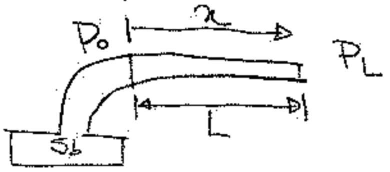
Ciência e Tecnologia do Vácuo

- 2024 -

passar lista

Resumo da aula anterior

Perfil da pressão ao longo do tubo



$$P_x = P_0 + qB\left[\frac{x}{c} - \frac{x^2}{2Lc}\right]$$

$$\boxed{P_L - P_0 = \frac{qBL}{2C}}$$

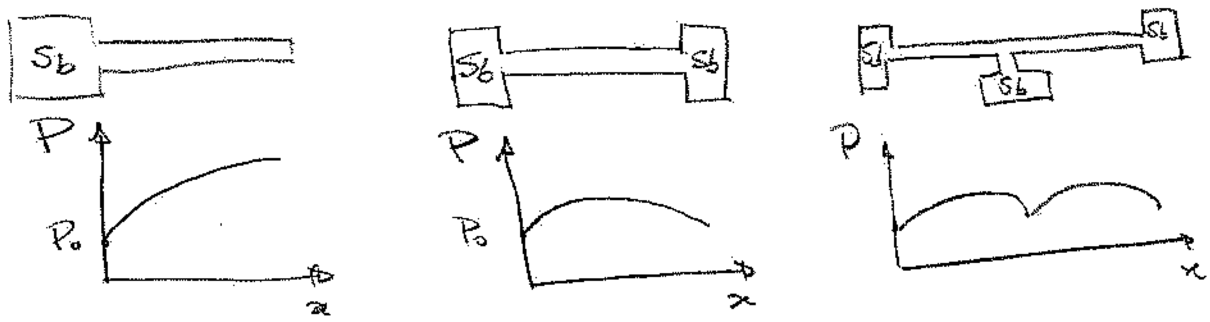
NÃO DEPENDE DA PRESSÃO

$$P_0 = \frac{qBL}{S_b}$$

Condições de contorno

$$\left.\frac{dP}{dx}\right)_{x=L} = 0$$

$$x = 0 \rightarrow P_L = P_0$$



Estudo de Vazamentos

- Vazamento Real
- Vazamento Virtual

Regime viscoso

$$S_{ef} = \frac{S_b \, C_{viscoso}}{S_b + C_{viscoso}} \Rightarrow \boxed{S_{ef} \sim S_b}$$

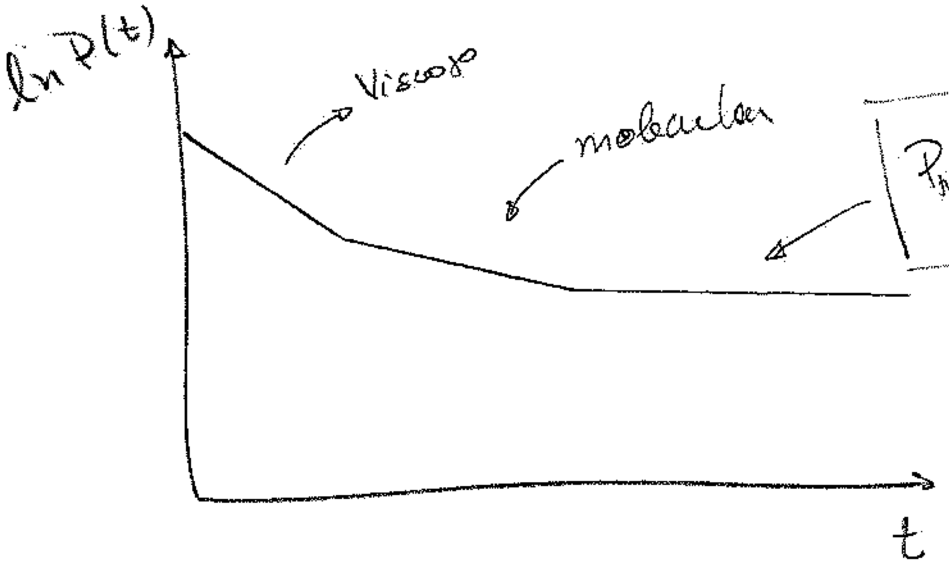
Regime molecular

$$\boxed{S_{ef} = \frac{S_b \, C_{molecular}}{S_b + C_{molecular}}}$$

valor depende da condutância

Constante de decaimento $\boxed{\tau = V/S}$

depende de S, logo:



$$\boxed{P_{res} = \frac{\sum_i Q_i}{S}}$$

Vazamento real

pequeno

$$Q_v = C\Delta P = C_v\,(P_{ext} - \cancel{P_{int}})$$

$$P_{ext} \gg P_{int}$$

$$P_{res} = \frac{\sum_i Q_i}{S}$$

$$P_{res} = \frac{Q_v}{S} = \frac{C_v\,P_{ext}}{S}$$ mas $P_{ext} \sim P_{atm}$

então $$\boxed{P_{res} = \frac{C_v\,P_{atm}}{S}}$$

Vazamento virtual

CAVIDADE + ORIFÍCIO PEQUENO ≡ VAZAMENTO VIRTUAL

$C_{vv} \ll S_b$ equação geral $$\boxed{-V\frac{dP}{dt} = PS - \sum_i Q_i}$$

Analogamente, podemos escrever

$$-V\frac{dP_c}{dt} = Q_{vv}$$

$$Q_{vv} = C_{vv}\,(P_c - P_{int})$$ $P_c \gg P_{int}$, logo:

$$Q_{vv} = C_{vv}\,P_c$$

então, $$-V_c\frac{dP_c}{dt} = C_{vv}\,P_c$$

equação diferencial

$$\frac{dP_c}{dt} = -\frac{C_{vv}}{V_c} P_c$$

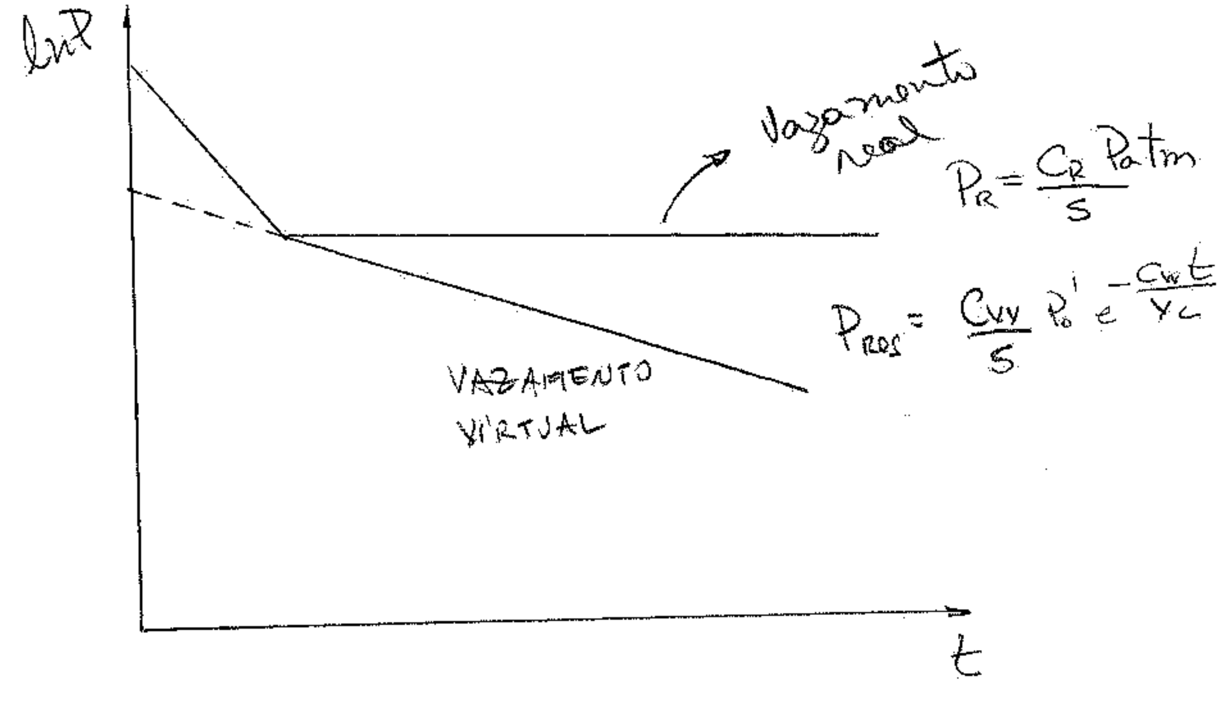
solução $\boxed{P_c = P_o' \, e^{-\frac{C_{vv}}{V_c} t}}$

A pressão residual será $P_{res} = \frac{Q_{vv}}{S}$, então

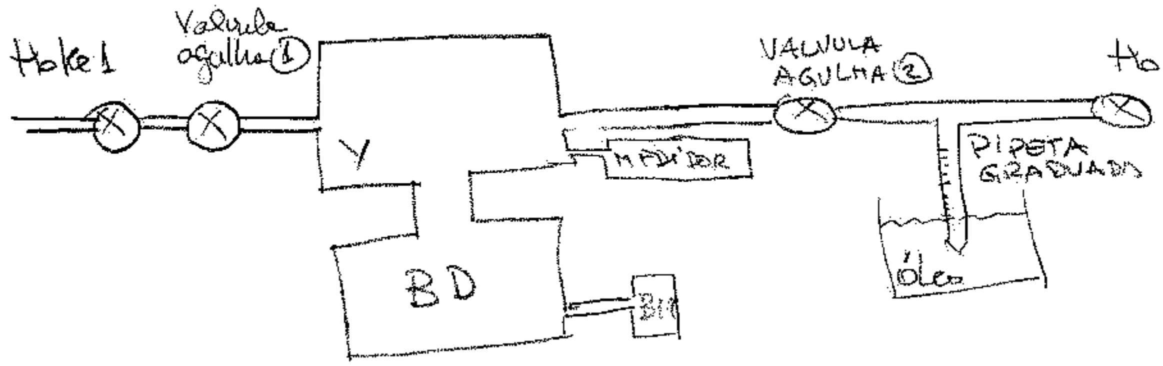
$$P_{res} = \frac{C_{vv} P_c}{S} \Rightarrow \boxed{P_{res} = \frac{C_{vv}}{S} P_o' \, e^{-\frac{C_{vv} t}{V_c}}}$$

$\frac{C_{vv} P_o'}{S}$ é constante $\quad P_o' \sim P_{atm}$

Mostrar slide



Sistema para o Estudo de Vazamentos



① Medida da pressão em função do tempo $P(t)$

ⓐ Bombeamento até 10^{-6} Torr

ⓑ Todas as válvulas fechadas.

ⓒ Abrindo-se a válvula agulha ①, a pressão pode ser ajustada até 10^{-3} Torr. A válvula Hoke 1 deve estar aberta.

ⓓ Fechando-se a válvula agulha ① pode-se medir a pressão em função do tempo $P(t)$.

② Simulando um vazamento real

ⓐ Bombeamento até 10^{-6} Torr

ⓑ Através da válvula agulha ①, eleva-se a pressão até 10^{-5} Torr

ⓒ Com a válvula agulha ② aberta, a pressão pode atingir um valor de pressão mais alto ($P \sim 10^{-3}$ Torr)

ⓓ Fechando-se a válvula agulha ② pode-se medir $P(t)$ com a valvula Hoke ① aberta. Neste caso, estamos simulando um vazamento real.

③ Simulando um vazamento virtual

Nas mesmas condições do item anterior, com a válvula Hoke ② $\boxed{\text{FECHADA}}$ estamos simulando um vazamento <u>VIRTUAL</u>

Parâmetros do Sistema

MOSTRAR SLIDE

- Sistema sem vazamento
- Vazamento real
- Vazamento virtual

CÁLCULOS DE SITUAÇÕES REAIS

(a) Bombeamento até $P = 10^{-6}$ Torr

Com a válvula agulha (1) a pressão é elevada até 10^{-5} Torr
Com a válvula agulha (2) a pressão é elevada até 8×10^{-4} Torr
Fechando-se a válvula agulha (2) foi medida a pressão em função do tempo $P(t)$

Com a válvula Hoke (1) aberta simulamos vazamento REAL
Com a válvula Hoke (2) fechada temos vazamento VIRTUAL

Ref Apostila Helcio Onusic e Luiz Marcos Fagundes.

(1) VAZAMENTO REAL (VIDE GRÁFICO)

$$P_{res} = \frac{C_R \, P_{atm}}{S} \qquad C_R = \frac{P_{res} \times S}{P_{atm}}$$

$$C_R = \frac{10^{-5}(S)}{700}$$ sendo $S = 50$ l/s (vide gráfico)

$$C_R = \frac{10^{-5}(50)}{700} \Longrightarrow C_R = 7 \times 10^{-7} \, l/s$$

Mas, $C_o = 9D^2$

$$D^2 = \frac{7 \times 10^{-7}}{9}$$

$$\therefore \boxed{D \cong 2{,}8 \times 10^{-4} \text{ cm}}$$

ou 2,8 μm

② VAZAMENTO VIRTUAL

Simula-se fechando a válvula Hoke ①.

$S = 50\ \ell/s$ (valor medido)

$$\boxed{P_{res} = \frac{C_{xx} P_0'}{S} e^{-\frac{C_{xv}}{V_c} t}}$$

Podemos estimar o valor da cte $\frac{C_i P_0'}{S}$ diretamente do gráfico

$$\frac{C_{xv} P_0'}{S} = 10^{-5}$$

$$C_{xx} = \frac{50 \times 10^{-5}}{700} \Longrightarrow \boxed{C_{xx} = 7 \times 10^{-7}\ \ell/s}$$

$$P_{res} = \frac{C_{xv} P_0'}{S} e^{-\frac{C_{vv}}{V_c} t} \longrightarrow P_{res} = P' e^{-\frac{C_{vv}}{V_c} t}$$

$P' = \frac{C_{xv} P_0'}{S} = 10^{-5}$ Torr (leitura do gráfico)

$P_{res} = 7 \times 10^{-6}$ Torr em $1000\,s$ (≈ 17 minutos)

$$\ln \frac{P_{res}}{P'} = \ln e^{-\frac{C_{vv}}{V_c} t} \Longrightarrow \ln \frac{P_{res}}{P'} = -\frac{C_{vv}}{V_c} t$$

$$\ln \frac{P'}{P_{res}} = \frac{C_{vv}}{V_c} t \Longrightarrow V_c = \frac{C_{vv} t}{\ln \frac{P'}{P_{res}}}$$

$$V_c = \frac{7 \times 10^{-7} (1000)}{\ln \frac{10^{-5}}{7 \times 10^{-6}}} = 2 \times 10^{-3}\ \ell$$

$$\therefore \boxed{V_c = 2\,m\ell}$$

Exercício: Vazamento Virtual

ⓐ Qual o tempo para esse sistema atingir a pressão sem vazamento de $P_0 = 2\times10^{-6}$ Torr?

$$P = P_0' e^{-\frac{C_{vv}}{V_c} t}$$

$$\ln \frac{P}{P_0'} = -\frac{C_{vv}}{V_c} t \implies \text{invertendo} \quad \ln \frac{P_0'}{P} = \frac{C_{vv}}{V_c} t$$

$$\therefore \boxed{t = \frac{V_c}{C_{vv}} \ln \frac{P_0'}{P}}$$

Substituindo os valores $\quad t = \dfrac{2\times10^{-3}}{7\times10^{-7}} \ln \dfrac{10^{-5}}{2\times10^{-6}}$

$$\boxed{t = 4598\ \text{s}} \implies t \sim 1{,}3 \text{ horas}$$

ⓑ Qual o diâmetro da abertura equivalente?

$$C_0 = 9D^2 \qquad D^2 = \frac{7\times10^{-7}}{9} \qquad D = 3\times10^{-4}\ \text{cm} \qquad D \sim 3\ \mu m$$

OBS. Os vazamentos virtuais não são fáceis de serem detectados por estarem no interior das câmaras de vácuo e acarretarem uma queda de pressão muito lenta.

Deve-se sempre ter muito cuidado para se evitar a formação de cavidades internas conectadas ao sistema através de grandes impedâncias.

Exercício 2: Vazamento Virtual

ⓐ Suponha $V_c = 10^{-5}\ell$ conectado a um capilar de diâmetro $D = 10^{-4}$cm (1μm) e comprimento $L = 2$cm

Qual o tempo necessário para a pressão cair por um fator 10 no regime molecular?

$$P = P_0' \, e^{-\frac{C_{vv}}{V_c}t} \qquad \boxed{t = \frac{V_c}{C_{vv}} \ln \frac{P_0'}{P}}$$

$$C_{vx} = \frac{12 D^3}{L} = 6 \times 10^{-12} \ell/s$$

$V_c = 10^{-5}\ell$ então $t = \dfrac{10^{-5}}{6 \times 10^{-12}} \ln 10 \Rightarrow \boxed{t = 44 \text{ dias}}$

ⓑ Na pressão atmosférica, qual o número de moléculas nessa cavidade a $T = 300$ K?

$$PV = NkT \qquad N_v = \frac{PV}{kT} \qquad V_c = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\frac{\pi D^3}{8} = \frac{\pi D^3}{6}$$

$$\begin{cases} k = 10^{-22} \dfrac{\text{Torr}\,\ell}{K} \\ k = 10^{-19} \dfrac{\text{Torr cm}^3}{K} \end{cases} \qquad N_v = \frac{700^{\text{Torr}} (10^{-5})^{\ell}}{10^{-22}\, 300} \Rightarrow \underline{N_v = 2 \times 10^{17} \text{ moléculas}}$$

ⓒ Qual a área equivalente que teria esse número de moléculas em uma monocamada? $\delta_{N_2} = 3{,}7 \times 10^{-8}$cm

Área ocupada por uma molécula $A = \dfrac{\pi \delta^2}{4}$

Monocamada $\dfrac{\text{nº de partículas}}{\text{cm}^2} = \dfrac{1}{A} = \dfrac{4}{\pi \delta^2} \sim 10^{15}$ moléculas/cm²

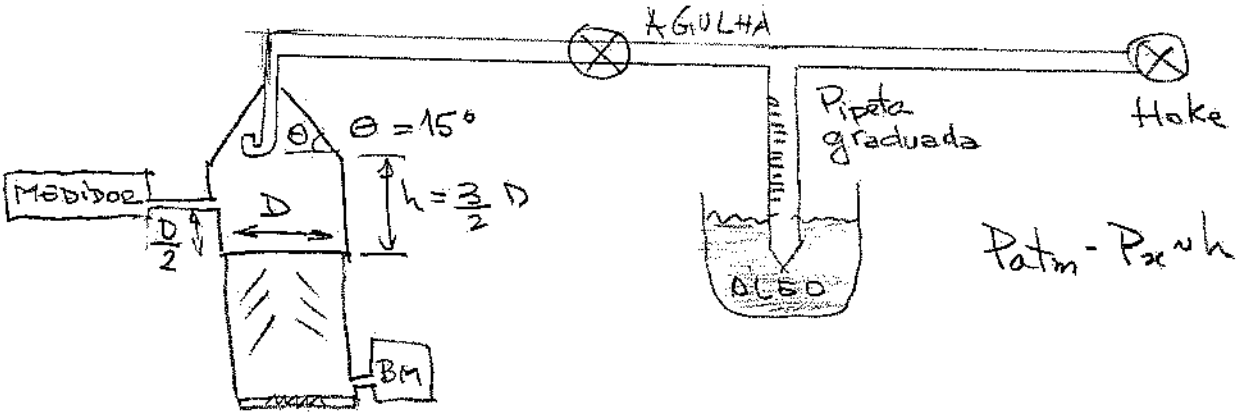
A área total equivalente para se ter 2×10^{17} moléculas seria então uma área de 200 cm²

Ou seja uma placa de (20 × 10) cm² !!

Método da Pipeta

Método utilizado para a medida da velocidade de bombeamento e condutâncias.

Norma internacional



$P_{atm} - P_x \sim h$ $\left\{ \text{altura da coluna de óleo} \right.$

Fluxo de massa ou throughput é constante ao longo do sistema. $\boxed{Q = PS}$

$$Q = P_S S = P_x \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

$$P_{atm} - P_x = h$$ $\left\{ \text{h é a altura da coluna de óleo} \right.$

$P_{atm} \sim 700$ Torr (em São Paulo)

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{Hg} = 13,6 \text{ g/cm}^3 \\ \rho_{oleo} = 0,84 \text{ g/cm}^3 \end{array} \right.$$

2 cm oleo ~ 0,1 cm de Hg

$$\rho_{oleo} \times h_{oleo} = y_{Hg} \, \rho_{Hg}$$

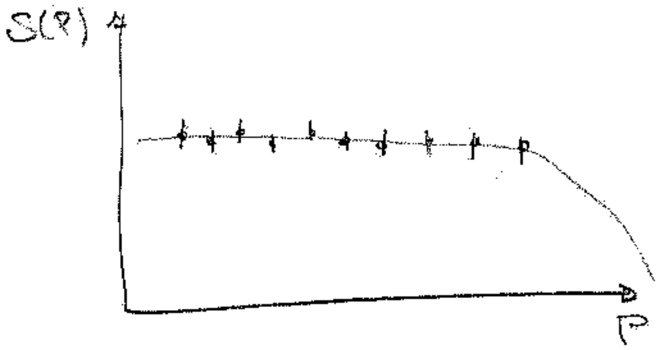
$$\frac{\rho_{Hg}}{\rho_{oleo}} \sim 20$$

então $y_{Hg} \sim 0,1$ cm ou 1 mm Hg

$$\boxed{P_{ATM} = 11,25 \text{ m de oleo}}$$

$$Q = P_s S = P_{atm} \frac{\Delta V}{\Delta t} \qquad Q \equiv cte$$

Velocidade de bombeamento $S(P)$



$$\boxed{S_b = \frac{P_{atm}}{P_s} \frac{\Delta V}{\Delta t}}$$

Mas, $P_{res} = \frac{Q_G}{S}$ $\therefore$ $\boxed{Q_G = P_{res} S}$

então $Q = P_s S = P_{atm} \frac{\Delta V}{\Delta t} + P_{res} S$

$$S (P_s - P_{res}) = P_{atm} \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

$$\therefore \quad \boxed{S = \frac{P_{atm}}{(P_s - P_{res})} \frac{\Delta V}{\Delta t}}$$

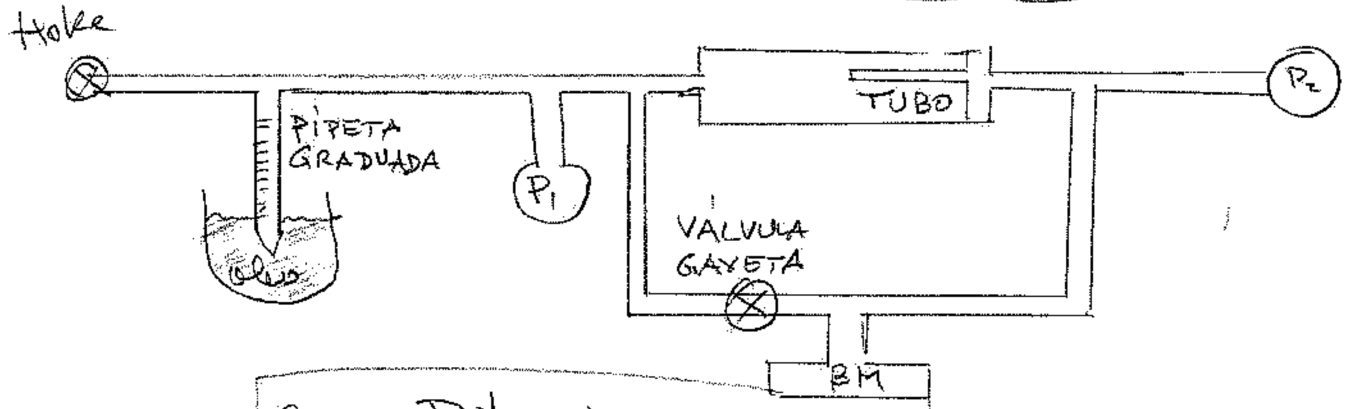
No laboratório deve-se medir P_{res} com todas as válvulas fechadas <u>antes</u> e <u>depois</u> das medidas!

Medidas da Condutância

Método da Pipeta

$$C_{AB} = \frac{1}{Z_{AB}} = \frac{Q}{P_A - P_B}$$

$$C_{exp} = \frac{PS}{P_A - P_B}$$



$$\boxed{C_{exp} = P_{atm} \frac{\Delta V}{\Delta t} \frac{1}{P_1 - P_2}}$$

P_1 res ≠ P_2 res

(a) O que significa a condutância

$$Q = C\Delta P = C(P_{atm} - \underbrace{P_c}_{\text{pequeno}}) = \frac{\Delta V}{\Delta t} P_x$$

$$Q = C P_{atm} = \frac{\Delta V}{\Delta t} P_x$$

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta t} \frac{P_x}{P_{atm}}$$

mas $P_x \sim P_{atm}$

então $C \sim \dfrac{\Delta V}{\Delta t}$

(b) Por que o método funciona?

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} \simeq \frac{10^{-3}\,\ell}{700\ \text{Torr}\,s} \simeq 10^{-6}\,\ell/s$$

$$10^{-6}\,\ell/s \sim 10^{-3}\,\frac{m\ell}{s} \sim 10^{-3}\,m\ell \times \frac{60}{min}$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} \sim 0{,}1\,m\ell/min$$ quantidade mensurável

A válvula agulha estrangula o sistema!

Condutâncias

Regime viscoso $C_{N_2} = \dfrac{180 D^4 \bar{P}}{L}$

Regime molecular $C_{N_2} = \dfrac{12 D^3}{L}$

Intermediário

$$C_{int} = C_V + \alpha C_m$$

$$C_{int} = C_m \left(\frac{0{,}074 D}{\bar{\lambda}} + 1 \right)$$

$$\alpha = \frac{1 + \frac{1{,}25 D}{\bar{\lambda}}}{1 + \frac{1{,}55 D}{\bar{\lambda}}}$$

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

Lista 2 - Ex. 13

Determine a expressão da condutância de um orifício para temperaturas diferentes

P_1	P_2
T_1	T_2

$T_1 \neq T_2$

$$Q = P\frac{\Delta V}{\Delta t} = kT\frac{\Delta N}{\Delta t} \qquad \nu = \frac{\text{nº de moléculas}}{\text{área} \times \text{tempo}} = \nu = \frac{1}{4} n \bar{v}$$

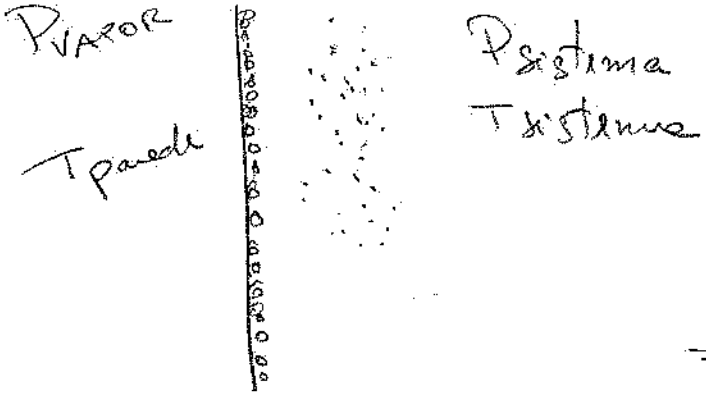
$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \nu A \quad \therefore \quad Q = kT\nu A = kT\frac{1}{4} n \bar{v} A \quad \begin{cases} \bar{v} = \sqrt{\dfrac{8kT}{\pi m}} \\ n = \dfrac{P}{kT} \end{cases}$$

$$Q_T = Q_1 - Q_2$$

$$Q_T = \sqrt{\frac{k}{2\pi m}}\, A\left(\sqrt{T_1}\,P_1 - \sqrt{T_2}\,P_2\right)$$

$$Q_T = C\Delta P \implies Q = C\,(P_1 - P_2)$$

$$C = A\sqrt{\frac{k}{2\pi m}}\left(\frac{\sqrt{T_1}\,P_1 - \sqrt{T_2}\,P_2}{P_1 - P_2}\right)$$



É possível estimar o bombeamento de superfícies frias

→ Envolve a probabilidade de adesão