AULA 10 — Ciência e Tecnologia do Vácuo

passar lista de presença

Resumo da aula anterior:

Bombeamento no regime viscoso

$$Q = -V\frac{dP}{dt} \qquad Q = C\Delta P \qquad C = \frac{\pi}{128\eta}\frac{D^4\bar{P}}{L} = E\bar{P}$$

$$S_{ef} = \frac{S_b C}{S_b + C} \qquad Q = P S_{ef} = \frac{P S_b E \bar{P}}{S_b + E\bar{P}} \qquad \bar{P} = \frac{P + P_b}{2}$$

$$\frac{dP}{dt}\frac{2V}{E} - \frac{V^2E}{S_b^2}\left(\frac{dP}{dt}\right)^2 + P^2 = 0$$

$$\frac{t}{V} = \frac{1}{E}\left[\frac{1}{P} - \frac{1}{P_i}\right] + \frac{1}{S_b}\left[\frac{((S_b/E)^2 + P^2)^{1/2}}{P} - \frac{((S_b/E)^2 + P_i^2)^{1/2}}{P_i}\right] +$$

$$+ \frac{1}{S_b}\left(\ln \frac{P_i + ((S_b/E)^2 + P_i^2)^{1/2}}{P + ((S_b/E)^2 + P)^{1/2}}\right)$$

MOSTRAR GRÁFICO $[S_b \times t/V]$

parâmetro geométrico $\dfrac{D^4}{L} = \dfrac{128\eta E}{\pi}$

para $L \to 0\,cm$ $\quad E \to \infty$ então

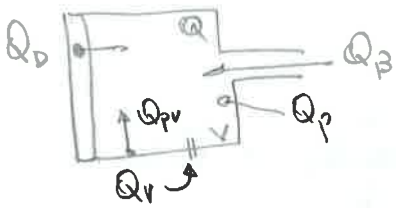
$$\frac{t}{V} = \frac{1}{S_b}\ln\frac{P_i + P_i}{P + P} \Rightarrow \boxed{\frac{t}{V} = \frac{1}{S_b}\ln\frac{P_i}{P}}$$

$$\boxed{P = P_i\, e^{-\frac{S_b}{V}t}}$$

Bombeamento no Regime Molecular

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

Fontes de gases



$$Q_G = Q_V + Q_{pv} + Q_B + Q_p + Q_D$$

$$Q_G = \Sigma_i' Q_i$$

Equação Geral

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

Depois de um longo tempo $\frac{dP}{dt} \sim 0$

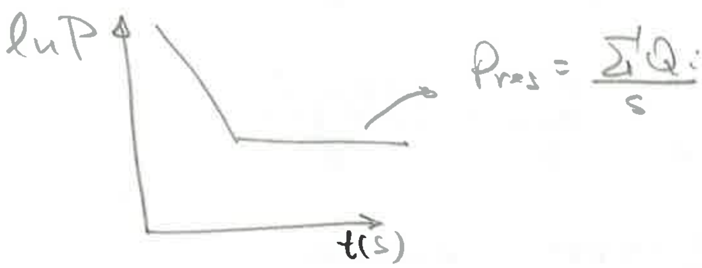
então $PS = \Sigma_i' Q_i$

logo $\boxed{P_{res} = \frac{\Sigma_i' Q_i}{S}}$

Fontes de Gases / Velocidade de bombeamento

Resolvendo a equação diferencial

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



Constante de bombeamento $\tau = V/S$

$T_{1/2}$ $\quad P = \frac{P_0}{2}$ substituindo $\frac{P_0}{2} = P_0 e^{-\frac{S}{V}t} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\frac{S}{V}t}$

$$2^{-1} = e^{-S/V\, t}$$

$$-\ln 2 = -\frac{S}{V}t \Rightarrow t = \frac{V}{S}\ln 2$$

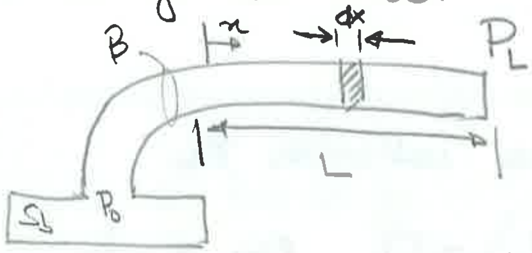
$$\boxed{T_{1/2} = \tau \ln 2}$$

Perfil da Pressão ao longo do tubo

A. Roth

Na condição estacionária $\boxed{P_{res} = \frac{\Sigma_i Q_i}{S}}$; $\boxed{Q_G = \Sigma_i Q_i}$

A condição estacionária é caracterizada por um gradiente da pressão ao longo do tubo.



Considerando uma bomba bombeando um tubo, de condutância C, fechado na outra extremidade.

Sendo q a taxa de desgaseificação $\left[\text{Torr} \frac{\ell}{s} \frac{1}{cm^2} \right]$

$-dQ = q\, B\, dx$ (1) B é o perímetro do tubo.

O sinal negativo indica que o fluxo se desloca para valores negativos de x.

O throughput que passa por um elemento de comprimento dx é dado por:

Como $Q = C \Delta P$ $\boxed{Q = C\, dP \frac{L}{dx}}$

Podemos escrever:

$$dQ = C L \frac{d^2 P}{dx^2}\, dx \quad (\text{II})$$

$$\frac{d^2P}{dx^2} = \frac{dQ}{dx}\frac{1}{CL} \quad ; \text{ mas } \quad \frac{dQ}{dx} = -q\,B \quad \text{eq.(I)}$$

então $\boxed{\dfrac{d^2P}{dx^2} = -\dfrac{q\,B}{CL}}$ integrando em x

$$\frac{dP}{dx} = \frac{-q\,B}{CL}\,x + k_1$$

condição de contorno para calcular k_1

no final do tubo $\left.\dfrac{dP}{dx}\right)_{x=L} = 0$ em $x = L$

então $k_1 = \dfrac{q\,B}{C}$

logo $\dfrac{dP}{dx} = -\dfrac{q\,B}{CL}\,x + \dfrac{q\,B}{C}$ integrando novamente

$$P_x = -\frac{q\,B}{CL}\frac{x^2}{2} + \frac{q\,B}{C}\,x + k_2$$

condição de contorno que permite calcular k_2

Na boca do tubo $x = 0$; $P = P_0$

então $k_2 = P_0$

mas $Q = PS$ e $Q = q\,A$ área do tubo

então $P_0 = \dfrac{q\,A}{S} \Rightarrow \boxed{P_0 = \dfrac{q\,BL}{S_b}}$

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

O perfil da pressão segue uma parábola com concavidade para baixo.

A queda da pressão será dada por:

$$P_x - P_0 = qB\left[\frac{x}{C} - \frac{x^2}{2LC}\right] \quad \text{pois} \quad \boxed{P_0 = q\frac{BL}{S_b}}$$

para P_L, vem:

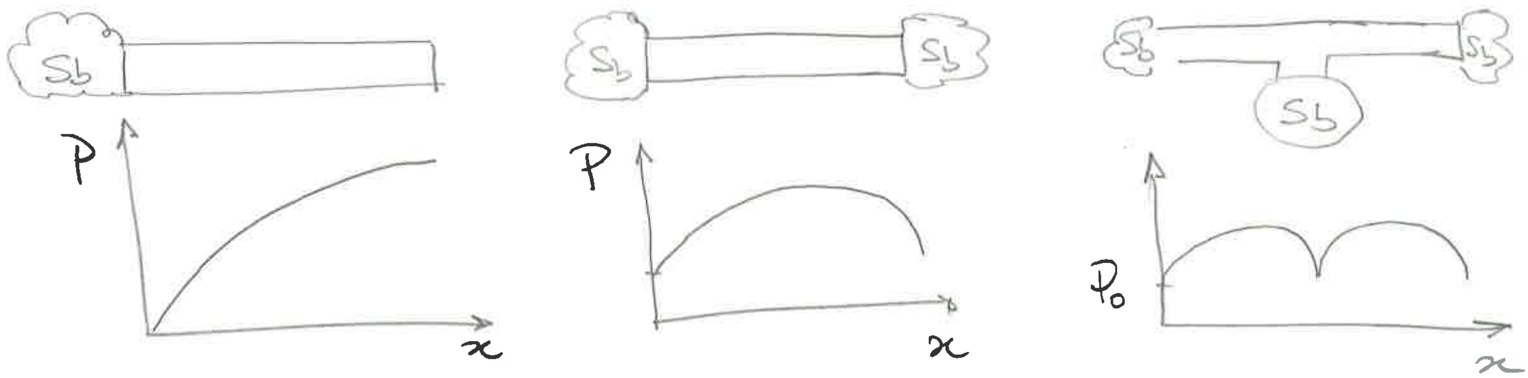
$$P_L - P_0 = qB\left[\frac{L}{C} - \frac{L^2}{2LC}\right] = q\frac{BL}{2C}$$

$$\therefore \boxed{P_L - P_0 = q\frac{BL}{2C}}$$

Independente da pressão.

Devido a esse resultado para se bombear tubos muito longos (Pelletron, RHIC, LHC) deve-se colocar um grande número de bombas ao longo do duto!!

MOSTRAR TRANSPARÊNCIAS



Vazamentos

Modelos de técnicas de detecção

Tópicos a serem abordados

(a) Vazamento real (Cte)

(b) Vazamento virtual (dependente do tempo)

(c) Dimensões dos vazamentos

(d) Outras fontes de gases.

- Q permeação
- Q difusão
- Q desgaseificação

Regime Viscoso

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

Regime molecular

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

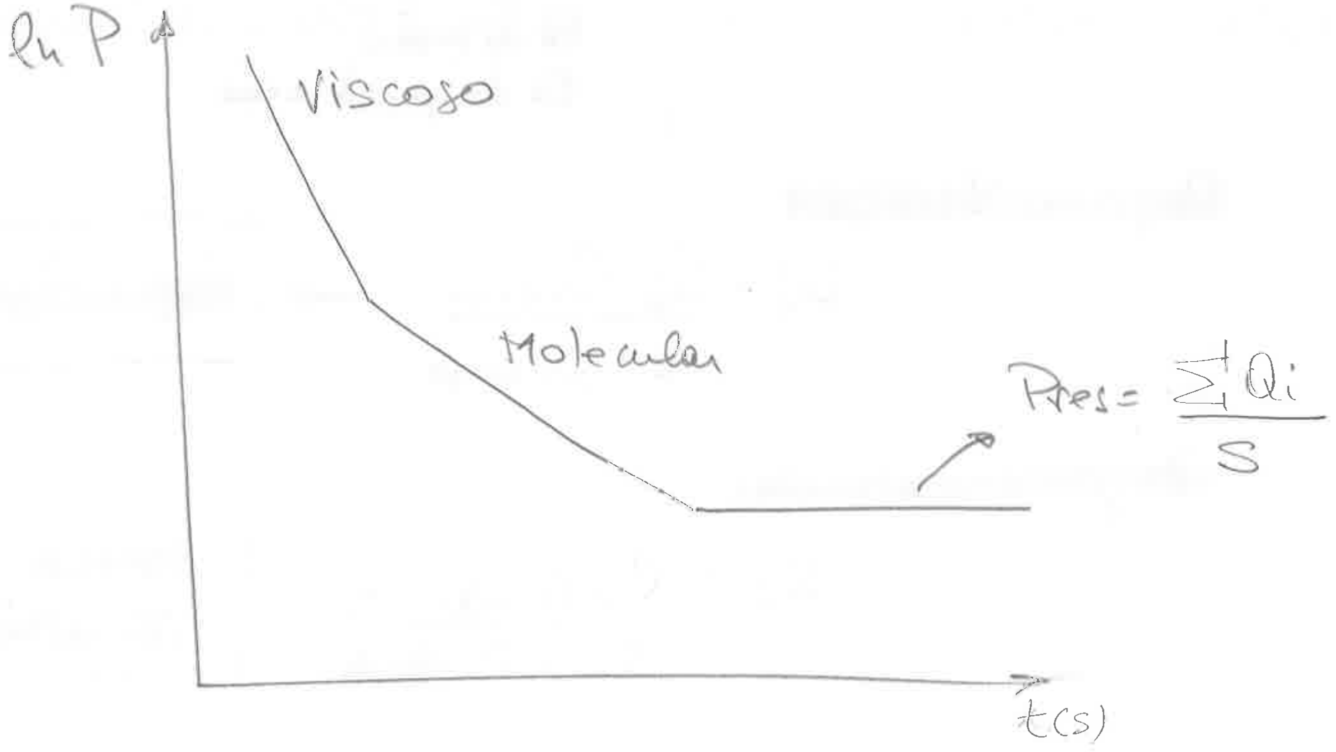
Depende da condutância

Como a velocidade da bomba muda com o regime de escoamento, então o gráfico mono-log que descreve $P(t)$ deve apresentar duas retas com constantes de tempo do sistema diferentes

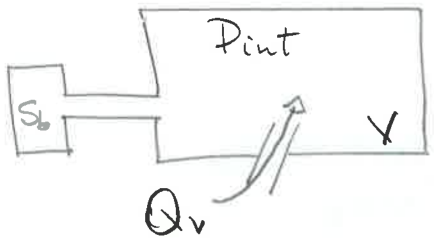
$$\boxed{\tau = V/S}$$

$$P = P_0\, e^{-\frac{S}{V} t}$$

$$\boxed{P = P_0\, e^{-t/\tau}}$$



VAZAMENTO REAL



Suponha um sistema conectado à pressão externa (ambiente) através de uma abertura de geometria variável.

O throughput (Q) pode ser relacionado à condutância dessa abertura ou ranhura através da equação:

$$Q = C\Delta P \longrightarrow Q = C\,(P_{ext} - P_{int})$$

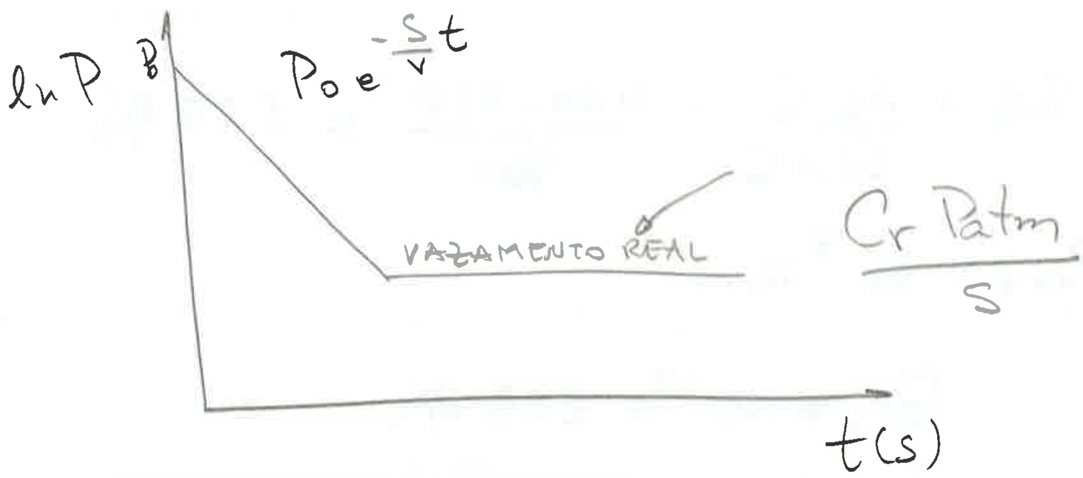
Supondo um único vazamento no sistema, temos que a pressão residual será:

$$P_{res} = \frac{\sum_i Q_i}{S} \rightarrow P_{res} = \frac{Q_v}{S}, \quad \boxed{Q_v = C P_{ext}}$$

Na maioria dos casos

$$P_{res} \simeq \frac{C P_{ext}}{S} \qquad \text{pois } P_{ext} \gg P_{int}$$

então $\boxed{P_{res} = \dfrac{C_r\, P_{atm}}{S}}$ C_r é a condutância do vazamento real



EXEMPLO: Bomba difusora de 4" (10,2 cm)

$$P_{sistema} \simeq 10^{-6}\ \text{Torr}$$ considerando $C \sim S_B$

Suponha que a pressão não diminui abaixo de 10^{-5} Torr devido a um vazamento real. Estime a abertura equivalente desse orifício

$$P_{res} = \frac{\sum_i Q_i}{S}$$ desprezando as outras fontes de vazamento

$$\boxed{P_{res} = \frac{Q_{VAZAMENTO}}{S_{ef\ \text{bomba difusora}}}}$$

$$S_{BD} = 50\%\ C_o$$

C_o é a condutância de uma abertura circular

$$C_o = 9D^2 \Longrightarrow \boxed{S_{BD} = 4{,}5\,D^2}$$

$$\begin{cases} S_{BD} \simeq 450\ \ell/s \\ C = 450\ \ell/s \end{cases}$$ considerando

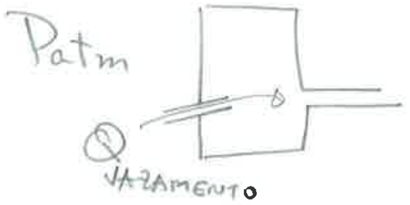
$$S_{ef} = \frac{S_b\,C}{S_b + C} = \frac{450 \times 450}{900} \simeq 225\ \ell/s$$

$$P_{res} = 10^{-5}\ \text{Torr}$$

$$Q_V = 10^{-5} \times 225\ \ell/s$$

$$\boxed{Q_V = 2{,}3 \times 10^{-3}\ \frac{\text{Torr}\,\ell}{s}}$$

Situação:



Sef BDifusora

$P_{atm} = 700$ Torr

$$Q_V = C_{VAZAMENTO}\,(P_{atm} - P_{sistema}) \qquad P_{atm} >> P_{sistema}$$

- No regime molecular
  $C_0 = 9D^2$ então $Q_V = 9D^2 P_{atm}$

- No regime viscoso seria $20A$ p/ $\underline{P_2 < 0{,}1 P_i}$
  então $C = 20\dfrac{\pi D^2}{4}$ $\therefore$ $C_{viscoso} = 15D^2$ MOSTRAR TRANSPARÊNCIA
  MESMA ORDEM DE GRANDEZA

substituindo

$$Q_V = 2{,}25 \times 10^{-3}\ \frac{Torr\ \ell}{s}$$

$$2{,}25 \times 10^{-3} = 9D^2\, 700$$

$$\therefore \boxed{D = 6 \times 10^{-4}\ cm}$$

Esse é o tamanho da abertura

Informação

Para um sistema "sujo" a taxa de emissão de moléculas por desgaseificação é da ordem de $\boxed{10^{-6}\ \dfrac{Torr\ \ell}{s}}$

Enquanto que um sistema limpo essa taxa é bem menor $\boxed{10^{-9}\ \dfrac{Torr\ \ell}{s}}$

Considerando que o fluxo de massa (Q) calculado para a abertura seja proveniente da desgaseificação das paredes da câmara de D = 20 cm

$$A = \pi R^2 = \pi \frac{D^2}{4} = 314 \text{ cm}^2, \text{ então}$$

$$q_v = \frac{Q_v}{\text{area}} = \frac{2{,}25 \times 10^{-3}}{314} \frac{\text{Torr } \ell}{\text{s}} \simeq 7{,}2 \times 10^{-6} \frac{\text{Torr } \ell}{\text{s cm}^2}$$

ou seja, o vazamento calculado é uma fonte de gás permanente da mesma ordem de grandeza da taxa de desgaseificação de um sistema "sujo"!!

<u>EXERCÍCIO</u>: Qual seria o vazamento equivalente de um sistema limpo?

taxa de desgaseificação

$$q = 10^{-9} \frac{\text{Torr } \ell}{\text{s cm}^2} \longrightarrow Q = q A = 10^{-9} \times 314 \text{ cm}^2 = 3 \times 10^{-7} \frac{\text{Torr } \ell}{\text{s}}$$

$$Q_v = C_v P_{atm}$$

$$C_v = 9 D^2 \ \ell/\text{s} \qquad P_{atm} = 700 \text{ Torr}$$

então

$$3{,}1 \times 10^{-7} \frac{\text{Torr } \ell}{\text{s}} = 9 D^2 \, 700$$

$$D^2 = 5 \times 10^{-11}$$

$$\therefore \boxed{D = 7 \times 10^{-6} \text{ cm}}$$

700 Å

A mensagem mais importante é que os vazamentos devem ser evitados.

Exemplos de vazamentos reais:

- Ranhuras nas peças
- falhas nas soldas
- O'rings partidos ou velhos
- Riscos nas peças

Como detectar vazamentos reais?

1. Leitura dos manômetros
2. Conhecimento prévio do sistema de vácuo
3. Ouvir o vazamento
4. Usar alcool isopropílico (seringa)
   → Inicialmente o furo é tampado pelo alcool
   → Depois a leitura aumenta muito a se ter alcool ao invés de ar.

Lembrando: Medidores têm comportamentos distintos

5. Usar um detector de vazamentos
   → Espectrômetro de He

Vazamento Virtual

Este vazamento consiste em um volume de gás aprisionado internamente ao sistema de vácuo, sendo bombeado através de uma abertura de alta impedância contribuindo para o throughput dependente do tempo. Dessa forma, a queda de pressão do sistema como um todo é extremamente lenta.

CAVIDADE + ORIFÍCIO PEQUENO $\equiv$ VAZAMENTO VIRTUAL

Neste caso, $C_{vv} \ll S_b$ $\quad$ C_{vv} é a condutância da cavidade

lembrando que: $\boxed{-V\dfrac{dP}{dt} = Q - \sum_i Q_i}$

Analogamente, podemos escrever:

$$-V_c \frac{dP_c}{dt} = Q_{vv} \qquad Q_{vv} = C_{vv}(P_c - P_{int})$$

$P_c \gg P_{int}$ então $\boxed{Q_{vv} = C_{vv} P_c}$

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

$$\frac{dP_c}{dt} = -\frac{C_{vv}}{V_c} P_c \xrightarrow[\text{solução}]{} \boxed{P_c = P_0\, e^{-\frac{C_{vv}}{V_c} t}}$$

A Pressão residual do sistema nesse caso seria:

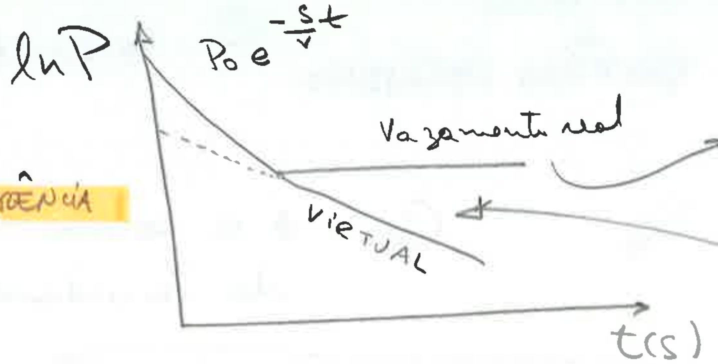
$$P_{res} = \frac{Q_{vv}}{S}$$

então $P_{res} = \frac{C_{vv} P_c}{S} \Longrightarrow \boxed{P_{res} = \frac{C_{vv}}{S} P_o' e^{-\frac{C_{vv}}{S} t}}$

$\frac{C_{vv} P_o'}{S}$ é constante!

P_o' pode ser estimado como sendo $\underline{P_o' = P_{atm}}$

TRANSPARÊNCIA



$$\boxed{P_r = \frac{C_r P_{atm}}{S}}$$

$$\boxed{\frac{C_{vv} P_o'}{S} e^{\frac{C_{vv}}{V_c} t}}$$

CUIDADO: O vazamento virtual pode "parecer" o vazamento real.

Devemos sempre nos preocuparmos com os possíveis vazamentos virtuais afim de evitá-los

transparências { gráficos $\ln P \times t$, soldas

Soldas