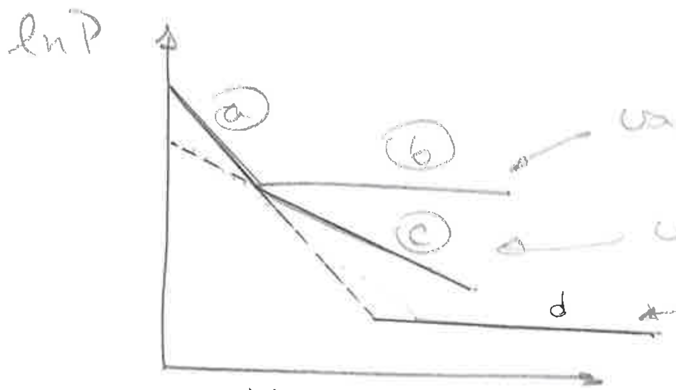
Passar lista de presença / lista INPE

Aviso: Prova na próxima aula
trazer lápis, borracha, calculadora, régua
e muita disposição.

Resumo das aulas anteriores

- Sistema para o estudo de vazamento $\begin{cases} \text{VIRTUAL} \\ \text{REAL} \end{cases}$



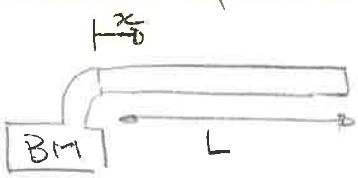
(a) $P = P_0 e^{-t/\tau}$ $(\tau = V/S)$

(b) $P_r = \dfrac{C_r P_{atm}}{S}$ ≡ VAZAMENTO REAL

(c) $P_{res} = \dfrac{C_{vv}}{S} P_0' e^{-\frac{C_{vv}}{V_c} t}$ ≡ VAZAMENTO VIRTUAL

(d) $P_{res} = \sum Q_i / S$

Perfil da pressão ao longo do tubo

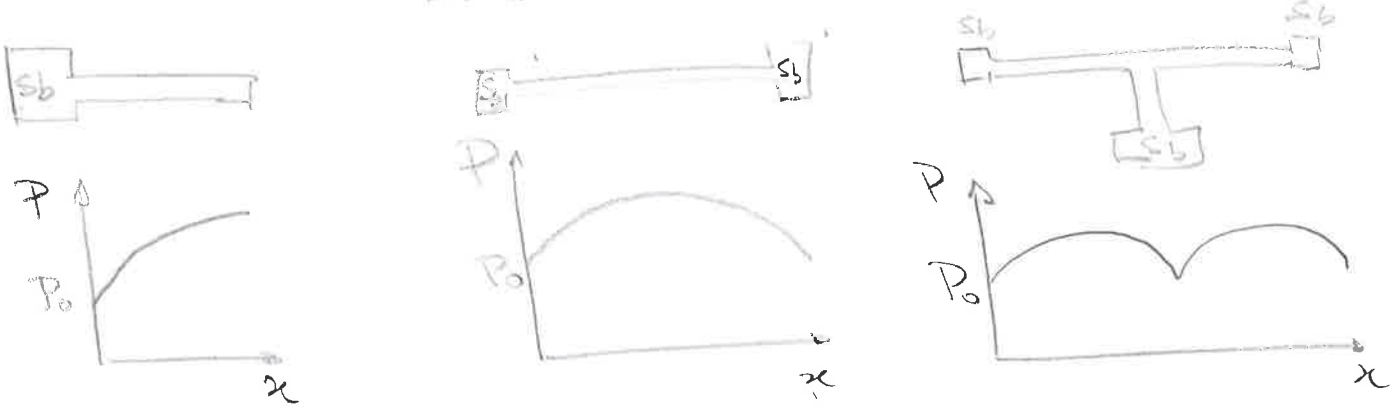


$$P_x = P_0 + qB\left[\frac{x}{C} - \frac{x^2}{2LC}\right]$$

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

Condições de contorno

(1) $\left.\dfrac{dP}{dx}\right)_{x=L} = 0$ (2) $x = 0$ $P = P_0$



Fluxo de Massa

Q throughput cte

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

$X = Ri$

$\Delta P = ZQ$

INVERSO ≡ CONDUTÂNCIA

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

Velocidade de bombeamento efetiva

$Q_A = P_A S_A \qquad Q_B = P_B S_B \qquad$ MAS $\quad Q = Q_A = Q_B = cte$

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

$$\boxed{\lambda = \frac{5 \times 10^{-3}\,(cm)}{P\,(Torr)}} \qquad \boxed{PV = NkT} \qquad \boxed{n = \frac{P}{kT}}$$

$$\boxed{\nu = \frac{1}{4} n \bar{v} \equiv \frac{\text{nº de moléculas}}{\text{area} \cdot \text{tempo}}}$$

Distribuição de MB

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$$

- Regime Viscoso $\quad \lambda \ll D \;;\; DP \geq 1$
  - fluxo turbulento $\quad Re \geq 2100$
  - fluxo laminar $\quad Re \leq 110$

$$\boxed{Re = \frac{\rho v D}{\eta}}$$

- Regime intermediário $\quad 10^{-2} < DP < 1$
- Regime molecular $\quad DP \leq 10^{-2}$

Numero de Knudsen

$$\boxed{N_K = \frac{\lambda}{D}}$$

Tempo para formação de uma monocamada

$$\boxed{\tau = \frac{2{,}7\times10^{-6}}{P(\text{Torr})}}$$

Condutâncias - Regime molecular

$$\boxed{Q = C\Delta P}$$

ORIFÍCIO

$$C = A\sqrt{\frac{kT}{2\pi m}}$$

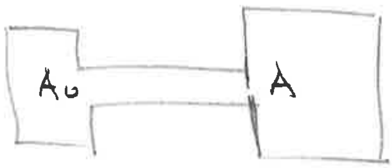
$$\boxed{C_0 = 9D^2} \quad N_2 \;\; T = 20°C$$

D (cm)
C (l/s)

$$C \propto \sqrt{\frac{T}{M}}$$

Diafragma

$$C_{ef} = 12A\left(\frac{A_0}{A_0 - A}\right)$$



Duto circular

$$\boxed{C = k\,\frac{4}{3}\,\frac{\bar{v}}{\int_0^L \frac{B\,dl}{A^2}}}$$

Equação Geral

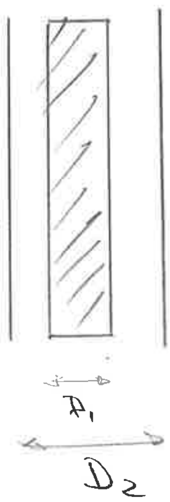
para tubo cilíndrico

$$C = \frac{\pi}{12}\,\bar{v}\,\frac{D^3}{L}$$

$$\boxed{C_{ar} = \frac{12D^3}{L}}$$

D (cm)
L (cm)
C (l/s)

DUTO ANULAR



$$\begin{cases} C = 12k\,(D_2 - D_1)^2(D_1 + D_2) \\[2ex] C = \dfrac{12}{L}\,(D_2^3 - D_1^3)\left(1 - \dfrac{D_1}{D_2}\right) \end{cases}$$

Condutância: Regime Viscoso

ORIFÍCIO

EXPANSÃO ADIABÁTICA

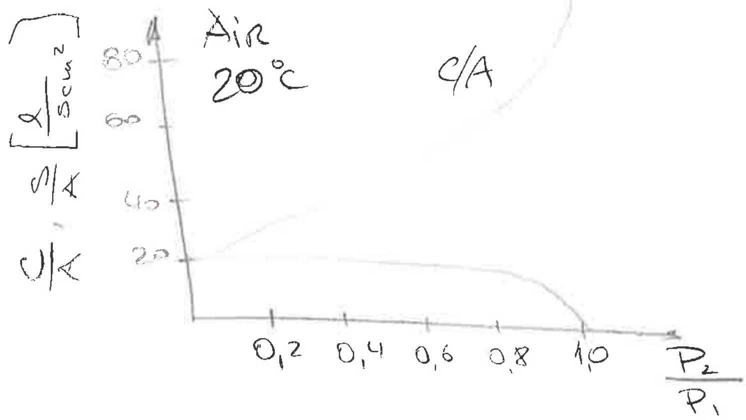
$$\boxed{PV^{\gamma} = cte}$$

$$C = \frac{20A}{1 - \frac{P_2}{P_1}}$$

P/ $P_2 < 0{,}1\, P_1$

$$\boxed{C \simeq 20A}$$

SLIDE



$$\frac{Q}{A P_1} = \frac{S}{A}$$

Tubo cilíndrico

$$\boxed{C_{N_2} = \frac{180\, D^4\, \bar{P}}{L}}$$

$$\bar{P} = \frac{P_1 + P_2}{2}$$

$$\boxed{C = \frac{1}{\eta}\, \frac{\pi\, D^4\, \bar{P}}{128\, L}}$$

Depende do gás!

Regime Intermediário

$$10^{-2} < D\bar{P} < 1$$

$$C_I = C_m \left(0{,}0736\, \frac{D}{\lambda} + 1 \right)$$

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

Bombeamento função P(t)

Regime Viscoso

mostrar gráfico $\boxed{\frac{t}{V} \times S_b}$ $\qquad \frac{D^4}{L} = \frac{128\eta E}{\pi}$

para $L \to 0$ em $E \to \infty$ então:

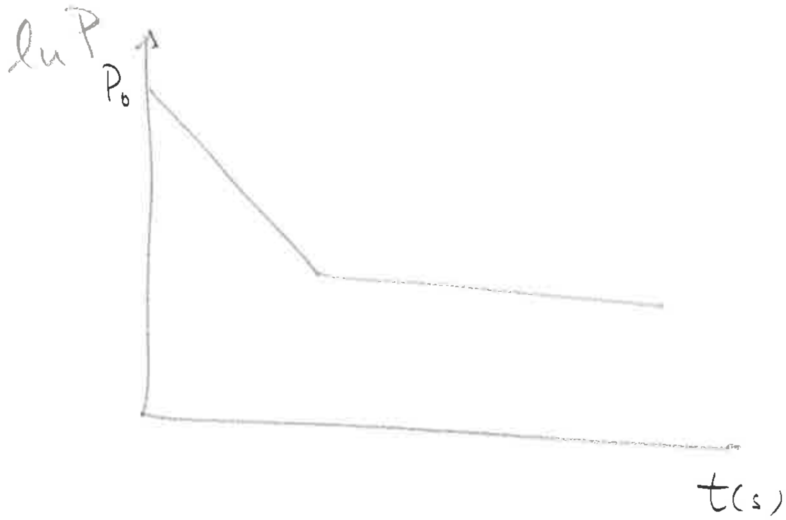
$$\frac{t}{V} = \frac{1}{S_b} \ln\left(\frac{P_i + P_i}{P + P}\right)$$

$$\boxed{P(t) = P_i \, e^{-\frac{S}{V}t}}$$

Regime Molecular

$$\boxed{P(t) = P_0 \, e^{-\frac{S}{V}t} + P_{res}}$$

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



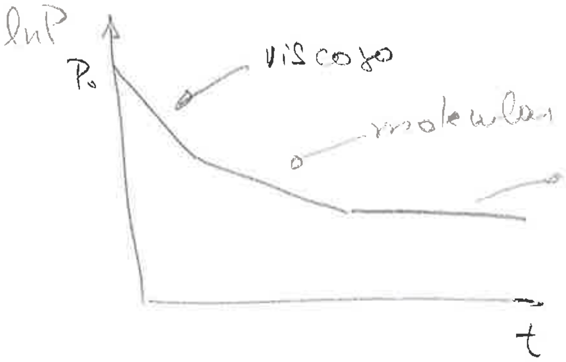
Estudo de Vazamentos

Regime viscoso $\quad S_{ef} \sim S_{bomba}$

Regime molecular $\quad S_{ef} = \dfrac{S_b \cdot C_{molecular}}{S_b + C_{molecular}}$ $\quad$ Depende da condutância

$\boxed{\tau = V/S}$

depende de S



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

Vazamento Real

$Q = PS \quad ; \quad Q = C\Delta P = C\,P_{ext}$ $\quad$ como $\quad P_{res} = \dfrac{\sum_i Q_i}{S}$

então $\quad \boxed{P_{res} = \dfrac{C_{Real}\,P_{atm}}{S}}$

Vazamento Virtual

CAVIDADE + ORIFÍCIO PEQUENO $\equiv$ VAZAMENTO VIRTUAL

Equação Geral $\quad \boxed{-V\dfrac{dP}{dt} = PS - \sum_i Q_i}$

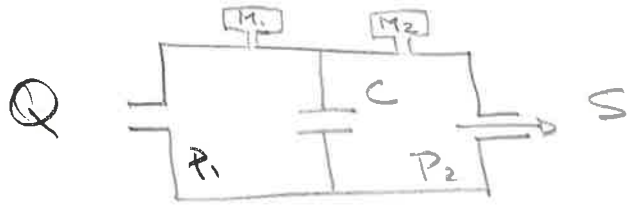
$-V\dfrac{dP_c}{dt} = Q_{vv}$ $\quad$ mas $\quad Q_{vv} = C_{vv}(P_c - P_{int})$ $\quad$ $P_c \gg P_{int}$

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

então $\quad -V\dfrac{dP_c}{dt} = C_{vv}\,P_c \xrightarrow{\text{solução}} \boxed{P_{res} = \dfrac{C_{vv}}{S}\,P_0'\,e^{-\frac{C_{vv}}{V_c}t}}$

Métodos Alternativos para medidas de C e S

1 Velocidade de bombeamento



Em condições estacionárias

$$\begin{cases} Q = C\Delta P = C(P_1 - P_2) & (I) \\ S = \dfrac{Q}{P_1} = \dfrac{Q}{P_2} & (II) \end{cases}$$

Substituindo I em II

$$S = \frac{Q}{P_2} = \frac{C(P_1 - P_2)}{P_2} = C\left(\frac{P_1}{P_2} - 1\right)$$

Se a condutância for conhecida, então determina-se S.

No regime molecular C é constante

Se $S >> C$ $P_2 << P_1$ então

$$\boxed{S = C\,\frac{P_1}{P_2}}$$

② Medida de S pela variação do fluxo de massa (Q)

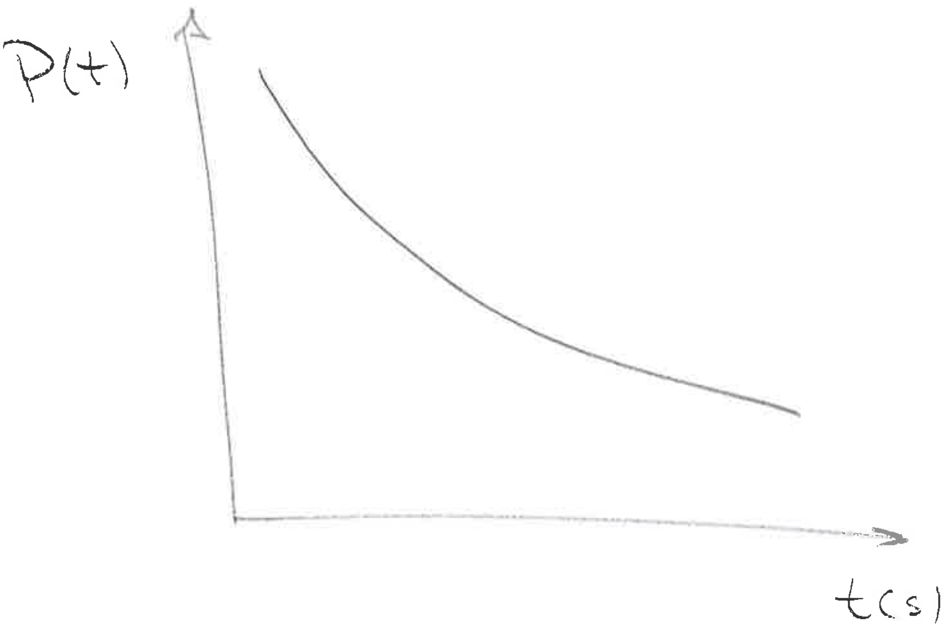
Equação geral $$\boxed{-V\frac{dP}{dt} = PS - \sum_i Q_i}$$

$$P_{res} = \frac{\sum_i Q_i}{S} \qquad \text{então:} \qquad \sum_i Q_i = P_{res}\, S$$

logo $$-V\frac{dP}{dt} = PS - P_{res}\, S$$

$$-V\frac{dP}{dt} = (P - P_{res})\, S$$

logo $$\boxed{S = \frac{-V}{P - P_{res}}\,\frac{dP}{dt}}$$



3 Medida de S conhecendo-se P(t)

$$\boxed{P = P_o\, e^{-\frac{S}{V}t} + P_{res}}$$

Para $P_{res} \ll P$

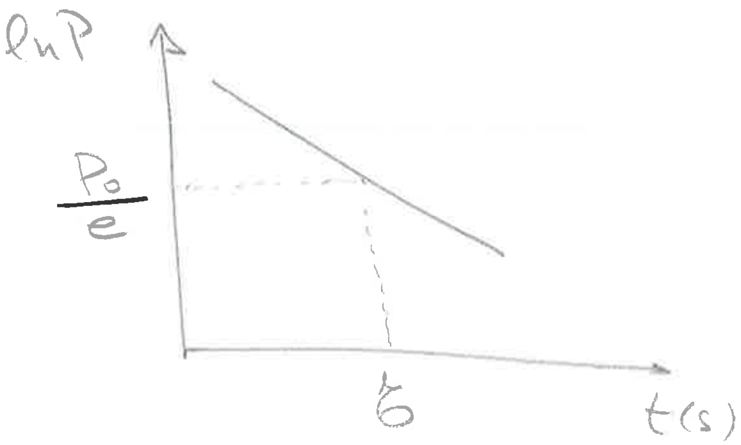
então $P = \frac{P_o}{e} = P_o\, e^{-\frac{S}{V}t}$

$$e^{-1} = \frac{P_o}{P_o} e^{-\frac{S}{V}t} \Longrightarrow e = e^{\frac{S}{V}t}$$

$$\ln e = \ln e^{\frac{S}{V}t} \longrightarrow 1 = \frac{S}{V}t$$

$$t = \frac{V}{S} \Longrightarrow \boxed{\tau = V/S}$$ tempo de bombeamento característico do sistema

τ é a constante de bombeamento

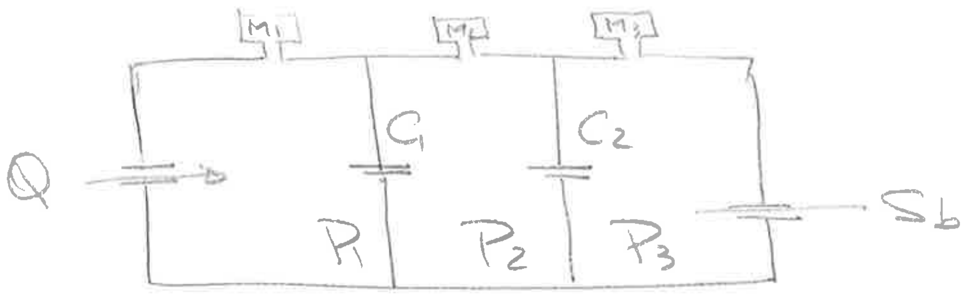


$$T_{1/2} = \tau \ln 2$$

$$P = P_o\, e^{-t/\tau} \qquad P = \frac{P_o}{2}\,? \Longrightarrow \frac{P_o}{2} = P_o\, e^{-t/\tau}$$

$$\ln 2 = t/\tau \qquad \boxed{t = T_{1/2} = \tau \ln 2}$$

④ Medida da condutância



$$Q = C_1 (P_1 - P_2)$$

$$Q = C_2 (P_2 - P_3)$$

Para C_2 conhecida

$$Q = C_1 (P_1 - P_2) = C_2 (P_2 - P_3)$$

$$C_2 = \frac{C_1 (P_1 - P_2)}{P_2 - P_3} \quad \text{ou} \quad C_1 = \frac{C_2 (P_2 - P_3)}{P_1 - P_2}$$

Se $S \gg C \longrightarrow P_3 \ll P_2$

$$\therefore \quad C_1 = \frac{C_2 P_2}{P_1 - P_2} \Longrightarrow \boxed{C_1 = \frac{C_2}{\frac{P_1}{P_2} - 1}}$$

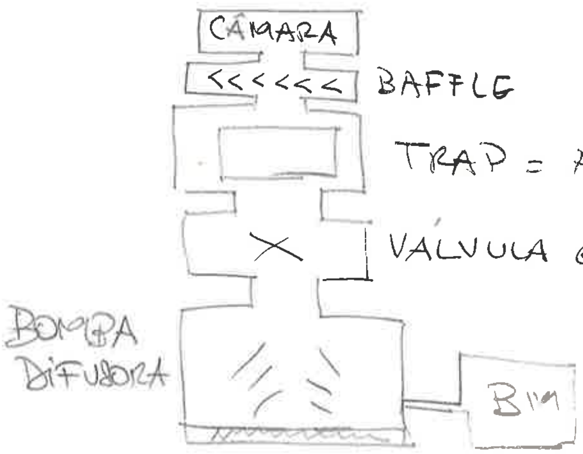
Para $C_2 \gg C_1 \longrightarrow P_2 \ll P_1$

Neste caso

$$\boxed{C_1 = \frac{P_2}{P_1} C_2}$$

EXERCÍCIO 20 - LISTA 3

Bomba difusora $D = 3'' \sim 7{,}5\,cm$



BAFFLE

TRAP = Abertura anular $\begin{cases} L = 30\,cm \\ D_1 = 20\,cm \\ D_2 = 16\,cm \end{cases}$

VÁLVULA GAVETA = duto $\begin{cases} D = 8\,cm \\ L = 5\,cm \end{cases}$

(a) Calcule: Sef da BD na boca do sistema sem N_2

$S_{BD} \sim 50\%\, C_0 = 50\%\, 9D^2$ condutância de um orifício

$S_{BD} = 4{,}5\,(7{,}5)^2 = 253\,\ell/s$

3 impedâncias em série

VALVULA + TRAP + BAFFLE

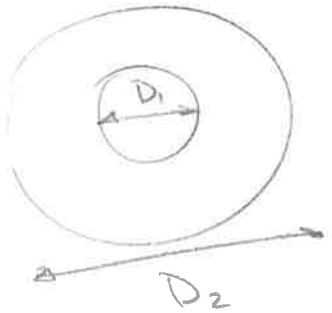
$$C_{VÁLVULA} = \frac{12 D^3}{L} \quad \begin{cases} L = 5\,cm \\ D = 8\,cm \end{cases}$$

$$C_{VALVULA} = \frac{12\,(8)^3}{5} \sim 1228\,\ell/s$$

$C_{BAFFLE} = 500\,\ell/s$

$C_{armadilha} = ?$

$\boxed{S_{ef} = ?}$



$$\begin{cases} D_1 = 16\,cm \\ D_2 = 20\,cm \\ L = 30\,cm \end{cases}$$

$$C = 9\,(D_2^2 - D_1^2)$$

$$C = 9\,(20^2 - 16^2) = 1296\ l/s$$ abertura anular

$$C_{duto\ anular} = \frac{12}{L}\,(D_2^3 - D_1^3)\left(1 - \frac{D_1}{D_2}\right)$$

$$C_{duto\ anular} = \frac{12}{30}\,(20^3 - 16^3)\left(1 - \frac{16}{20}\right) = 312\ l/s$$

$$\frac{1}{C_{total}} = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{C_i}$$ = VÁLVULA + BAFFLE + Abertura anular + DUTO ANULAR

$$\frac{1}{C_{total}} = \frac{1}{1228} + \frac{1}{500} + \frac{1}{1296} + \frac{1}{312}$$

$$\boxed{C = 147\ l/s}$$ sem nitrogênio líquido

$$S_{ef} = \frac{S_b \times C}{S_b + C} = \frac{253 \times 147}{253 + 147} = 93\ l/s$$

(b) Calcule Sef na boca do sistema com N_2 líquido

O N_2 líquido atua apenas na armadilha

$$C \propto \sqrt{T}$$

$$\frac{C_{293}}{C_{77}} = \frac{\sqrt{293}}{\sqrt{77}} \simeq 1{,}95$$

$\frac{C_{77}}{C_{293}} \sim 0{,}51$ ou seja a condutância cai pela metade

abertura anular 1296 l/s ⟶ 661 l/s
tubo anular 312 l/s ⟶ 159 l/s

então

$$\frac{1}{C_{TOTAL}} = \sum_i \frac{1}{C_i} = \frac{1}{1228} + \frac{1}{500} + \frac{1}{661} + \frac{1}{159}$$

$$\boxed{C_T = 94\ l/s}$$

$$S_{ef} = \frac{S_b\, C_T}{C_T + S_b} = \frac{253 \times 94}{253 + 94} = 68\ l/s$$

Nesse cálculo foi admitida a conservação do throughput

⟹ A eficiência da Bomba Difusora diminui

(c) Aplicada a uma câmara de $D = 30$ cm com pressão de operação $P = 10^{-6}$ Torr, qual pode ser a máxima taxa de desgaseificação dessa câmara para se manter essa pressão em 10^{-6} Torr?

$$Q = PS = 10^{-6} \times 68$$

$$\therefore \quad Q = 6{,}8 \times 10^{-5} \ \frac{\text{Torr l}}{\text{s}}$$

$$D = 30\,\text{cm} \qquad A = 4\pi R^2 = 2826\ \text{cm}^2$$

$$q = \frac{Q}{A} \qquad q = \frac{6{,}8 \times 10^{-5}}{2826} \ \frac{\text{Torr l}}{\text{cm}^2\ \text{s}}$$

$$\therefore \quad \boxed{q = 2{,}5 \times 10^{-8} \ \frac{\text{Torr l}}{\text{s cm}^2}}$$

Exercício 25 - lista 2 (modificado)

Qual a massa de gás retirada de um sistema de vácuo?

Considere uma câmara com volume 1 ℓ a pressão de 700 Torr

$PV = NkT$

$$Q = PS = -V\frac{dP}{dt} = kT\frac{dN}{dt}$$

Regime viscoso 700 Torr até 1 Torr

$\Delta t \sim 5$ seg bancada 2

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{700-1}{5} = 140\ \frac{\text{Torr}}{s}$$

$$Q = V\frac{\Delta P}{\Delta t} = 1 \times 140 = 140\ \frac{\text{Torr}\,\ell}{s}$$

Se $k = 10^{-22}\ \frac{\text{Torr}\,\ell}{K}$

$T = 300\ K$

então:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = V\frac{\Delta P}{\Delta t}\frac{1}{kT}$$

$$\boxed{n = \frac{N}{V} = \frac{P}{kT}}$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = 1 \times 140 \times \frac{1}{10^{-22}\,300} \sim 5 \times 10^{21}\ \text{moléculas/s}$$

$$N_2 = 53{,}1 \times 10^{-24}\ g$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} \times m = 5\times 10^{21} \times 53{,}1 \times 10^{-24}\ g = 0{,}3\ g/s$$

em $\Delta t = 5$ seg $\boxed{m_{total} = 1{,}5\ g}$

Neste intervalo de tempo, qual a velocidade de bombeamento?

$Q = P S$ $\qquad \bar{P} = 350 \text{ Torr}$

$$S = \frac{140}{350} \frac{\frac{\text{Torr}\,\ell}{s}}{\text{Torr}} = 0{,}4\ \ell/s$$

$$S = 25\ \ell/min$$

ou

$$\underline{S = 1{,}5\ m^3/h}$$

A partir de qual livre caminho médio pode ser considerado regime molecular?

Considere (a) câmara esférica $D = 30\,cm$
(b) duto de 2" (5 cm)

Definição do regime depende do número de Knudsen

$$N_k = \frac{\lambda}{D} \qquad \lambda = \frac{5\times10^{-3}}{P\,(Torr)}\,(cm)$$

Regime molecular $DP \leq 10^{-2}$ em Torr cm

Substituindo $D\,\frac{5\times10^{-3}}{\lambda} \leq 10^{-2}$

$$\frac{D}{\lambda} \leq \frac{10^{-2}}{5\times10^{-3}} \Longrightarrow \boxed{\lambda = 5\times10^{-1}D}$$

D é a dimensão do sistema

(a) Para $D = 30\,cm$

$\lambda \geq 5\times10^{-1}\times30 \quad \therefore \quad \boxed{\lambda \geq 15\,cm}$

(b) Para duto de $D = 5\,cm$

$\lambda = 5\times10^{-1}\times5$

$\boxed{\lambda \geq 2{,}5\,cm}$

Exercício 3.- lista 3

A partir de qual pressão pode ser considerado regime molecular

$$DP \leq 10^{-2} \text{ Torr cm} \Longrightarrow \boxed{P \leq \frac{10^{-2}}{D} \text{ Torr cm}}$$

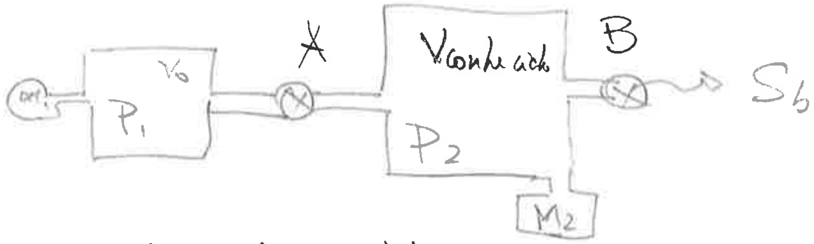
(a) $D = 30\,cm$

$$P \leq 3 \times 10^{-4} \text{ Torr}$$

(b) $D = 5\,cm$

$$P \leq 2 \times 10^{-3} \text{ Torr}$$

Exercício 23 - lista 2



Determinar o volume V_0

Temperaturas iguais

$$PV = NkT$$

$$P_1 V_0 + P_2 V = P_{final} (V_0 + V)$$

1. Bombeamento em $V_{conhecido}$
2. Válvula B fechada
3. Valvula A aberta

O nº de moléculas é mantido

$$(P_1 - P_{final}) V_0 = (P_{final} - P_2) V$$

então

$$\boxed{V_0 = \frac{(P_{final} - P_2)\, V}{P_1 - P_{final}}}$$

Exercício 13 – lista 3

Avalie o erro cometido se houver vazamento de 10^{-4} cm além do throughput injetado no método da pipeta.

O método permite saber quanto se está injetando no sistema

Dados: $D = 1\,\mu m = 10^{-3}\,mm = 10^{-4}\,cm$

$P_S = 3 \times 10^{-4}$ Torr $\boxed{S = 45\,\ell/s}$

- Sem vazamento

$$\boxed{Q = PS = P_o \frac{\Delta V}{\Delta t}} \quad (I)$$

Única fonte de gás.

- Com vazamento

$$\boxed{PS = P_o \frac{\Delta V}{\Delta t} + Q_{VAZAMENTO}}$$

$$PS_v = P_o \frac{\Delta V}{\Delta t} + C(P_{atm} - \cancel{P_s}^{\text{pequeno}})$$

$$\boxed{PS_v = P_o \frac{\Delta V}{\Delta t} + C P_{atm}} \quad (II)$$

Subtraindo (II – I)

$$P(S_v - S) = P_o \frac{\Delta V}{\Delta t} + C P_{atm} - P_o \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

$$P(S_v - S) = C P_{atm}$$

$$\boxed{100 \frac{S_v - S}{S} = \frac{C P_{atm}}{PS} \times 100}$$

Para um vazamento de 10^{-4} cm

$C = 9D^2$ (regime molecular)

Para o regime viscoso $P_2 < 0{,}1 P_1$

$$C = 20A = 20\frac{\pi D^2}{4} \sim 15D^2$$

(a) então

$$100\left(\frac{S_V - S}{S}\right) = \frac{9\times(10^{-4})^2\, 700}{3\times10^{-4}\; 45} \times 100 \sim 0{,}5\%$$

(b) Para uma pressão $P_S = 10^{-5}$ Torr, temos:

$$100\left(\frac{S_V - S}{S}\right) = \frac{9\,(10^{-4})^2\, 700}{10^{-5}\times 45} \times 100 = 0{,}14$$

$\therefore$ diferença de 14%