AULA 12

# Ciência e Tecnologia do vácuo

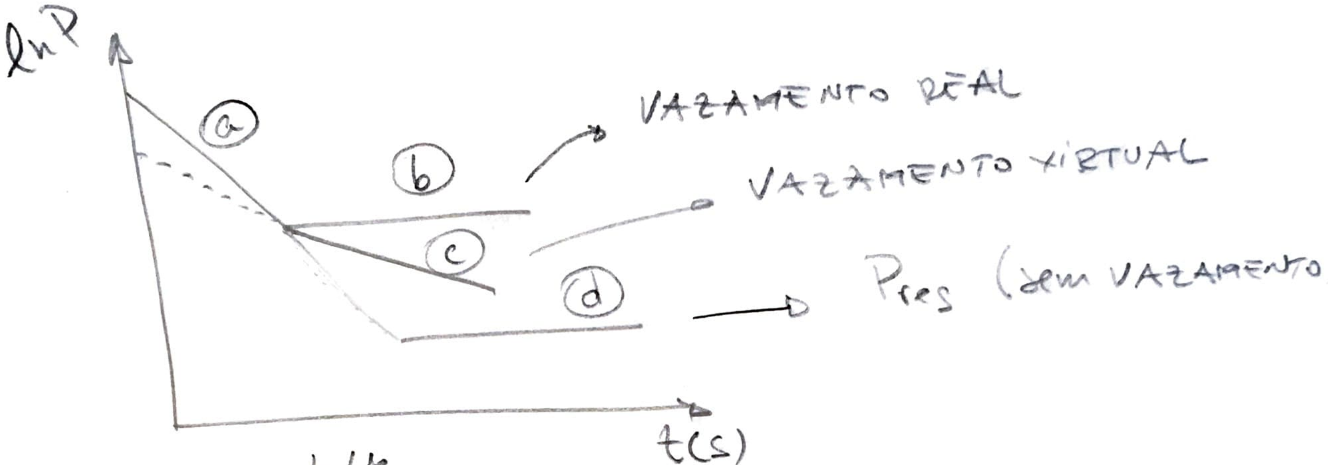
(1)

24/04/20

AVISO: PROVA DIA 28/04
ONLINE.

## Resumo das aulas anteriores

$P(t)$ Vazamentos real e virtual



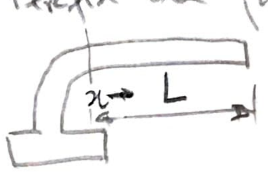

(a) $P = P_0 e^{-t/\tau}$ $(\tau = V/S)$

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

Perfil da pressão ao longo do tubo

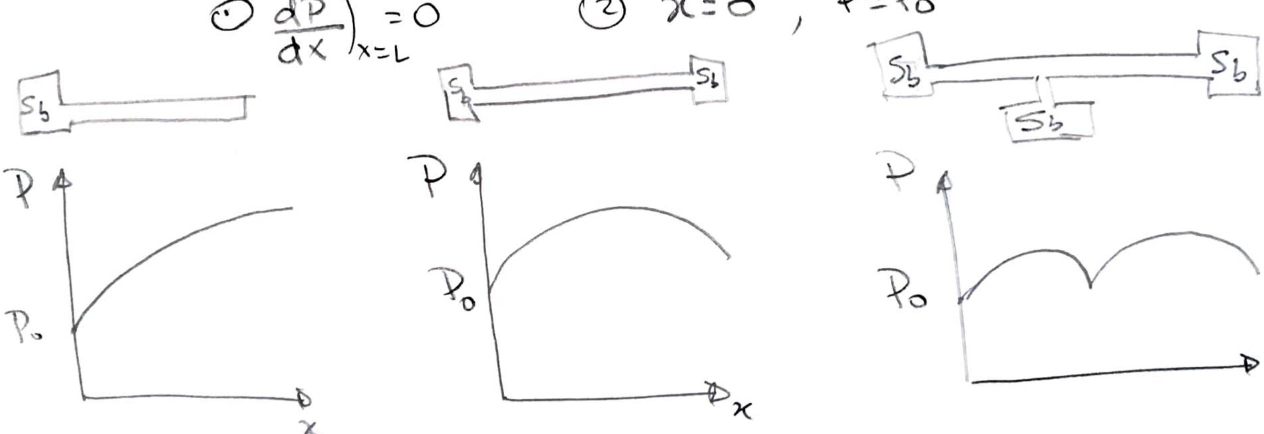



$$P_x = P_0 + qB\left[\frac{x}{c} - \frac{x^2}{2LC}\right]$$

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

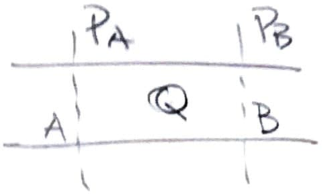
Condições de contorno

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



# Fluxo de Massa (Q) throughput

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




$$\boxed{\begin{array}{c} V = Ri \\ \Delta P = ZQ \end{array}}$$

INVERSO DA IMPEDÂNCIA ≡ CONDUTÂNCIA

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

Velocidade de bombeamento efetiva

$Q_A = P_A S_A \qquad Q_B = P_B S_B \qquad$ Mas, $Q = Q_A = Q_B = cte$

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

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

$$\boxed{\nu = \frac{1}{4} n\bar{v} \equiv \frac{n^{o}\text{ de moléculas}}{\text{área tempo}}}$$

Distribuição de Maxwell-Boltzmann.

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

Regime Viscoso $\quad \lambda \ll D \;;\; DP \geq 1$

fluxo turbulento $Re \geq 2100$

fluxo laminar $Re \leq 1100$

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

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

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

$$\boxed{\text{Número de Knudsen} \quad N_K = \frac{\lambda}{D}}$$

$\frac{D}{\lambda} > 100$ Viscoso

$1 < \frac{D}{\lambda} < 100$ INTERMEDIÁRIO

$\frac{D}{\lambda} < 1$ Molecular

## Tempo para a formação de uma monocamada

$$\boxed{\tau = \frac{2{,}7 \times 10^{-6}}{P\,(\mathrm{Torr})}}$$

## Condutâncias no regime molecular

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

**ORIFÍCIO**

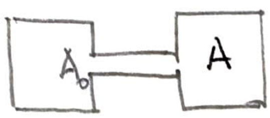
$$C = A\sqrt{\frac{kT}{2\pi m}}$$

$$\boxed{C_0 = 9D^2}$$

$N_2$ $T = 20°C$
$D\,(\mathrm{cm})$
$C\,(\ell/s)$

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

**DIAFRAGMA**




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

**DUTO CIRCULAR**

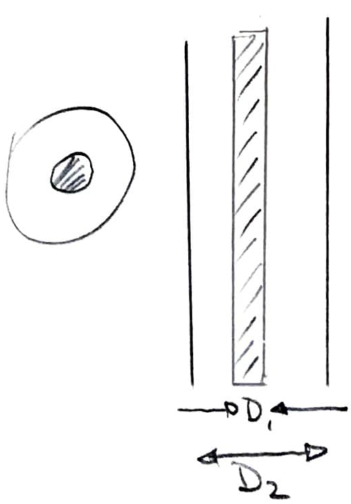
$$\boxed{C = k\,\frac{4}{3}\,\frac{\bar{v}}{\int_0^L \frac{B\,d\ell}{A^2}}}$$

Equação Geral

$$\longrightarrow \quad \boxed{C = \frac{\pi}{12}\,\bar{v}\,\frac{D^3}{L}} \qquad \boxed{C_{Air} = \frac{12D^3}{L}}$$

$D\,(\mathrm{cm})$
$L\,(\mathrm{cm})$
$C\,(\ell/s)$

**DUTO ANULAR**




$$C = 12k\,(D_2 - D_1)^2\,(D_1 + D_2)$$

$$C = \frac{12}{L}\left(D_2^3 - D_1^3\right)\left(1 - \frac{D_1}{D_2}\right)$$

# Condutâncias - Regime Viscoso

## Orifício

Expansão adiabática

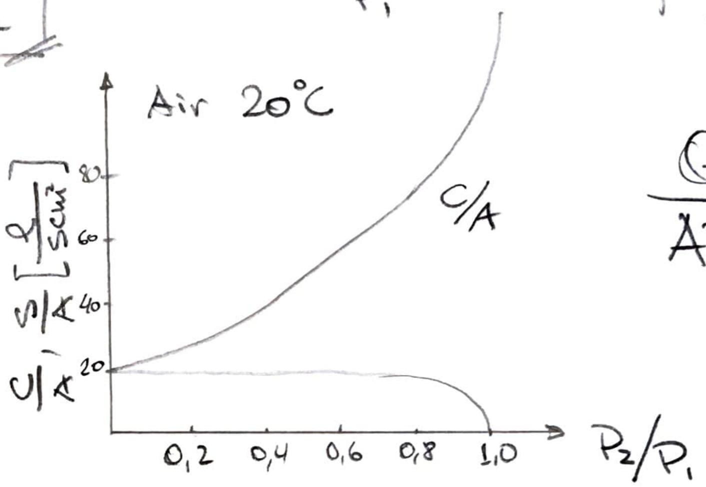
$$\boxed{Pv^{\gamma} = cte}$$

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

Para $P_2 < 0{,}1 P_1$

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

SLIDE




$$\frac{Q}{AP_1} = \frac{S}{A}$$

## Tubo cilíndrico

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

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

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

depende do gás.

## Regime Intermediário

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

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

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

# Função P(t)

Bombeamento

## Regime Viscoso

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

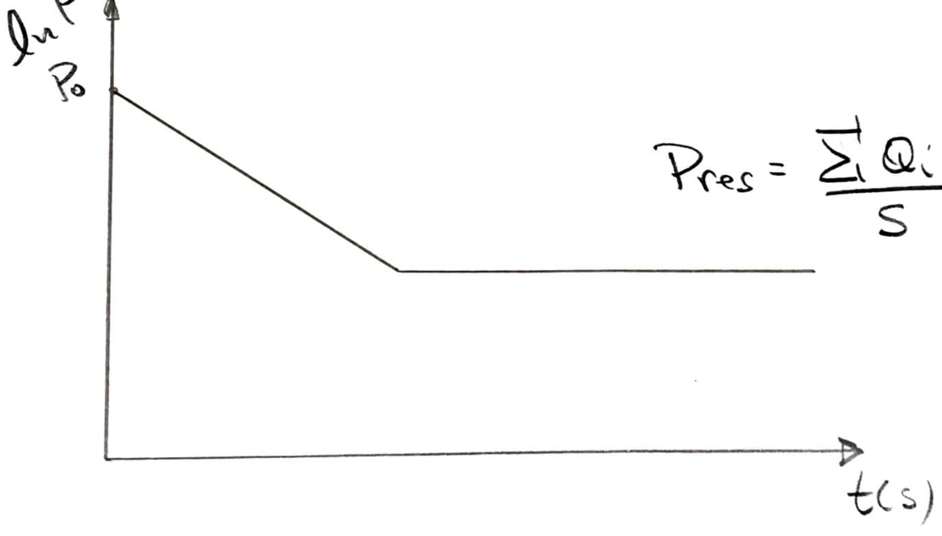
Para $L \to 0\,cm$ $\quad E \to \infty$ então:

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

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

## Regime Molecular

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

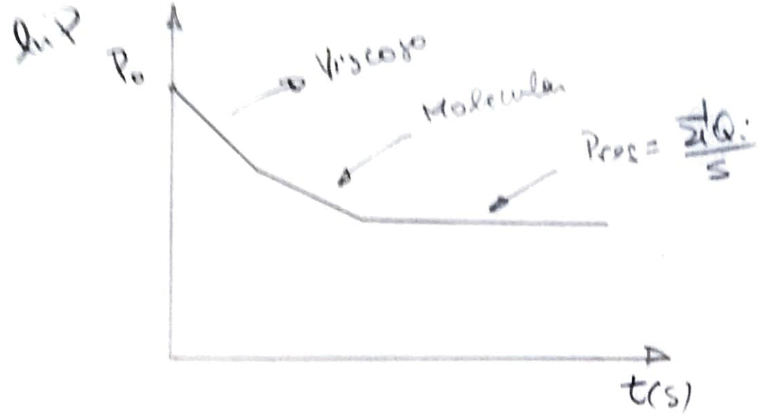



$$P_{res} = \frac{\sum_i Q_i}{S}$$

# Estudo de Vazamentos

Regime Viscoso $S_{ef} \sim S_{bomba}$

Regime molecular $S_{ef} = \dfrac{S_b\, C_{molecular}}{S_b + C_{molecular}}$ depende da condutância




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

depende de S.

## Vazamento Real:

$Q = PS \qquad Q = C\Delta P = C\,(P_{ext} - \cancel{P_{int}})$ 0 $\qquad$ Como $P_{res} = \dfrac{\Sigma_i Q_i}{S}$

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

## Vazamento Virtual

CAVIDADE + ORIFÍCIO PEQUENO $\equiv$ Vazamento Virtual

Equação Geral $$\boxed{-V\frac{dP}{dt} = PS - \Sigma_i Q_i}$$

$-V\dfrac{dP}{dt} = Q_{vv}$ $\qquad$ Mas $Q_{vv} = C_{vv}\,(P_c - \cancel{P_{int}})$ 0

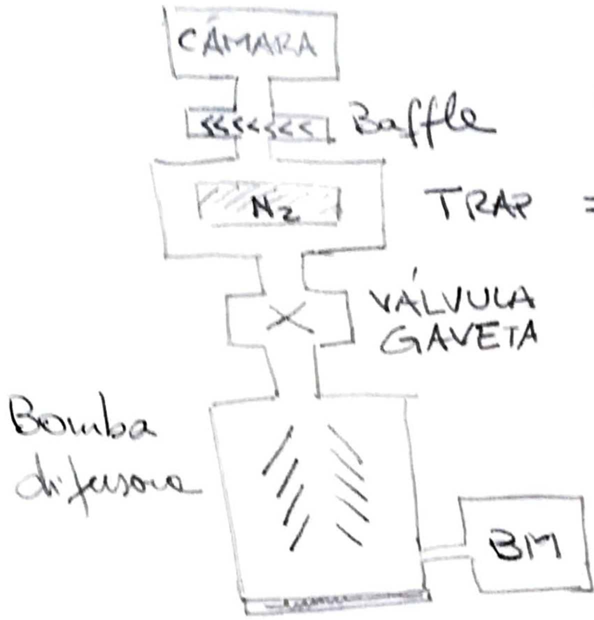
$Q_{vv} = C_{vv} P_c$

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

Lista 3. ex. 20



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




$C = 500\ \ell/s$

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

= DUTO $\begin{cases} D = 8\,cm \\ L = 5\,cm \end{cases}$

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

$S_{BD} \sim 50\%\, C_o = 50\%\ 9D_2$ CONDUTÂNCIA DE UM ORIFÍCIO

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

3 impedâncias em série

válvula + TRAP + BAFFLE

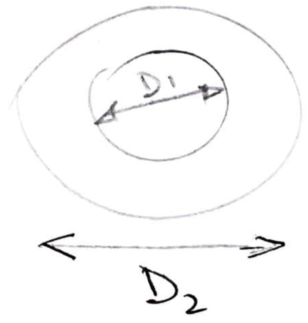
$C_{VÁLVULA} = \dfrac{12D^3}{L}$ $\begin{cases} L = 5\,cm \\ D = 8\,cm \end{cases}$

$C_{VÁLVULA} = \dfrac{12(8)^3}{5} \sim 1228\ \ell/s$

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

$C_{ARMADILHA} = ?$

$\boxed{Sef = ?}$




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

Abertura anular

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

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

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

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

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

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

$$\boxed{C = 147\ l/s}$$

sem nitrogênio líquido

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

(b) Calcule Sef na boca do sistema com $N_2$ líquido. O $N_2$ líquido atua apenas no TRAP

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

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

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

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

então

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

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

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

Nesse cálculo foi suposta a conservação do throughput

⟹ A eficiência da bomba difusora diminui.

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

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

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

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

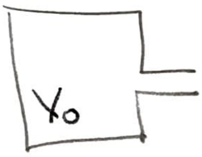
$$q = \frac{Q}{A} \qquad q = \frac{6{,}8 \times 10^{-5}}{2826} \ \frac{\text{Torr}\,\ell}{s\ \text{cm}^2}$$

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

Lista 2 - ex. 25 (modificado) ⑥

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

Considere uma câmara com volume $V = 1\,\ell$ em uma pressão de 700 Torr




$$\boxed{PV = NkT} \qquad \boxed{k = 10^{-22}\ \frac{\text{Torr}\,\ell}{K}}$$

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

Regime viscoso 700 Torr até 1 Torr

Bancada 2 $\Rightarrow$ $\Delta t \sim 5$ seg.

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

$$Q = V\frac{dP}{dt} = 1 \times 140 = 140\ \frac{\text{Torr}\,\ell}{s}$$

então $$\frac{\Delta N}{\Delta t} = V\frac{\Delta P}{\Delta t}\frac{1}{kT} \qquad \boxed{n = \frac{N}{V} = \frac{P}{kT}}$$

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

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

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} \times M_{N_2} = 5 \times 10^{21} \times 53{,}1 \times 10^{-24}\ g = 0{,}3\ g/s$$

em $\Delta t = 5$ seg $\qquad \boxed{m\ \text{total} = 1{,}5\ g}$

Neste intervalo de tempo, qual a velocidade de bombeamento?

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

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

$$\boxed{S = 25\ \ell/\text{min}}$$

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

Lista 3 - ex. 2



A partir de qual livre caminho médio ($\lambda$) pode ser considerado regime molecular?

Considere (a) câmara esférica $D = 30cm$

(b) duto de 2" (5cm)

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

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

D é a dimensão do sistema

(a) Para $D = 30\ cm$

$\lambda \geq 5\times10^{-1}\times 30 \therefore \boxed{\lambda \geq 15cm}$

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

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

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

Lista 3 ex 3

A partir de qual pressão pode ser considerado regime molecular?

$$\boxed{DP \leq 10^{-2}\ \text{Torr cm}}$$

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

a) $D = 30\ \text{cm}$

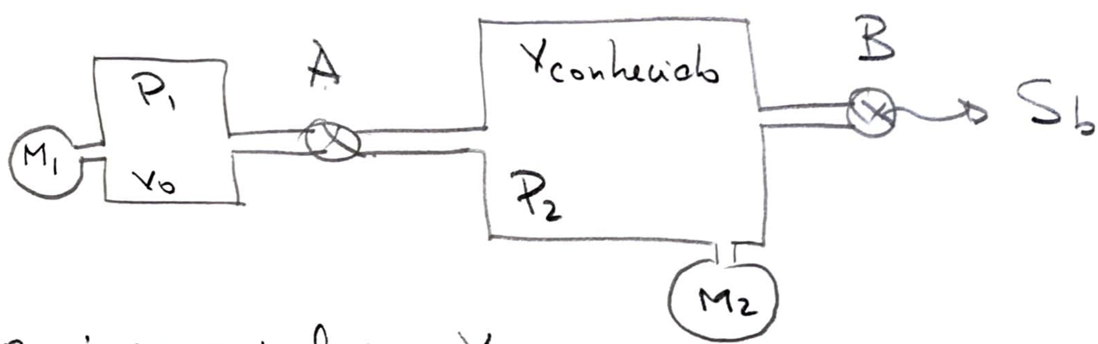
$$\boxed{P \leq 3 \times 10^{-4}\ \text{Torr}}$$

b) $D = 5\ \text{cm}$

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

Lista 2 - ex. 23






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) Válvula A aberta

O nº de moléculas é mantido

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

então

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