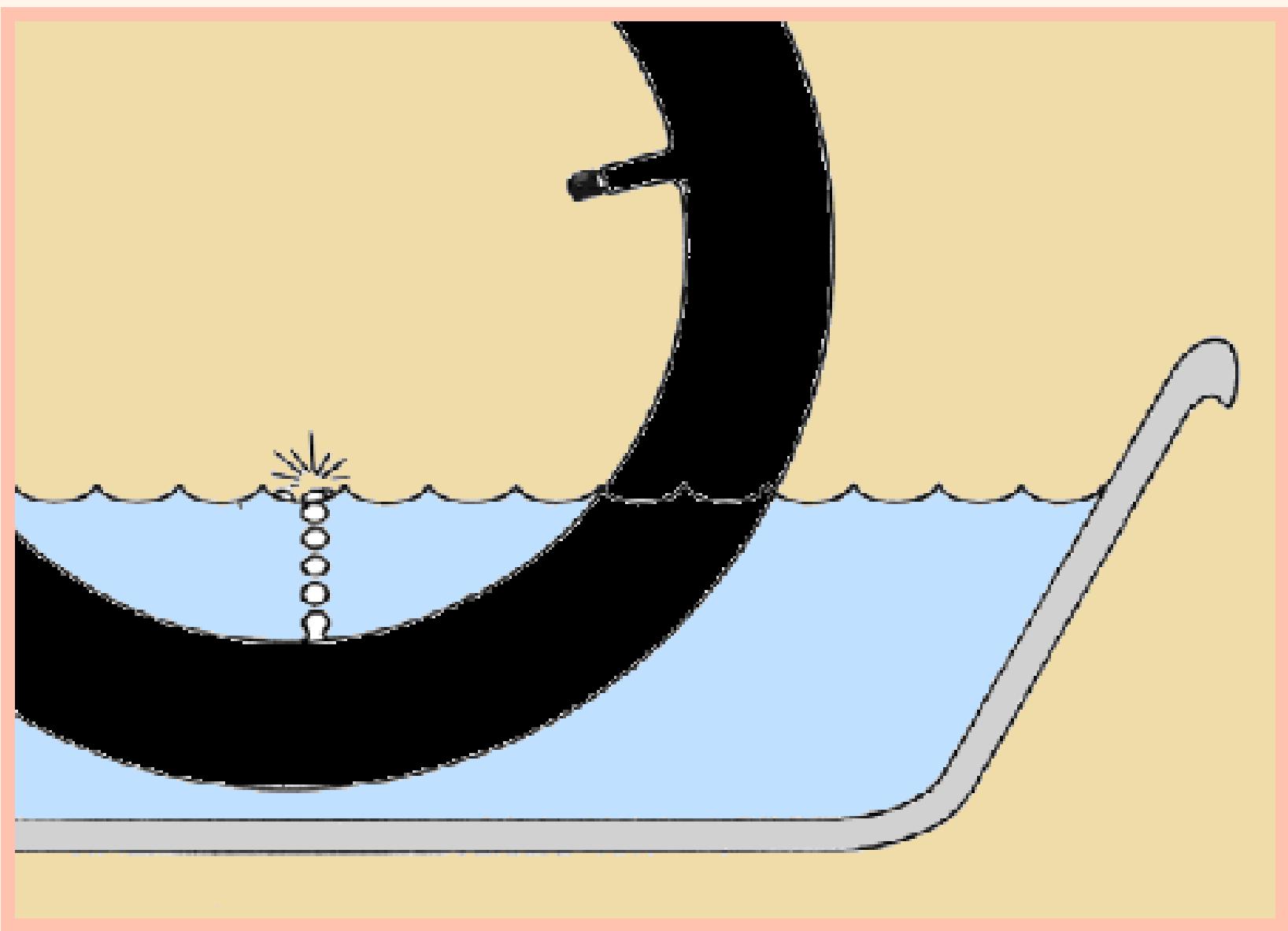
Escolha do material para a construção das câmaras:
Alumínio, inox, latão, nylon, teflon, cobre, etc.

Sistema de vácuo SAFIIRA



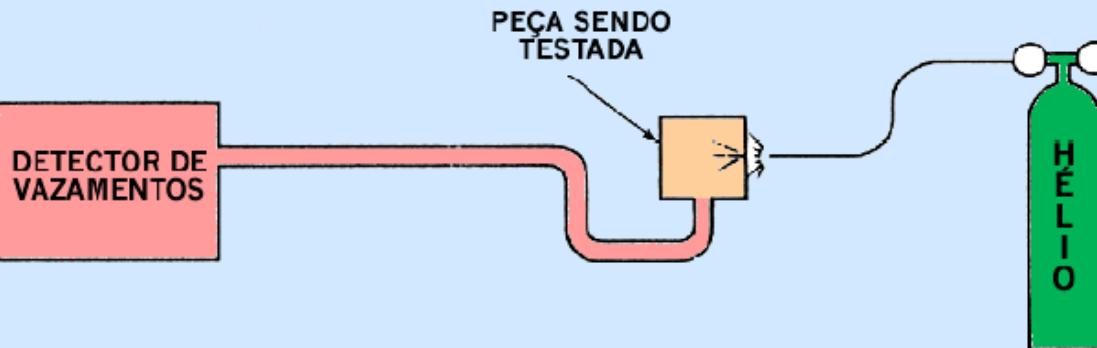


Detecção de Vazamentos

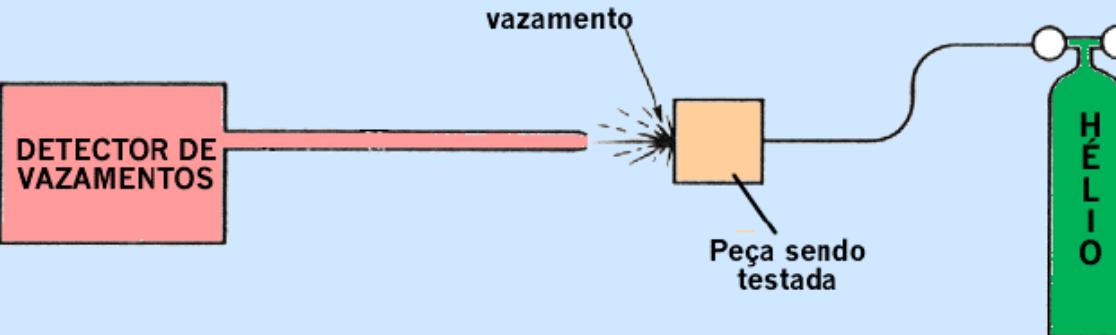


Sistemas para detecção de vazamentos

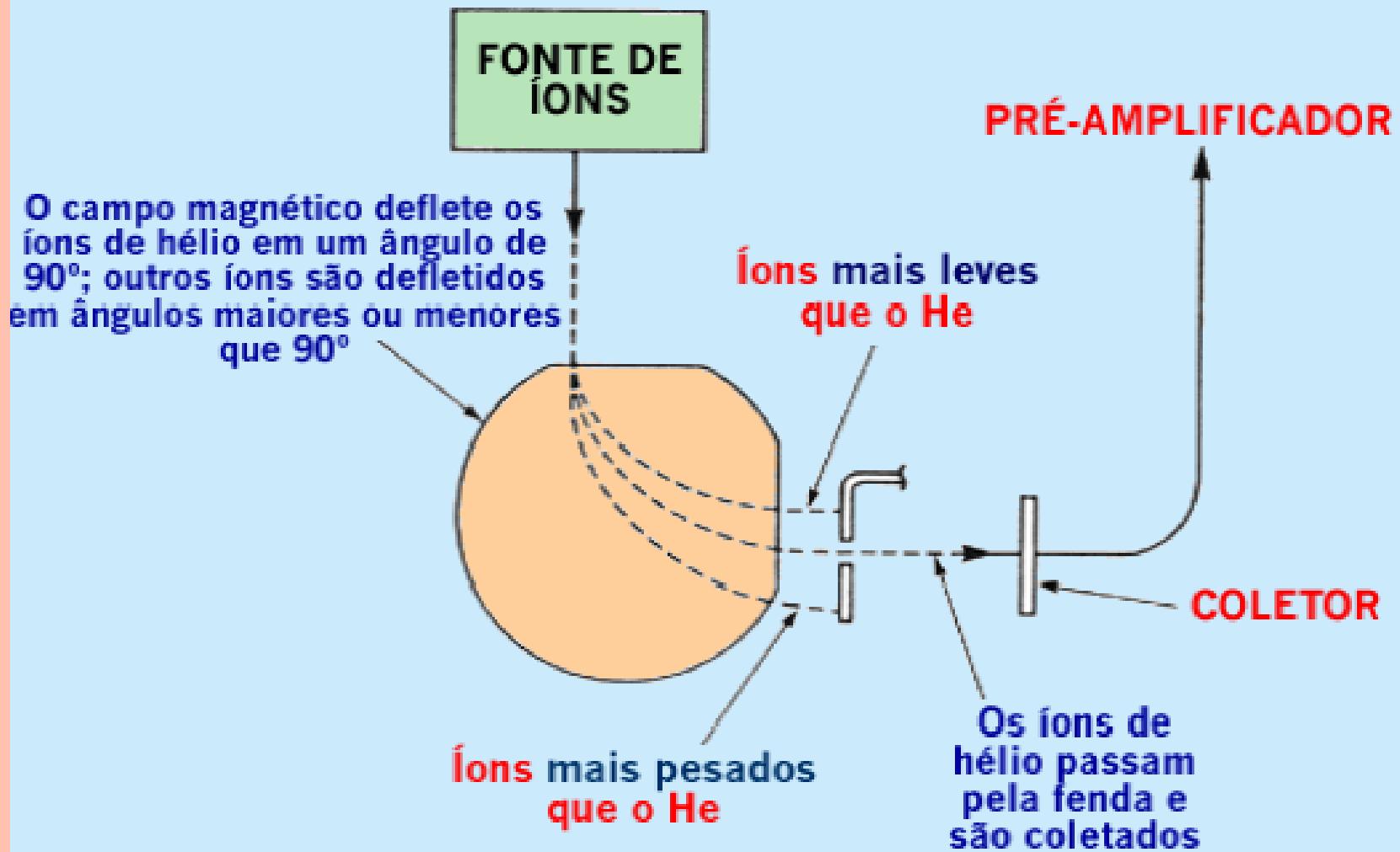
TESTE COM O INTERIOR DA PEÇA EM VÁCUO

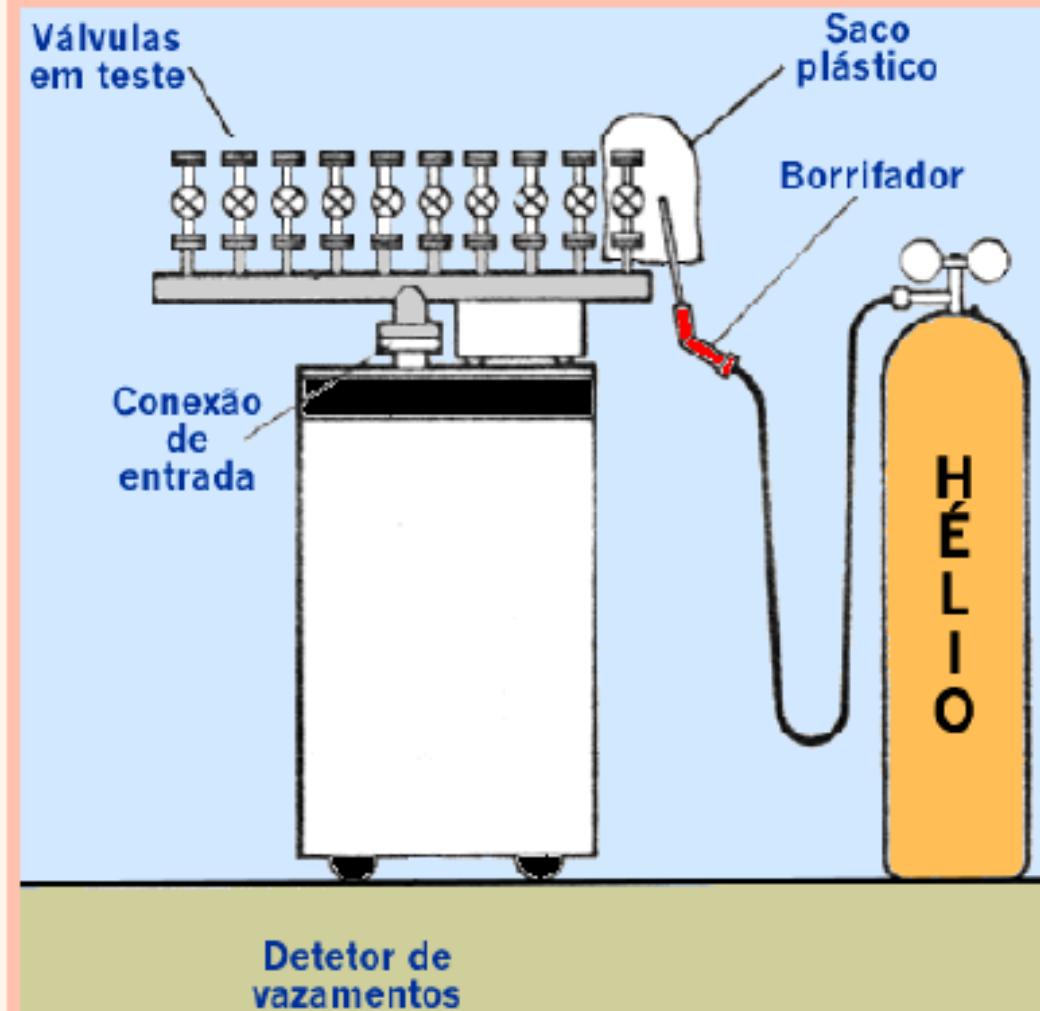


TESTE COM O INTERIOR DA PEÇA PRESSURIZADO COM HÉLIO

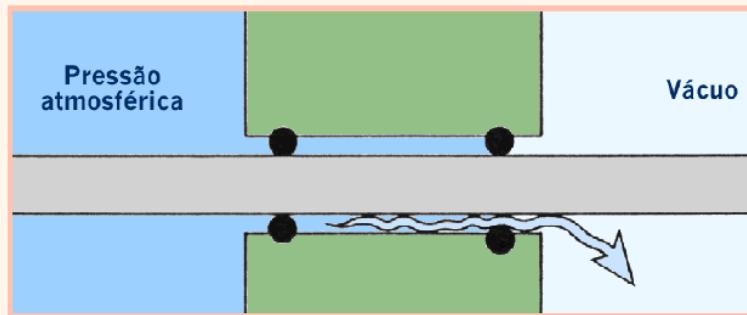
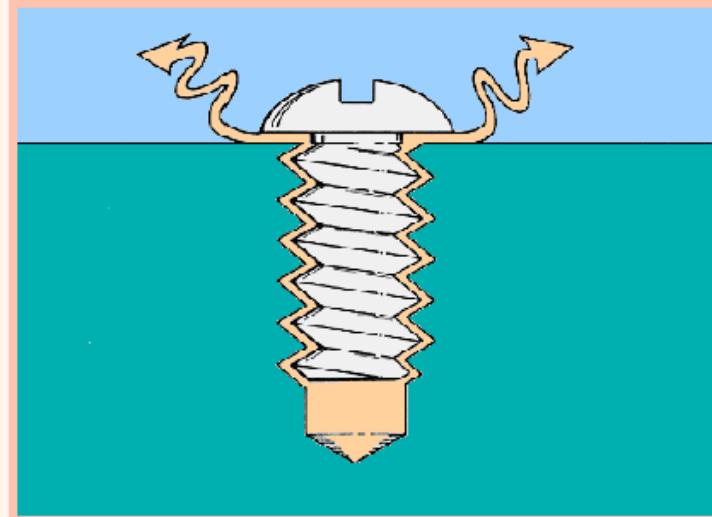


PRINCÍPIO DA SEPARAÇÃO DE ÍONS POR CAMPO MAGNÉTICO



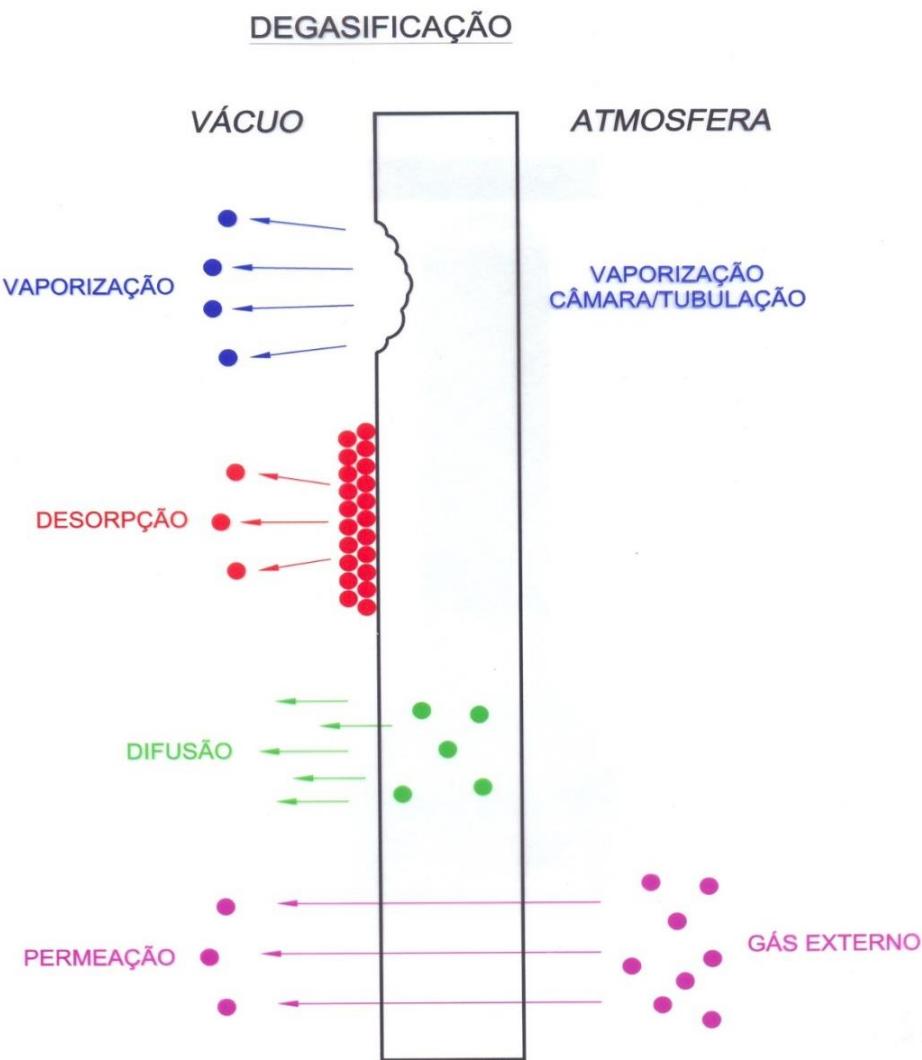
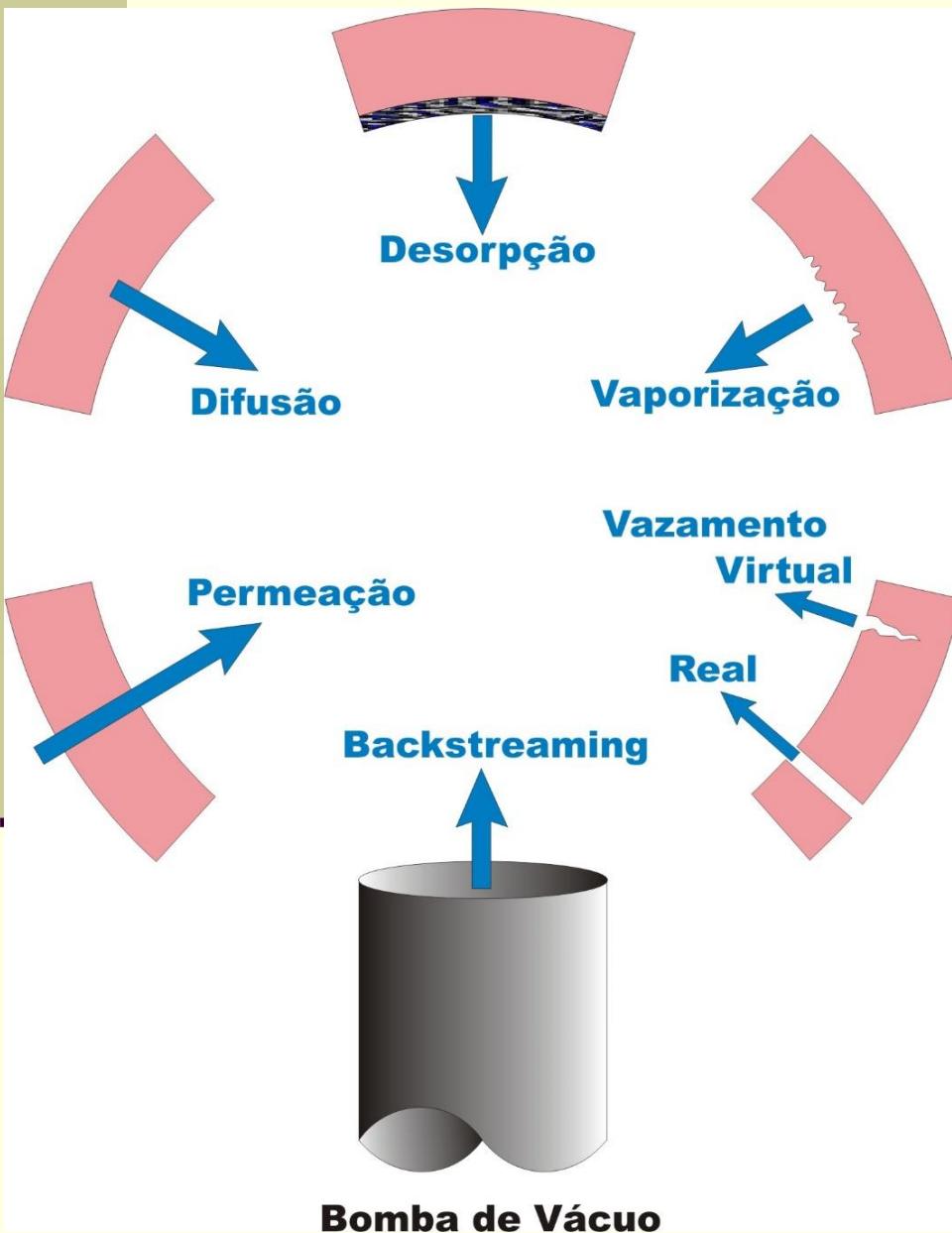


Vazamento Virtual



Principais fontes de gases e vapores em um sistema de vácuo

$$\text{Fluxo de Massa } Q_T = \sum Q_i$$



Modelos de Fontes de gases

Fonte de gás	Característica	Comentário
Volume	$P = P_o e^{-\frac{S}{V}t}$	Pressão cai exponencialmente dependendo de S e V
Vazamento Real	$P_{res} = \frac{Q_{vr}}{S}; Q_{vr} \approx C_{vr} P_{atm}$	Fluxo constante. Utilizar detector de vazamentos. Deve ser eliminado
Vazamento Virtual	$Q_{vv} = C_v P_o e^{-\frac{C_v}{V_c}t}$	$C_v \ll S_b$ Queda da pressão depende de C_v e V_c . Evitar no projeto
Difusão	$Q(t) = c_o \frac{\sqrt{D}}{\sqrt{\pi t}}$	$Q(t)$ é proporcional a $\frac{1}{\sqrt{t}}$
Permeação	$Q = \frac{K(P_e^n - P_i^n)}{d}$	$N=1$ para não metais; $n=1/2$ para moléculas diatômicas em metais. Constante de permeação $K(T)$ é proporcional a $10^3/T$
Evaporação	$W = 0.058 P_v \sqrt{\frac{M}{T}} \frac{g}{cm^2 s}$ $Q = WA$ (g/s) $Q = \frac{\Delta N}{\Delta t} kT \frac{Torrl}{s}$	Crescimento de P_v em função da temperatura é exponencial e por isso mais rápido do que $\frac{1}{\sqrt{T}}$
Desorpção Térmica (desgasificação)	Primeira ordem: $\frac{dc}{dt} = c_o k_1 e^{-\frac{t}{\tau_{res}}}$ $\frac{1}{k_1} = \tau_{res} = \tau_o e^{\frac{E_d}{N_o kT}}$	Rápido $\tau_{res} = 10^{-12} s$
Temperatura (cozimento)	Segunda ordem: $\frac{dc}{dt} = \frac{-k_2 C_o^2}{(1 + C_o K_2 t)^2}$	Cai lentamente A molécula de H_2 se dissocia na adsorção e recombina na desorpção
Superfícies Reais	$q_n = \frac{q}{t^\alpha}$ $0.7 \leq \alpha \leq 2$	Fórmula geral $q_n = qt^{-1}$ Adsorção química Adsorção física

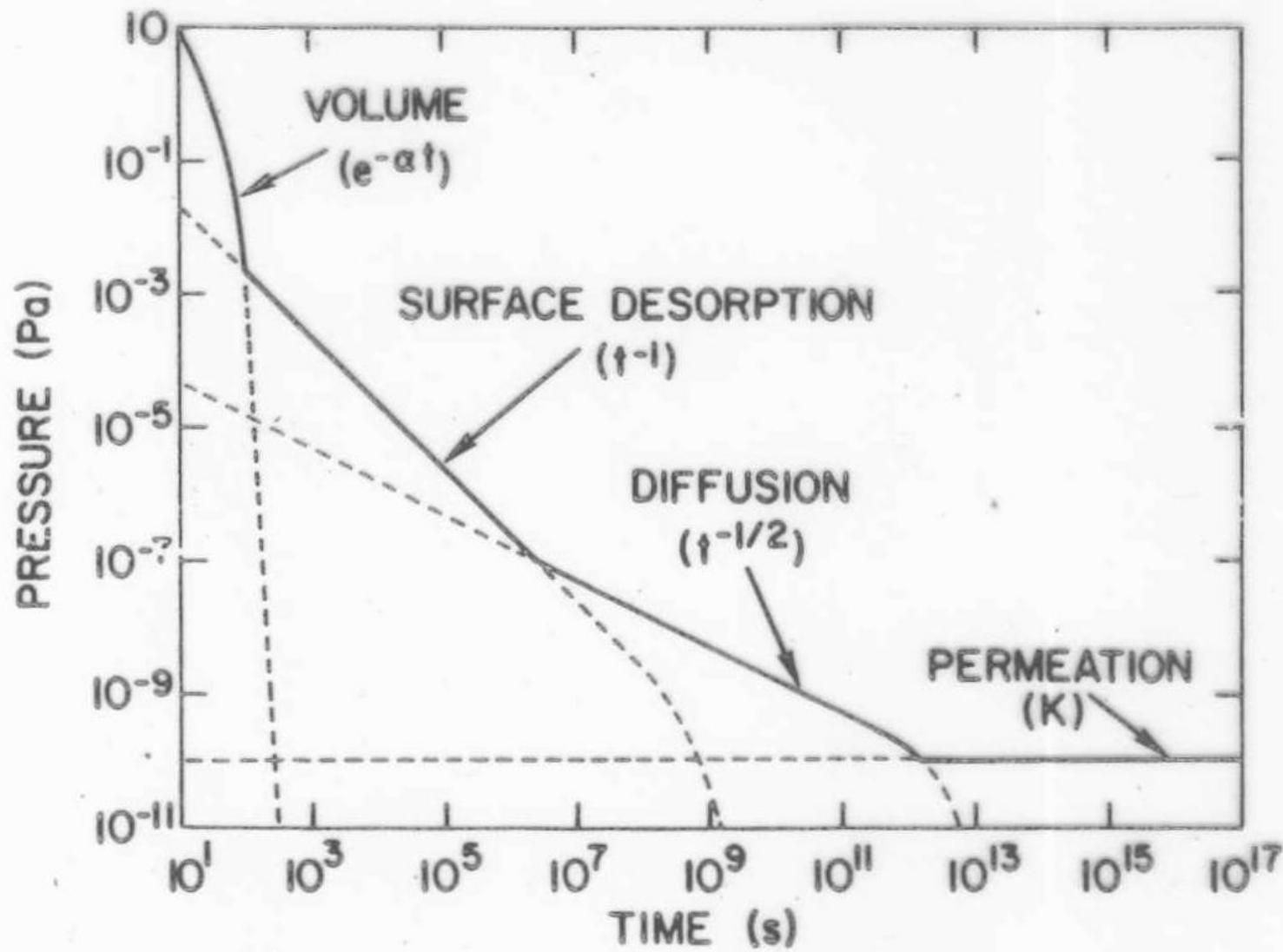
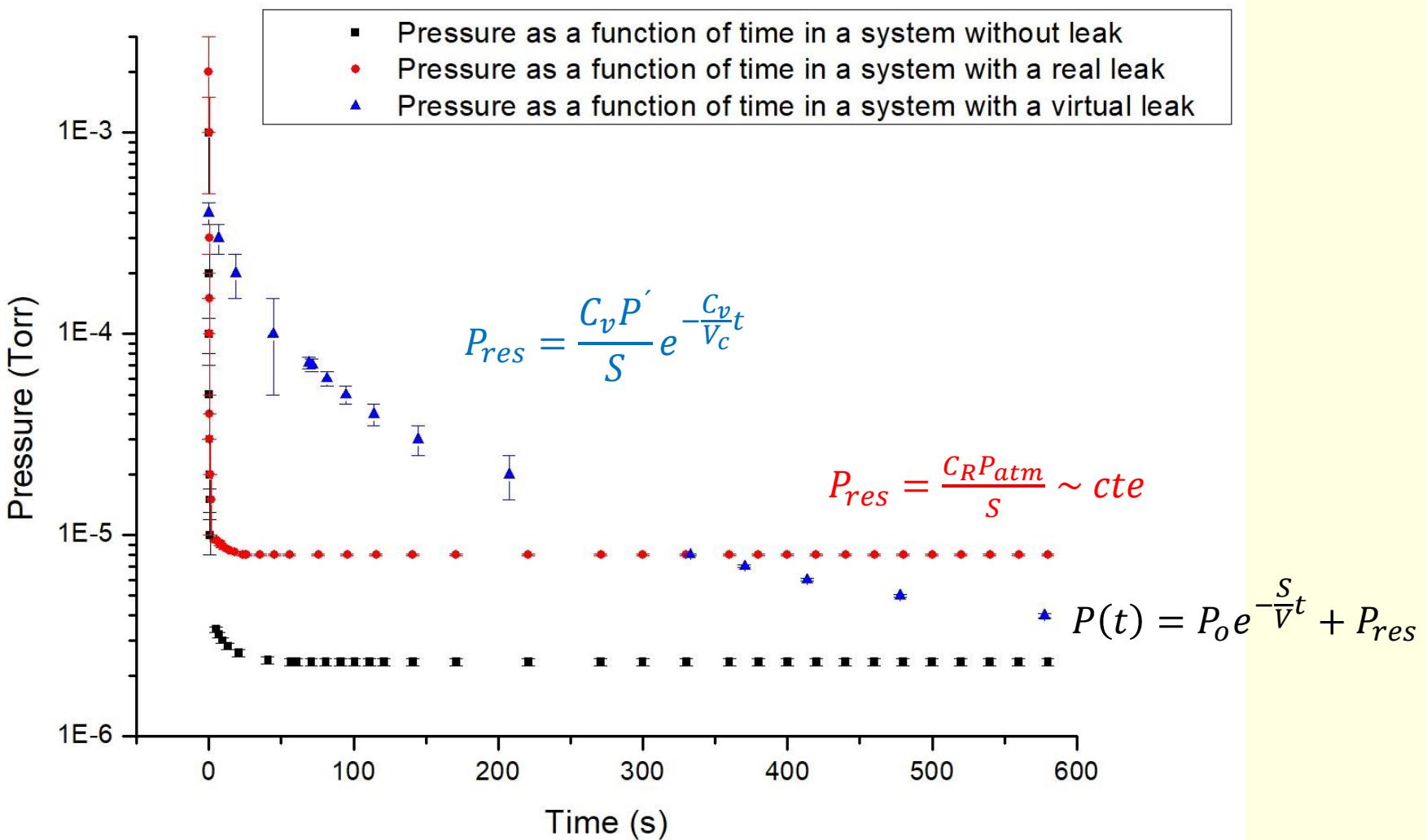
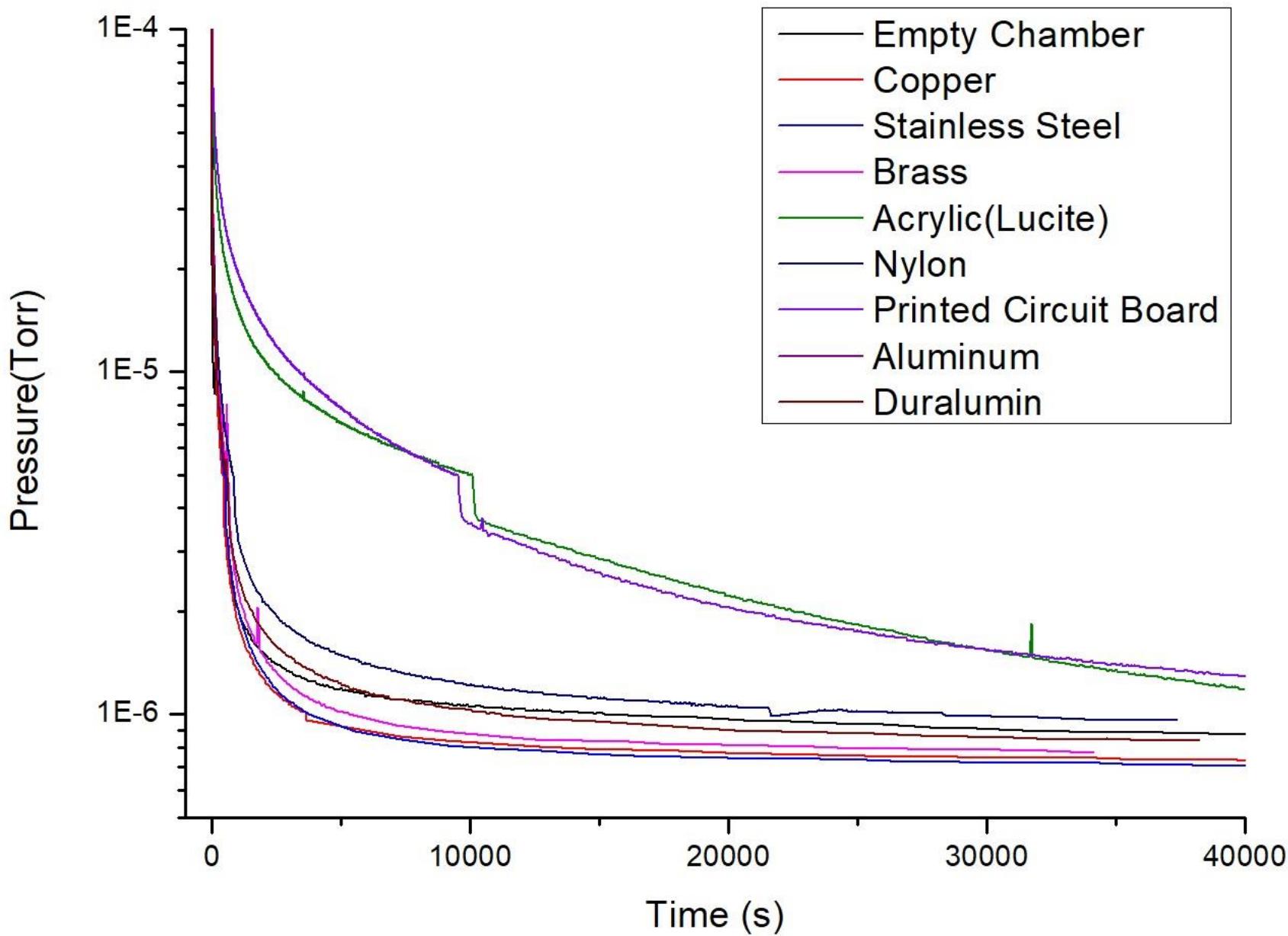


Fig. 4.6 Rate limiting steps during the pumping of a vacuum chamber.

Queda da pressão em função do tempo num sistema real



Desgaseificação de diferentes materiais



Bibliografia

- B. Suurmeijer, T. Mulder and J. Verhoeven, *Vacuum Science and Technology*, The High Tech Institute and Settels Savenije Van Amelsvoort, 2016
- David M. Hata, *Introduction to Vacuum Technology*, Prentice Hall, 2007
- Nagamitsu Yoshimura, Vacuum technology: practice for scientific instruments, Springer, 2008
- J.F. O'Hanlon – A User's Guide to Vacuum Technology – John Wiley & Sons, 2003
- M. H. Hablanian – High-Vacuum Technology, A Practical Guide – CRC Press, 1997
- **A. Roth – Vacuum Technology – North-Holland, 1990**
- N.S. Harris – Modern Vacuum Practice – McGraw-Hill, 1989
- G. Lewin – Fundamentals of Vacuum Science and Technology – McGraw-Hill, 1965
- A. Guthrie – Vacuum Technology – John Wiley & Sons, 1965
- S. Dushman & J.M. Lafferty – Scientific Foundations of Vacuum Techniques, John Wiley & Sons, 1966

AVALIAÇÃO

Teoria: Serão realizadas duas Provas Gerais (P) e mais uma Substitutiva. A prova substitutiva é uma prova optativa, única, versando sobre toda a matéria do semestre. Sua nota pode substituir a P₁ ou P₂. Não haverá prova individual, em separado, por qualquer motivo.

Laboratório: Serão cobrados 2 relatórios referentes às 6 atividades experimentais.

Não se aceitam relatórios fora do prazo de entrega estipulado.

REGIME DE APROVAÇÃO

- Será aprovado o aluno que obtiver uma Média Final (MF) maior ou igual a 5 (cinco), calculada da seguinte forma:

- $M_p = (P_1 + P_2) / 2$ média das provas.
- $M_R = (2R_1 + 3R_2) / 5$ média dos relatórios e lista de simulação.
- R1 = Relatório I (peso 2,0)
- R2 = Relatório II (peso 3,0)

É obrigatória a entrega dos relatórios e da lista do programa Molflow dentro dos prazos estabelecidos.

Se $M_f \geq 5,0$ o estudante está **APROVADO**



Se $3 \leq M_p < 5$ ou $3 \leq M_R < 5$ a média final será a menor das duas notas e o estudante deverá fazer a segunda avaliação, que consiste em uma entrevista (se $3 \leq M_R < 5$) ou uma prova escrita (se $3 \leq M_p < 5$). Neste caso a nota da segunda avaliação será dada por: $N_f = ((M_f + 2R) / 3)$

Se $M_p < 3$ ou $M_R < 3$ o estudante estará **reprovado**.



Calendário

CALENDÁRIO DOS FERIADOS

02 a 06/09 Semana da Pátria – não haverá aulas

15/11 Proclamação da República – não haverá aulas.

DATAS DAS PROVAS

01/10 1^a Prova, P₁, terça-feira

19/11 2^a Prova, P₂, terça-feira

26/11 Prova Substitutiva, P_S, terça-feira

Local das Provas: Sala 2003 do IFUSP.

DATAS PARA ENTREGA DOS RELATÓRIOS – Até às 12h00 min

Relatório 1 - 16/09

Relatório 2 - 29/10

Seminários

- 20/08 – Medidores de pressão
- 17/09 – Bombas de vácuo 1
- 08/10 – Bombas de vácuo 2
- 29/10 – Materiais e componentes de vácuo.
Local: Sala 2003
- 11/11 – Filmes finos
Local: Sala de seminários do LINAC

Horário das 19:00 às 21:00 horas

Palestrantes: Prof. Luiz Marcos Fagundes

Prof. José Fernando Diniz Chubaci

Cronograma do Laboratório

Sala 1008 – Ala II – Andar Térreo

DATA	ATIVIDADE
09/08/24	Aula Introdutória
12/08/24	1º Ciclo de Experimentos – aula 1/3
19/08/24	1º Ciclo de Experimentos – aula 2/3
26/09/24	1º Ciclo de Experimentos – aula 3/3
16/09/24	ENTREGA DO RELATÓRIO 1
30/09/24	2º Ciclo de Experimentos – aula 1/3
07/10/24	2º Ciclo de Experimentos – aula 2/3
14/10/24	2º Ciclo de Experimentos – aula 3/3
29/10/24	ENTREGA DO RELATÓRIO 2
04/11/24	Componentes, Materiais e Vazamentos – Acelerador Pelletron
11/11/24	Fabricação de Filmes Finos

Visita ao INPE 2005



2007



2009



Visita ao INPE 2024

Talvez em 21 de novembro de 2024
Quinta-feira !

Partida às 7 horas do IFUSP
Volta às 18 horas



Nilberto H. Medina
Universidade de São Paulo
Instituto de Física



Obrigado pela Atenção