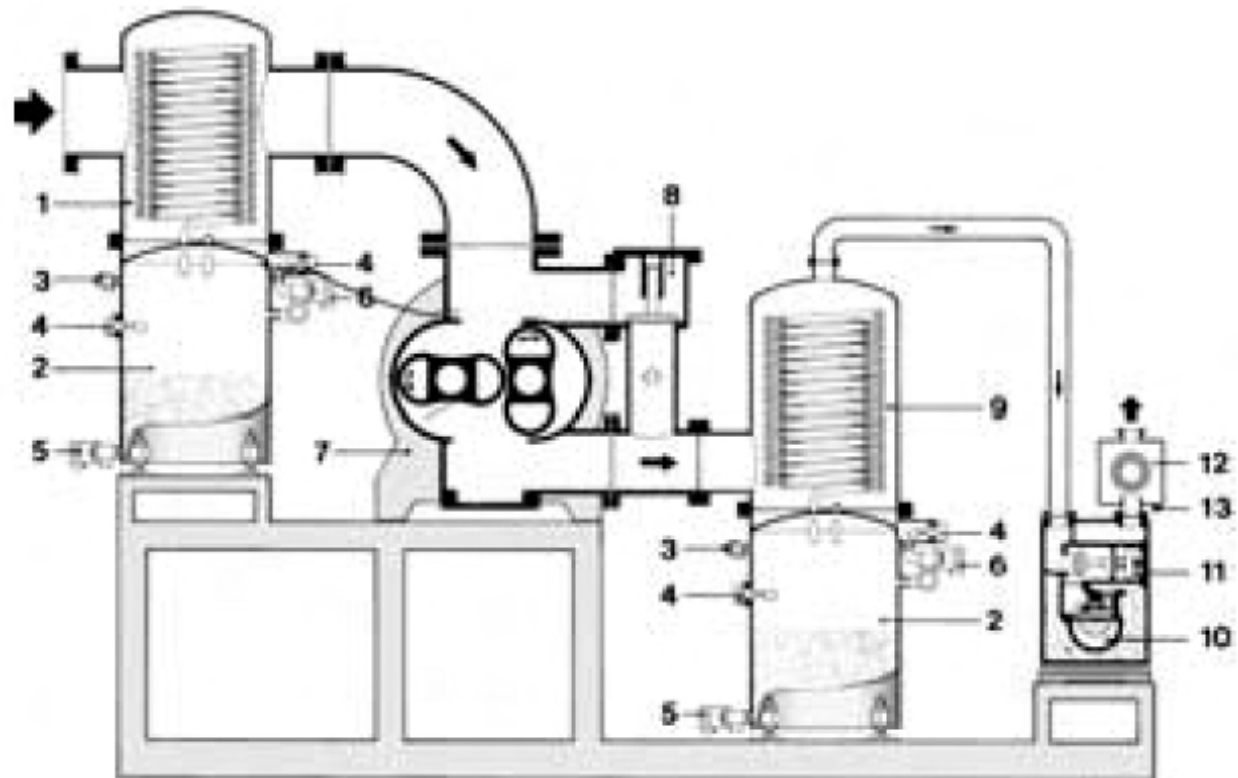


Tecnologia de vácuo



PARTE IV: Cálculos, Exemplos e Aplicações.

Pré Vácuo e Médio Vácuo

A partir deste momento vamos fazer alguns cálculos para estimar a pressão final de um sistema e o tempo necessário para o bombeamento. Tais cálculos são de fundamental importância para o projeto de sistemas de vácuo para aplicações científicas e industriais.

Como visto anteriormente, o fluxo volumétrico de um sistema de bombeamento é reduzido pelas conexões e a tubulação que ligam as bombas a câmara. De uma maneira geral, quanto mais longa a tubulação e quanto menor seu diâmetro maior serão as perdas, ou seja, menor será a eficiência da bomba em evacuar a câmara.

A condutância de tubos cilíndricos, na região de pré-vácuo e de vácuo médio, que compreende a região de fluxo viscoso (muitas vezes chamado fluxo laminar) e fluxo molecular, ou seja, entre pressão ambiente e $\approx 10^{-4}$ mbar, é tipicamente calculada de acordo com as expressões a seguir:

onde:

L = condutância do tubo (m^3/h)

S = fluxo vol. no início do tubo (m^3/h)

p = pressão no início do tubo (mbar)

p_{eff} = pressão no final do tubo (mbar)

p_m = pressão média = $(p + p_{\text{eff}})/2$ (mbar)

r = raio do tubo (cm)

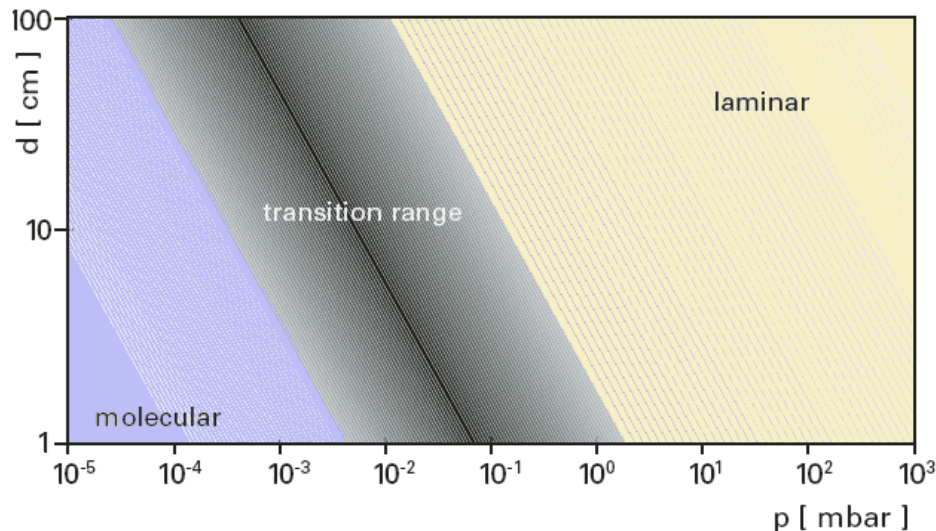
l = comprimento do tubo (cm)

T = temperatura do gas (K)

M = massa molar do gas (kg/kmol)

η = viscosidade do gas (Pa.s)

d = diâmetro do tubo (cm)



Caso Geral

$$L = \frac{3.6 \cdot r^3}{l} \left(0.039 \frac{r \cdot p_m}{\eta} + 30 \sqrt{\frac{T}{M}} \right) [\text{m}^3/\text{h}]$$

Ar 20° C

$$L = \frac{3.6 \cdot r^3}{l} (2150 \cdot r \cdot p_m + 95) [\text{m}^3/\text{h}]$$

Fluxo Viscoso ou Laminar

$$L = 7750 \frac{r^4 \cdot p_m}{l} [\text{m}^3/\text{h}]$$

Fluxo Molecular

$$L = 340 \frac{r^3}{l} [\text{m}^3/\text{h}]$$

Para outros tipos de conexões podemos determinar o comprimento (em metros) de um tubo equivalente, tal como ilustrado pela tabela a seguir:

Nominal width (mm)	10	25	40	63	100	160	200	250	350	500	1000
Y valve	0.12	0.25	0.35	0.35	0.6	1.10	1.35	–	–	–	–
Angle valve	0.1	0.2	0.25	0.3	0.35	0.60	0.85	1.0	1.2	1.6	2.9
Elbow 90°, D = 3d	0.03	0.07	0.12	0.2	0.3	0.5	0.6	0.75	1.0	1.4	2.8

Adicionalmente, a associação serie ou paralelo de elementos, leva a expressões do tipo:

serie

$$L = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}} [\text{m}^3/\text{h}]$$

paralelo

$$L = L_1 + L_2 + L_3 \dots [\text{m}^3/\text{h}]$$

O fluxo volumétrico efetivo, medido no final da tubulação, e a pressão efetivamente atingida neste ponto podem ser obtidas via as expressões:

$$S_{\text{eff}} = \frac{1}{\frac{1}{L} + \frac{1}{S}} = \frac{L \cdot S}{L + S} [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$p_{\text{eff}} = \frac{S \cdot p}{S_{\text{eff}}} [\text{mbar}]$$

EXEMPLO:

Um sistema de bombeamento atinge uma pressão de 0.15 mbar (fluxo viscoso) medida diretamente em sua porta de bombeamento (entrada), sendo sua taxa de fluxo volumétrico igual a 3500 m³/h. A tubulação possui 20 cm de diâmetro e um comprimento de 10 m contendo 3 “cotovelos” e uma válvula em ângulo. Calcule o fluxo volumétrico e a pressão no final da tubulação (na entrada da câmara).

Da tabela acima temos:

Para um “cotovelo” (Elbow) DN200 temos: $l_{equiv} = 0.6 \text{ m}$

Para uma válvula DN200 em ângulo temos: $l_{equiv} = 0.85 \text{ m}$

Desta maneira o comprimento total será: $l = 10 + 3 \cdot 0.6 + 0.85 = 12.65 \text{ m}$

Analisando a expressão que fornece a condutância da tubulação (ao lado) podemos ver que a mesma depende de p_m que em principio não é conhecida.

$$L = \frac{3.6 \cdot r^3}{l} \cdot \left(0.039 \frac{r \cdot p_m}{\eta} + 30 \sqrt{\frac{T}{M}} \right) \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

Evidentemente, p_m deve ser maior que $p = 0.15 \text{ mbar}$, devido a influencia da tubulação. Assumindo, $p_m = 0.17 \text{ mbar}$, obtemos:

$p_m = 0.17$ mbar (valor assumido), $p = 0.15$ mbar e $S = 3500$ m³/h

$$L = 10670 \text{ m}^3/\text{h}, \quad S_{\text{eff}} = 2635 \text{ m}^3/\text{h} \quad \text{e} \quad p_{\text{eff}} = 0.199 \text{ mbar}$$

Assim recalculamos **$p_m = 0.175$ mbar**, tal como num processo iterativo de calculo.

Substituindo este valor no calculo de L e recalculando todos os demais valores obtemos:

$$L = 10978 \text{ m}^3/\text{h}, \quad S_{\text{eff}} = 2655 \text{ m}^3/\text{h} \quad \text{e} \quad p_{\text{eff}} = 0.198 \text{ mbar}$$

Repetindo o calculo iterativamente obtemos:

$$\begin{aligned} L &= \mathbf{10919 \text{ m}^3/\text{h}}, & S_{\text{eff}} &= \mathbf{2650 \text{ m}^3/\text{h}}, \\ p_{\text{eff}} &= \mathbf{0.198 \text{ mbar}} & \text{e} & & p_m &= \mathbf{0.174 \text{ mbar}} \end{aligned}$$

Tais valores coincidem para qualquer valor razoável adotado para p_m !!!!!

O tempo necessário de bombeamento de um volume V (volume livre), partindo de uma pressão inicial p_1 até atingir uma pressão final p_2 , por um sistema que ofereça um fluxo volumétrico S (efetivamente, ou seja, $S = S_{\text{eff}}$) pode ser estimado por:

$$t = \frac{V}{S} \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (\text{horas})$$

EXEMPLO:

Uma câmara de 12 m^3 deve ser evacuada de pressão ambiente ($p_1 = 1 \text{ bar}$) até uma pressão final de $p_2 = 15 \text{ mbar}$ em $t = 0.3 \text{ horas}$. Qual deverá ser o fluxo volumétrico efetivo do sistema de bombeamento?

Aplicando a expressão acima obtemos facilmente $S = 168 \text{ m}^3/\text{h}$!!!!!

Este deverá ser o fluxo volumétrico na entrada da câmara, ou seja, no final da tubulação que conecta as bombas na câmara.

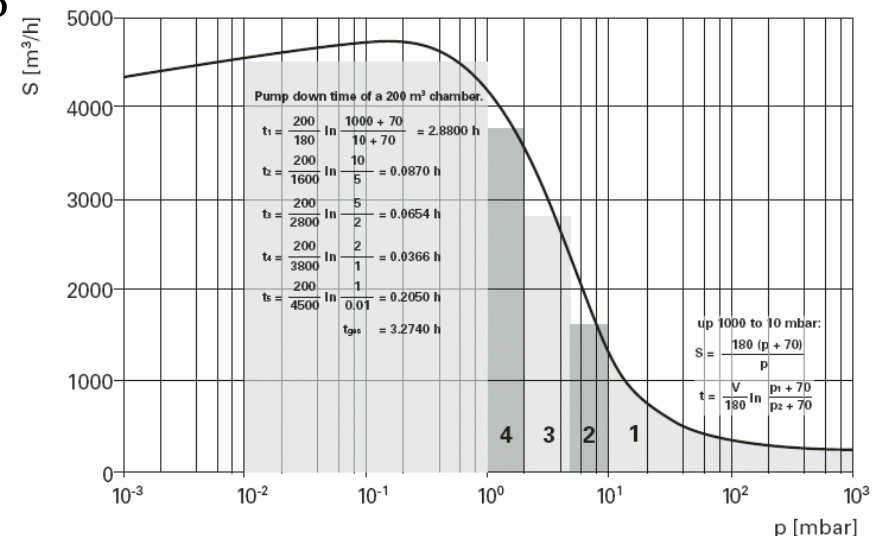
Contudo, as bombas em geral não possuem uma vazão fixa. A vazão de uma bomba depende tipicamente da pressão. Desta forma, um calculo mais preciso de t envolve um calculo por etapas (passos Δp) via a expressão:

$$t = \frac{V}{S} \ln \frac{p_1 + 70}{p_2 + 70} = [h]$$

EXEMPLO:

Uma câmara de 200 m³ deve ser evacuada de pressão ambiente ($p_1 = 1$ bar) até uma pressão final de $p_2 = 10^{-2}$ mbar com uma bomba caracterizada pela curva abaixo. Qual é o tempo de bombeamento?

Aplicando a expressão acima iterativamente, obtemos 3.3 horas!



Na presença de vazamentos, representados por uma razão de vazamento q_L (um throughput que representa uma fonte de gás), o fluxo volumétrico S_{erf} consumida pelo vazamento a uma pressão p é estimado via a expressão:

$$S_{\text{erf}} = \frac{3.6 \cdot q_L}{p} = [\text{m}^3/\text{h}]$$

Então o fluxo efetivamente disponível para o bombeamento será:

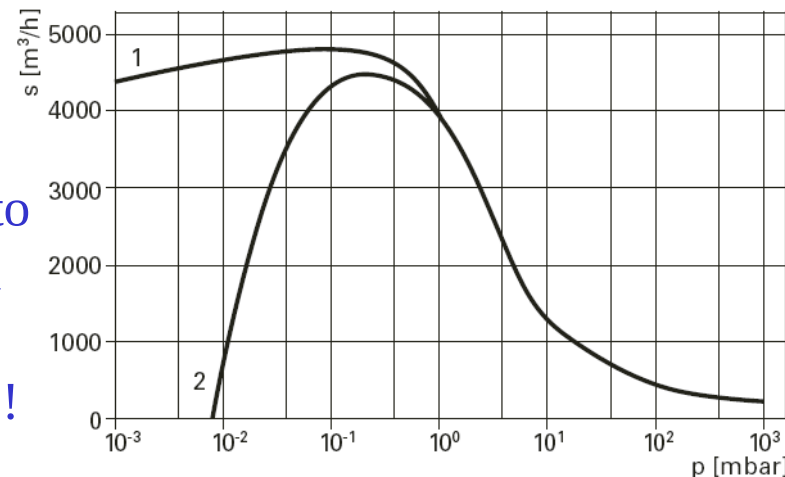
$$S_{\text{eff}} = S - S_{\text{erf}}$$

reduzindo drasticamente a eficiência de bombeamento do sistema.

Portanto, se $q_L = 11.68 \text{ m}^3/\text{h}$ no exemplo anterior, obtemos a curva:

Isto reduz S progressivamente a medida que a pressão cai.

Recalculando t obtemos um aumento de 50% para a faixa de pressão de 1 a 0.01 mbar , sendo a pressão final limitada a $9.4 \times 10^{-3} \text{ mbar}$ ($S_{\text{eff}} = 0$)!



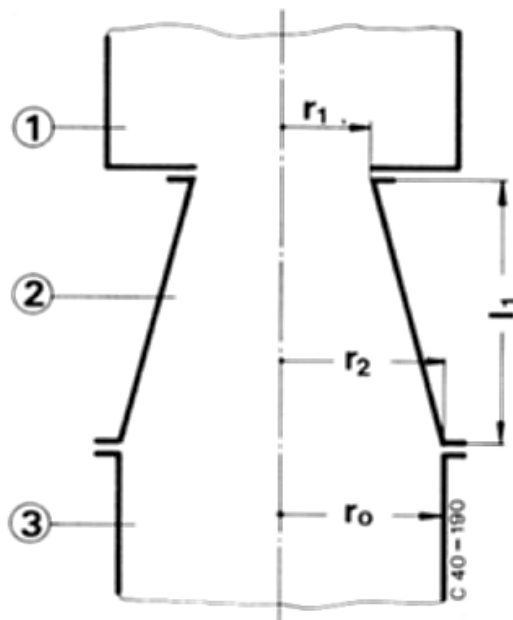
Alto Vácuo

A partir deste momento vamos fazer alguns cálculos para o caso da faixa de alto vácuo, mais especificamente de fluxo molecular. Veremos então que esta faixa de pressão possui algumas particularidades quando comparado com aos casos anteriores.

Lembrando que nesta faixa de pressão (fluxo molecular) o bombeamento é efetuado tipicamente por transferência de momentum para as moléculas do gás residual, a condutância da diversas partes da tubulação é calculada de maneira sensivelmente distinta.

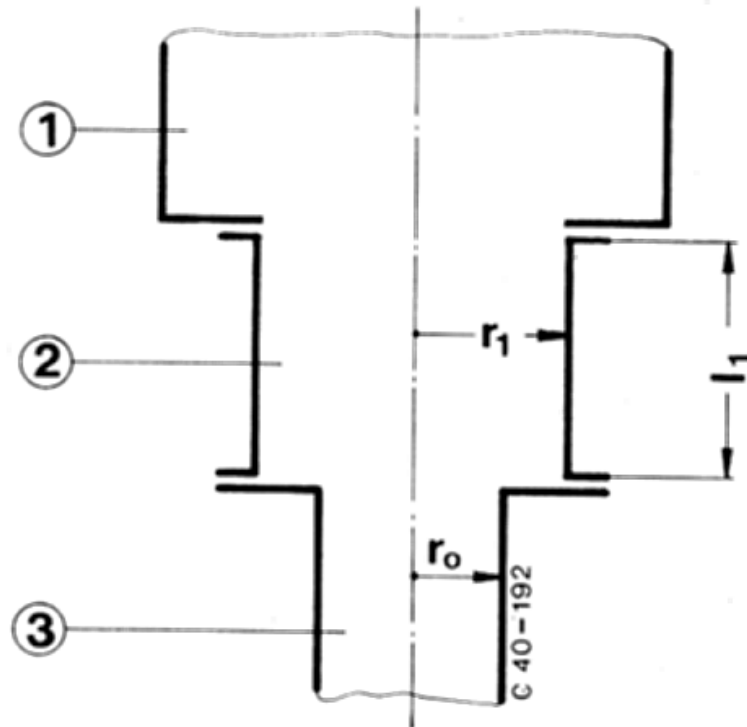
Alguns exemplos úteis, levando em conta ar a 20 °C, são dados nos slides a seguir

Turbo molecular pump with tapered vacuum line; opening of the vacuum chamber smaller than the pump opening



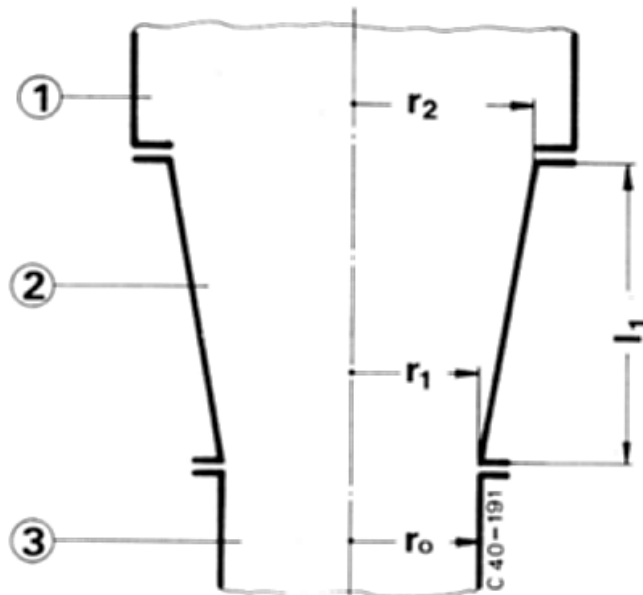
$$L_{\text{ges}} = 96,8 \cdot \frac{1}{\frac{2,67}{r_1^2} - \frac{2,67}{r_0^2} + \frac{l_1}{\left(\frac{r_2 + r_1}{2}\right)^3} \cdot K_k} \quad [\text{l} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Turbo molecular pump with vacuum line of larger nominal diameter



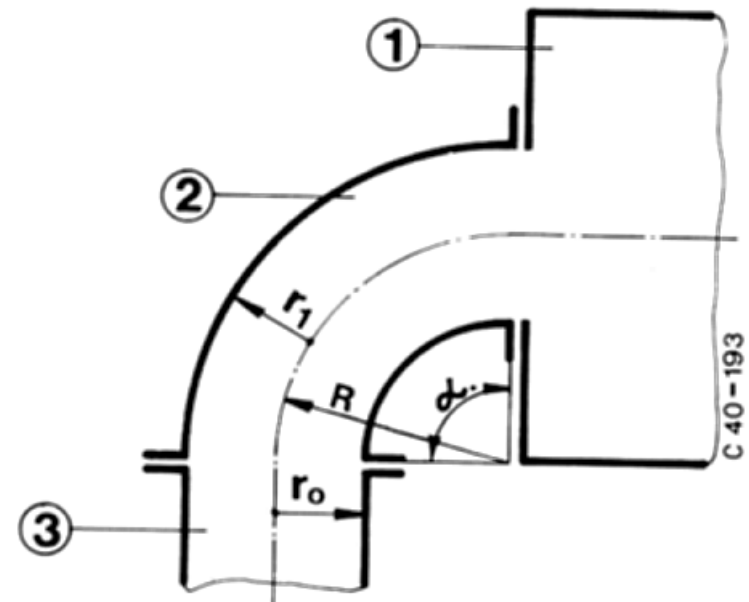
$$L_{\text{ges}} = 96,8 \cdot \frac{r_1^3}{l_1} \quad [\text{l} \cdot \text{s}^{-1}]$$

*Turbo molecular pump with tapered vacuum line;
opening of the vacuum chamber
larger than the pump opening*



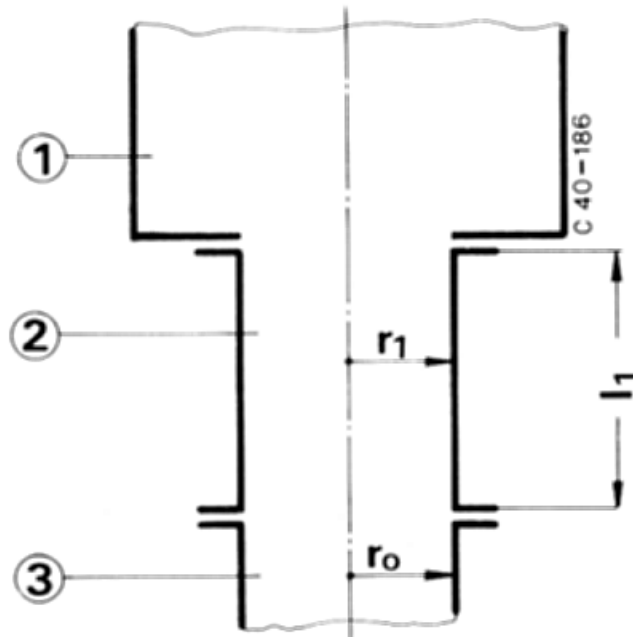
$$L_{\text{ges}} = 96,8 \cdot \frac{\left(\frac{r_2 + r_1}{2}\right)^3}{l_1} \cdot \frac{1}{K_k} \text{ [l} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Turbo molecular pump with elbow



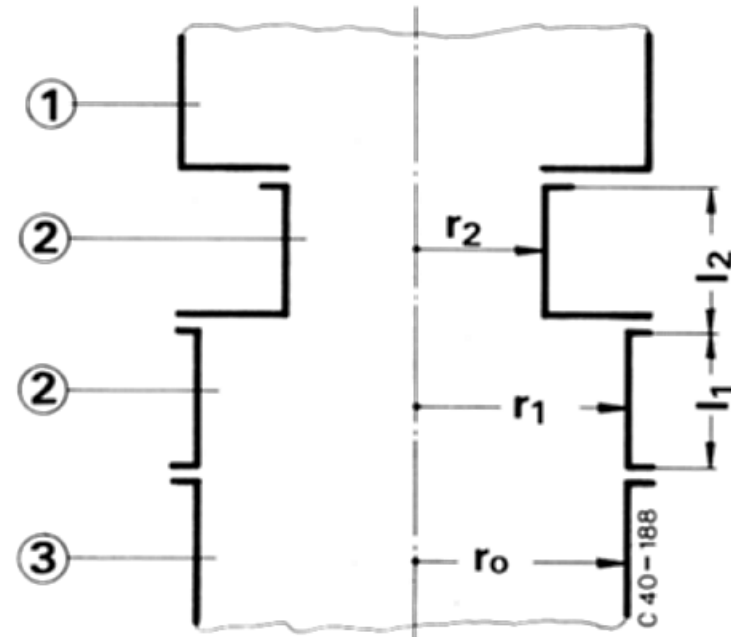
$$L_{\text{ges}} = 96,8 \cdot \frac{1}{\frac{2,67}{r_1^2} - \frac{2,67}{r_o^2} + \frac{l_1}{r_1^3}} \text{ [l} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Turbo molecular pump with vacuum line with the same nominal diameter



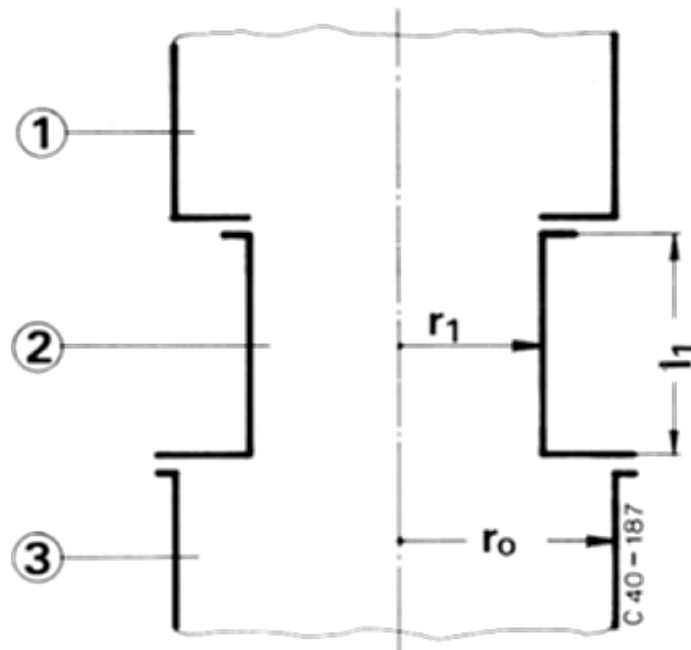
$$L_{\text{ges}} = 96,8 \cdot \frac{r_1^3}{l_1} [\text{l} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Turbo molecular pump with combined vacuum line



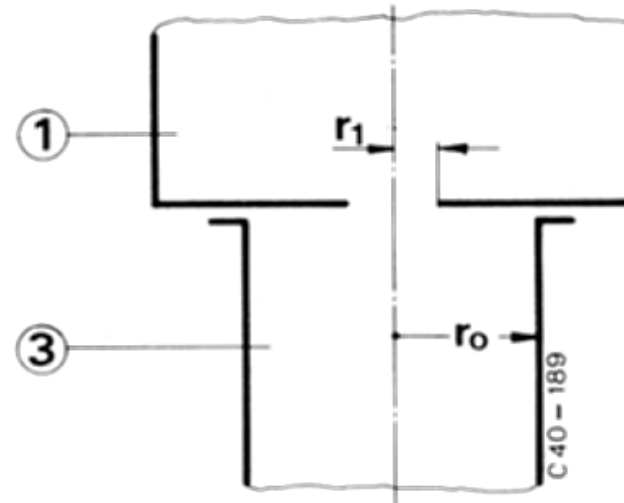
$$L_{\text{ges}} = 96,8 \cdot \frac{1}{\frac{2,67}{r_2^2} - \frac{2,67}{r_o^2} + \frac{l_2}{r_2^3} + \frac{l_1}{r_1^3}} [\text{l} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Turbo molecular pump with vacuum line of smaller nominal diameter



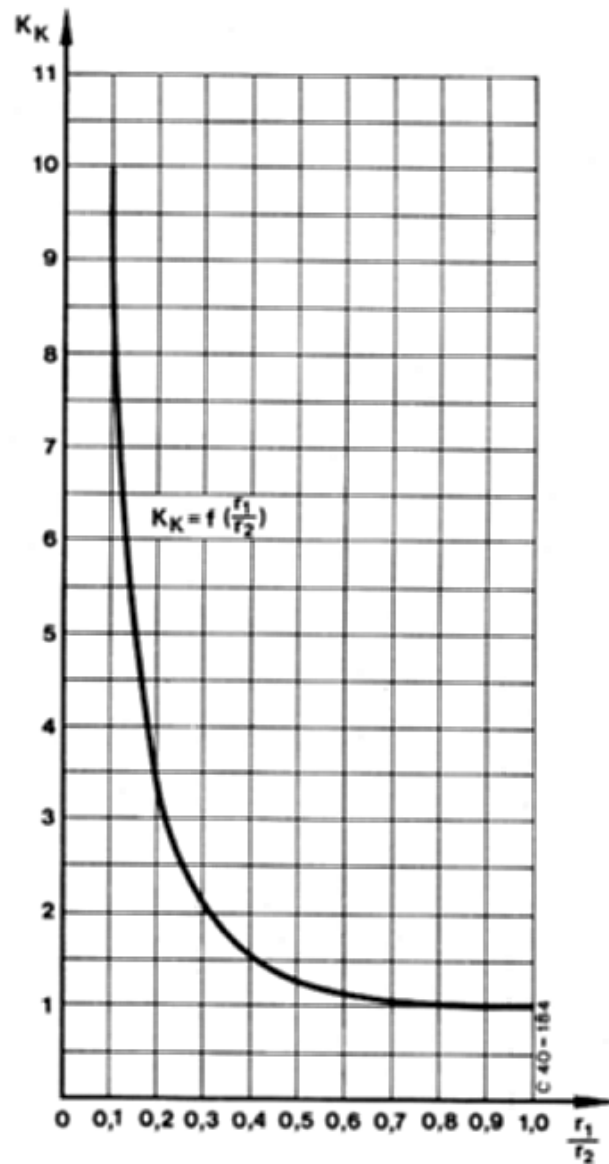
$$L_{\text{ges}} = 96,8 \cdot \frac{1}{\frac{2,67}{r_1^2} - \frac{2,67}{r_0^2} + \frac{l_1}{r_1^3}} \text{ [l} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Turbo molecular pump with orifice plates

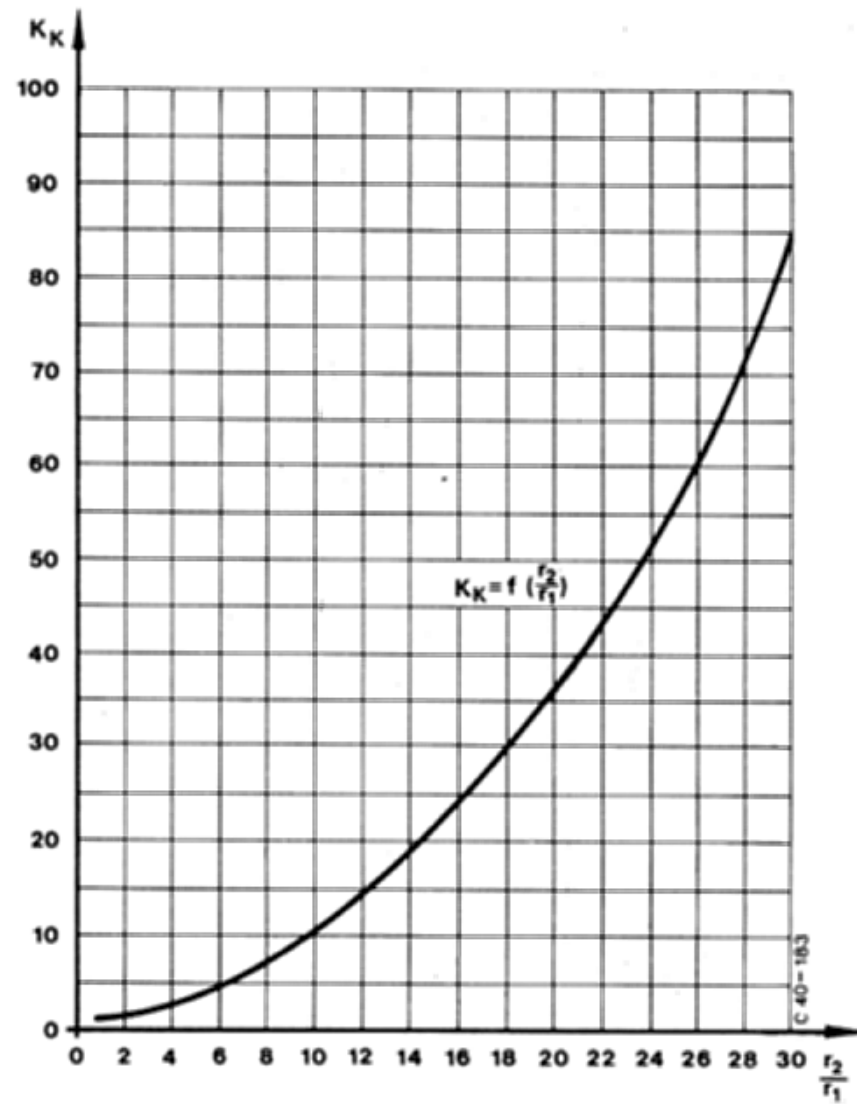


$$L_{\text{ges}} = 36,3 \cdot \frac{1}{\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_0^2}} \text{ [l} \cdot \text{s}^{-1}]$$

O fator de correção K_K é obtido via os gráficos:



$$1 < r_2/r_1 < 6$$



$$6 < r_2/r_1 < 30$$

A condutância L (l/s) de uma tubulação é tipicamente calculada via:

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_{om}} - \frac{1}{L_{op}} + \sum_n \frac{1}{L_n}$$

onde: L_{om} = condutância correspondente ao menor diâmetro presente,
 L_{op} = condutância da “boca” (porta) de entrada da bomba e
 L_n = condutância de cada parte da tubulação.

Em particular L_{ox} é calculado via as expressões:

$$L_o = \frac{c}{4} A \quad c = \sqrt{\frac{8.R.T}{\pi.M}}$$

onde c = velocidade media das partículas (m/s) do gas residual com massa molar M (kg/kmol) a uma temperatura T (K) sendo R = 8314 J/kmol.K, e A = area de abertura. Desta forma $L_{om} = L_o$ (A = menor área transversal da tubulação) e $L_{op} = L_o$ (A = área de abertura da “boca” da bomba). Uma boa aproximação para ar a 20 °C e geometrias circulares é:

$$L_o = 36,3.r^2$$

onde r é o raio correspondente a secção circular de área A em questão.

EXEMPLO:

Um sistema de bombeamento composto por uma bomba Balzers TPH2200 (boca DN250 ISO-KF e vazão de 2200 l/s) é conectada a uma câmara pela tubulação ilustrada abaixo. Calcule a condutância da tubulação e obtenha a vazão efetiva via a expressão: $S_{\text{eff}} = S.L / (S + L)$

Sendo $L_{\text{om}} = 36,3.r_2^2$ e $L_{\text{op}} = 36,3.r_4^2$ e utilizando as expressões anteriores para cada parte tubulação obtemos:

$$L_{\text{om}} = 2042 \text{ l/s}; L_{\text{op}} = 5672 \text{ l/s}; L_1 = 3781 \text{ l/s}; \\ L_2 = 4209 \text{ l/s}; L_3 = 650 \text{ l/s} \text{ e } L_4 = 4840 \text{ l/s}$$

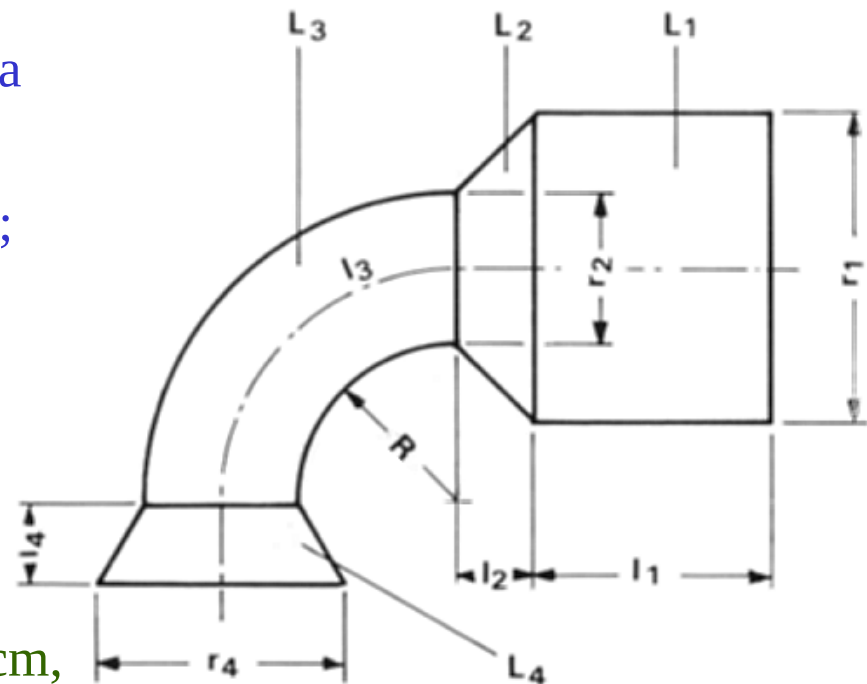
e assim obtemos:

$$L = 391 \text{ l/s}$$

e portanto:

$$S_{\text{eff}} = 332 \text{ l/s}$$

Dados: $r_1 = 12,5 \text{ cm}$, $r_2 = 7,5 \text{ cm}$, $r_4 = 12,5 \text{ cm}$,
 $l_1 = 50 \text{ cm}$, $l_2 = 20 \text{ cm}$, $l_4 = 20 \text{ cm}$, $R = 40 \text{ cm}$.

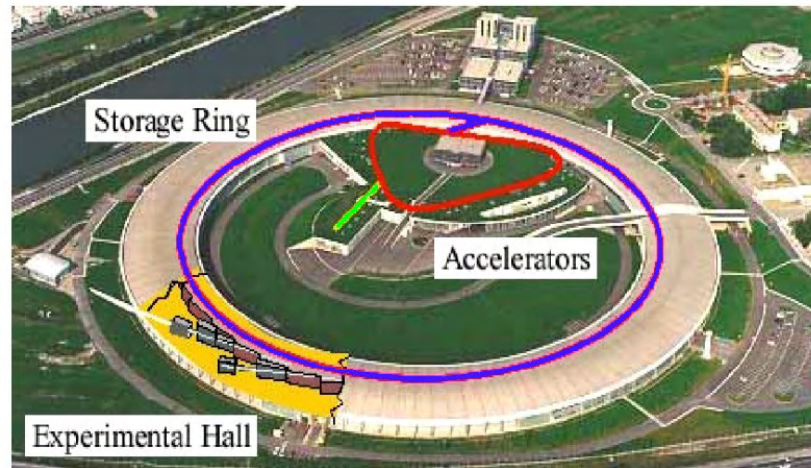


O tempo de bombeamento é altamente dependente do sistema de bombeamento e das características específicas da câmara. Para bombas turbo ver ref. (*) Pfeiffer.

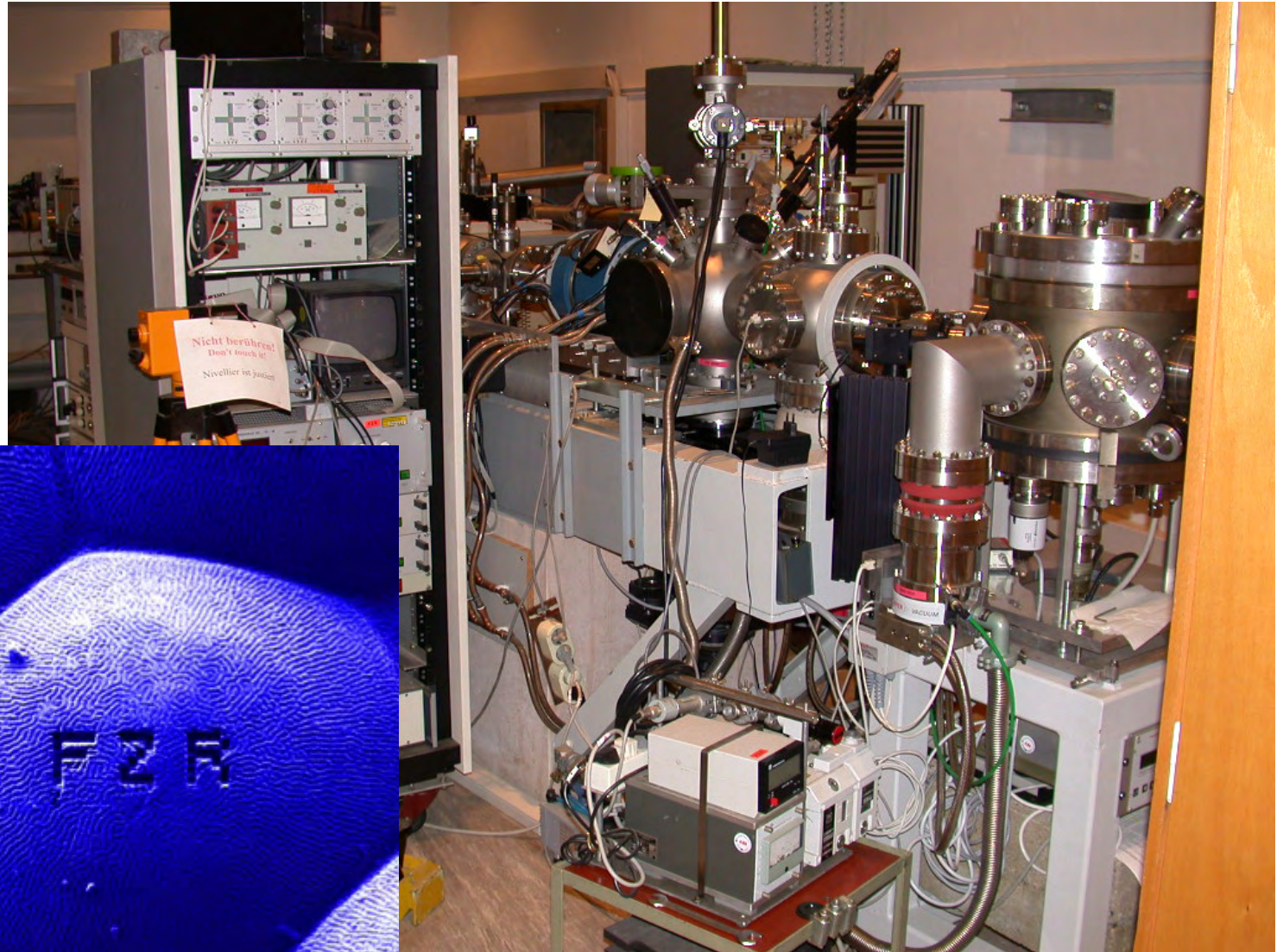
Pesquisa e Desenvolvimento



Synchrotron Radiation Source
ESRF at Grenoble (France)

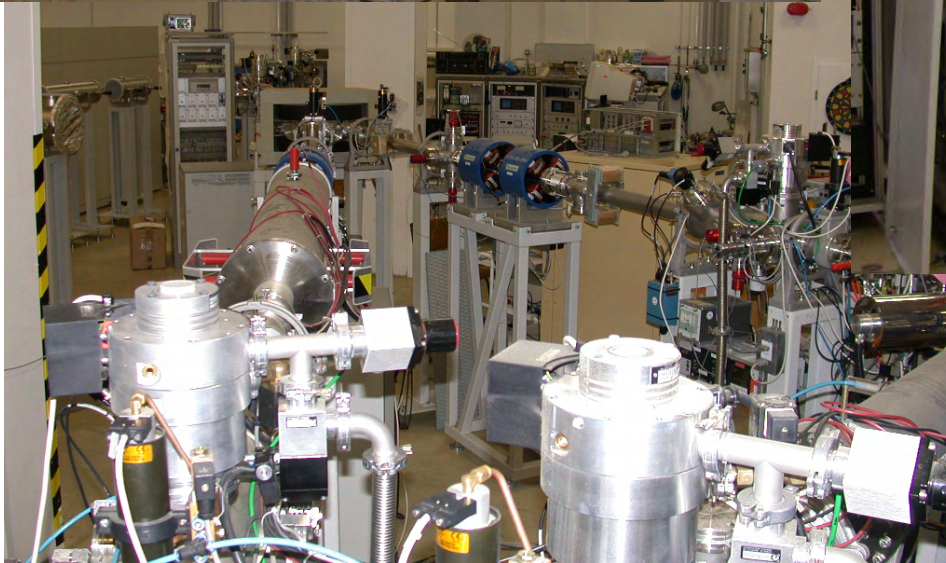
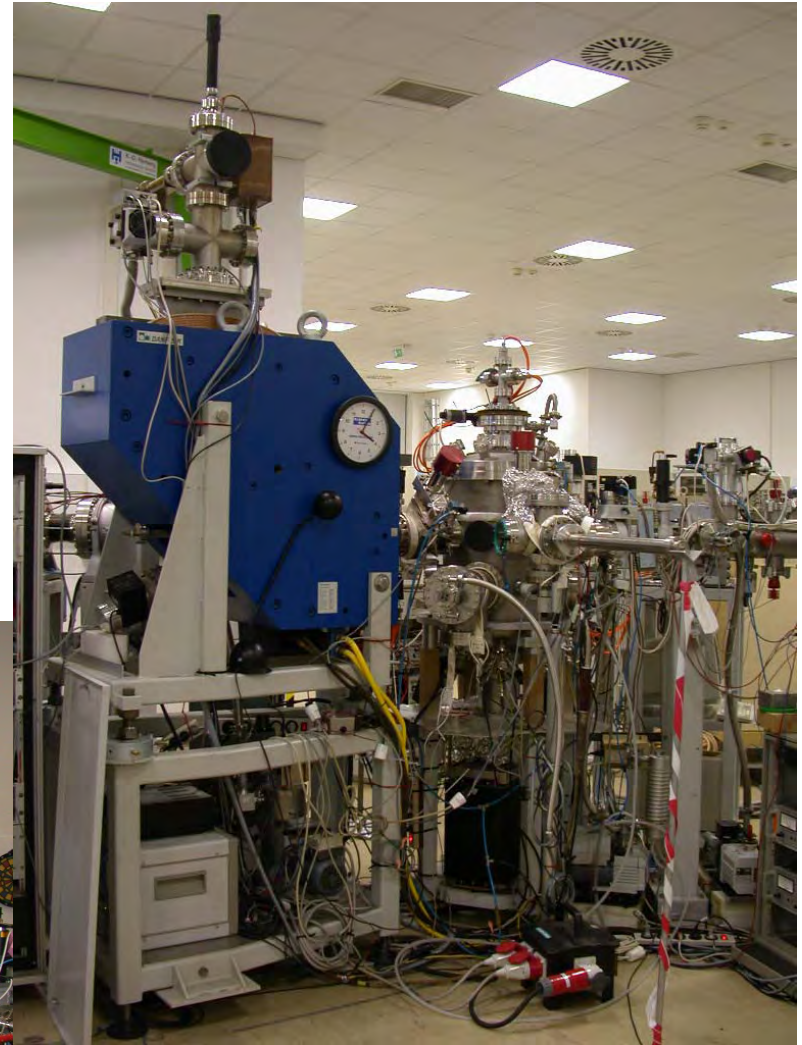
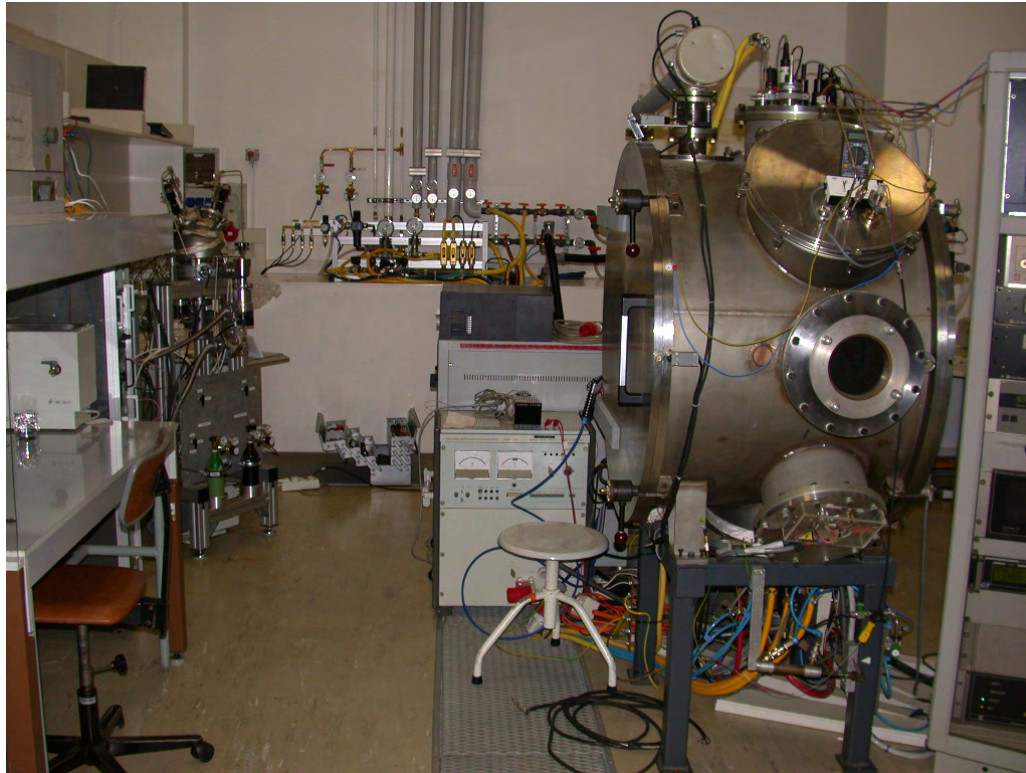


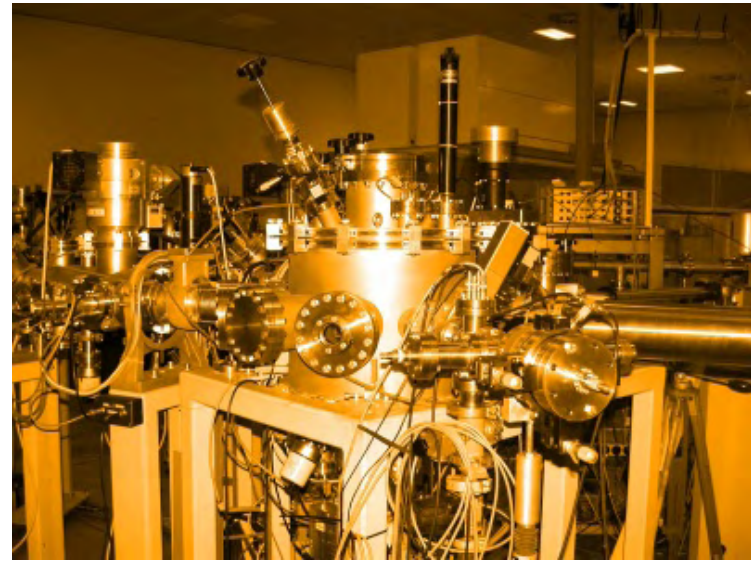
LNSL - Brasil



Eye of a fly

8 μm

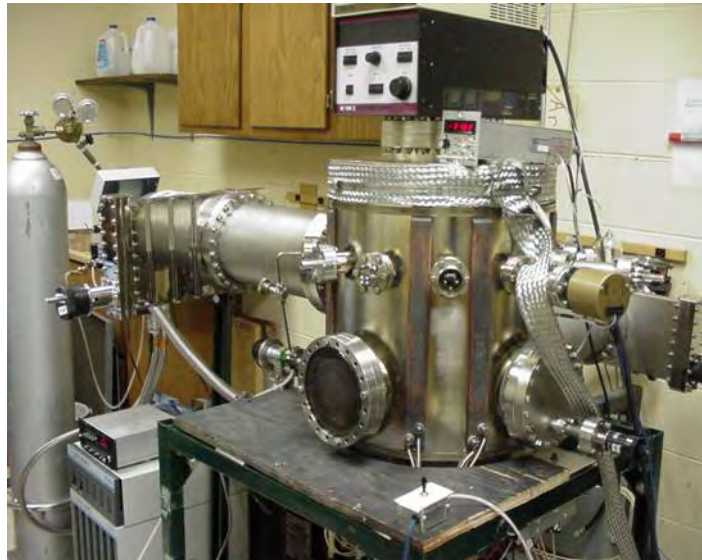


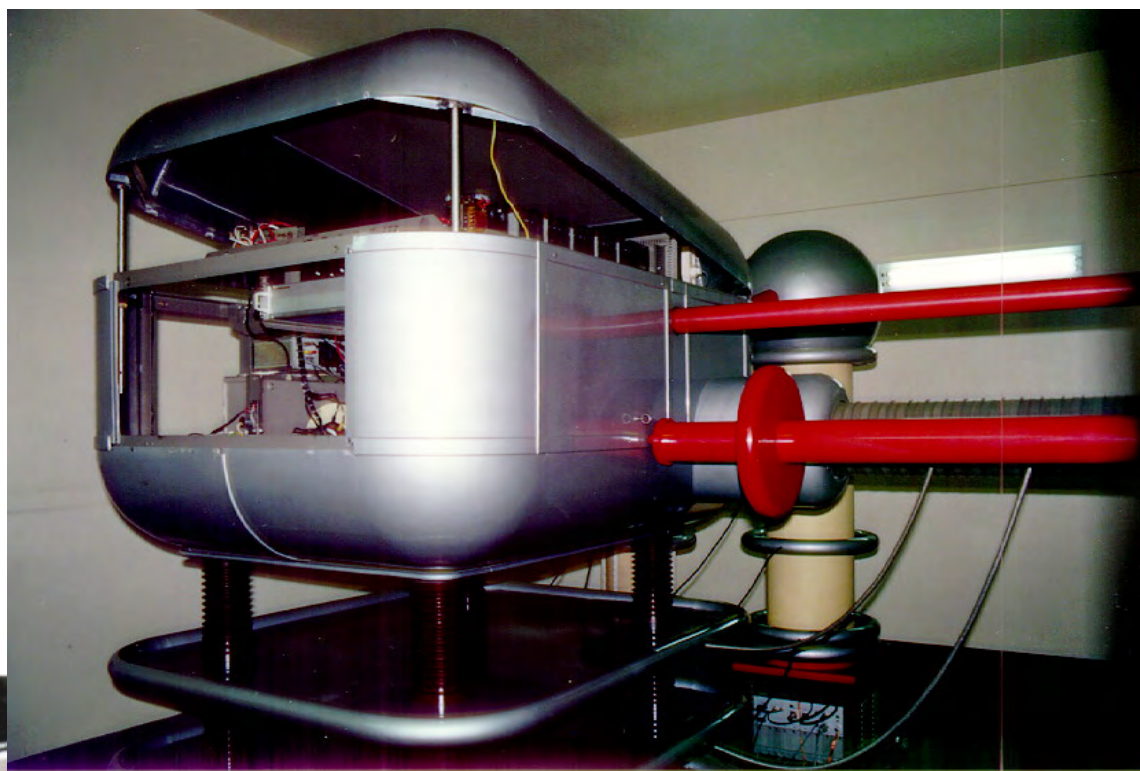


Microscopia Eletrônica



Microeletrônica





Analises



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.
(disponível no website da empresa Pfeiffer Vacuum)
- Working with turbo molecular pumps, ed. Pfeiffer Vacuum (*).
(disponível no website da empresa Pfeiffer Vacuum)
- Vacuum technology, ed. Leybold Vacuum