AULA 10 — Ciência e Tecnologia do Vácuo — 2022 — (1) 06/05/22

Passar a lista de presença
Distribuir lista 3

Resumo da aula anterior

Bombeamento no Regime Viscoso

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

$$S_{ef} = \frac{S_b C}{S_b + C} \qquad Q = P S_{ef} = \frac{P S_b E\bar{P}}{S_b + E\bar{P}} \qquad \bar{P} = \frac{P_1+P_2}{2}$$

APÓS UM BREVE DESENVOLVIMENTO $\Rightarrow$ $$\boxed{-\frac{V^2E}{S_b^2}\left(\frac{dP}{dt}\right)^2 + \frac{2V}{E}\left(\frac{dP}{dt}\right) + P^2 = 0}$$

Equação de 2º grau

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

MOSTRAR GRÁFICO $[S_b \times t/V]$

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

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

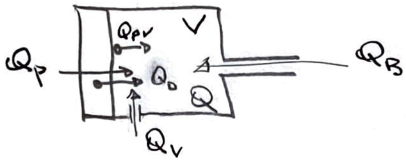
$$\frac{t}{V} = \frac{1}{S_b}\ln\frac{P_i+P_i}{P+P} \Rightarrow \boxed{\frac{t}{V} = \frac{1}{S_b}\ln\frac{P_i}{P}}$$

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

Bombeamento no Regime Molecular

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

fontes de gases



$$Q_G = Q_V + Q_{PV} + Q_B + Q_D + Q_P$$

$$Q_G = \sum_i Q_i$$

Equação Geral

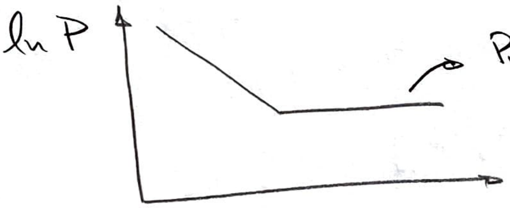
$$\boxed{-V\frac{dP}{dt} = PS - \sum_i Q_i}$$

Depois de um longo tempo $\frac{dP}{dt} \sim 0$ então $PS = \sum_i Q_i$

logo $\boxed{P_{res} = \frac{\sum_i Q_i}{S}}$ Fontes de gases X Velocidade de bombeamento.

Resolvendo a equação diferencial

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



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

constante de bombeamento $\boxed{\tau = V/S}$

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

então $2^{-1} = e^{-\frac{S}{V}t}$ $-\ln 2 = -\frac{S}{V}t \ln e$ $= 1$

$$t = \frac{V}{S}\ln 2 \equiv \boxed{t = \tau \ln 2}$$

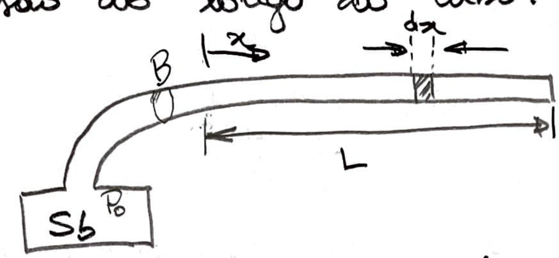
$$\boxed{T_{1/2} = \tau \ln 2}$$

Pressão ao longo do tubo

A. Roth

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

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



Supondo uma bomba de vácuo bombeando um tubo longo, de condutância C, fechado na outra extremidade.

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

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

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

O fluxo de massa (Q) que passa por um elemento de comprimento dx é dado por:

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

Podemos escrever a relação:

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

$\frac{d^2P}{dx^2} = \frac{dQ}{dx}\frac{1}{CL}$, mas $\frac{dQ}{dx} = -q\,B$ (equação I)

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

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{qB}{CL}x + k_1$$

Condição de contorno para calcular k_1

No final do tubo $\left.\frac{dP}{dx}\right|_{x=L} = 0$ em $x = L$

então $k_1 = \frac{qB}{CL}$

logo $\frac{dP}{dx} = -\frac{qBx}{CL} + \frac{qB}{C}$ integrando novamente

$$P(x) = -\frac{qBx^2}{2CL} + \frac{qBx}{C} + k_2$$

Condição de contorno para calcular k_2

Na boca do tubo $x = 0 \Longrightarrow P = P_0$

então $k_2 = P_0$

área do tubo $A = BL$

Mas, $Q = PS$ e $Q = qA$

então $P_0 = \frac{qA}{S}$, portanto:

$$\boxed{P_0 = \frac{qBL}{Sb}}$$

Então $\boxed{P_x = qB\left[\frac{L}{Sb} + \frac{x}{C} - \frac{x^2}{2CL}\right]}$

perfil da pressão segue uma parábola com concavidade para baixo

Os valores de pressão são dados por:

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

Para $P(L)$, temos:

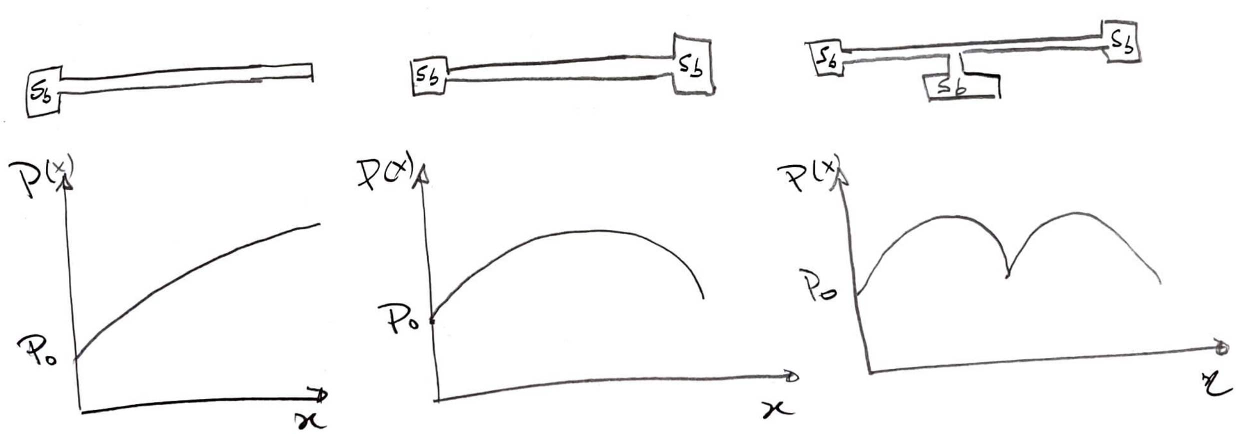
$$P_L - P_0 = qB\left[\frac{L}{C} - \frac{L^2}{2LC}\right] = \frac{qBL}{2C}$$

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

Independe da pressão.

Devido a esse resultado, para se bombear tubos muito longos, como os aceleradores de partículas (ex. Pelletron, RHIC, LHC etc) deve-se colocar um grande número de bombas ao longo do Tubo!

SLIDES



ESTUDO DE VAZAMENTOS

Tópicos

ⓐ Vazamento REAL (cte)
ⓑ Vazamento VIRTUAL (depende do tempo)
ⓒ Dimensão dos vazamentos
ⓓ Outras fontes de gases $\begin{cases} Q \text{ permeação} \\ Q \text{ difusão} \\ Q \text{ desgaseificação} \end{cases}$

Regime Viscoso

$\lambda << D$

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

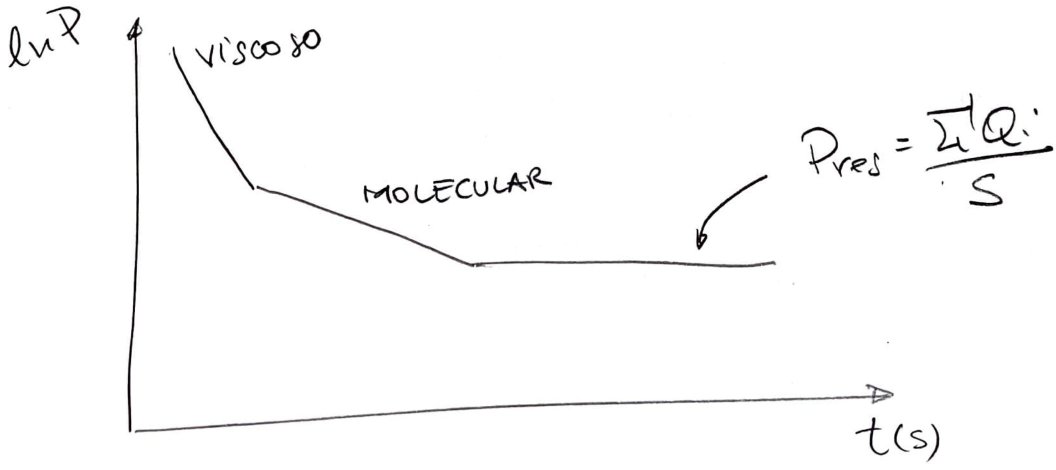
Regime Molecular

$\lambda >> D$

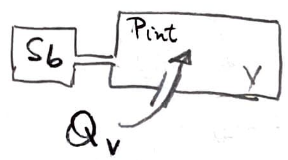
$$S_{ef} = \frac{S_b\, C_{molecular}}{S_b + C_{molecular}} \rightarrow$$ Depende da condutância

Como a velocidade de bombeamento efetiva muda com o regime de escoamento, então o gráfico mono-log que descreve $P(t)$ deve apresentar duas retas com constantes de tempo ($\tau = V/S$) diferentes.

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



VAZAMENTO REAL



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

O fluxo de massa (Q) pode ser relacionado com a condutância dessa abertura ou ranhura através da equação:

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

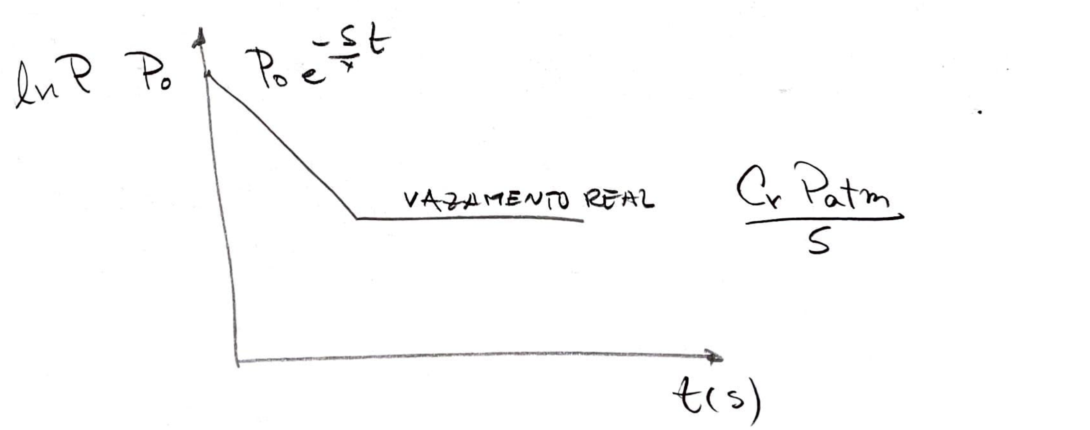
Supondo um único vazamento no sistema, temos que a pressão residual será:

$$P_{res} = \frac{\sum_i Q_i}{S} \Rightarrow P_{res} = \frac{Q_V}{S} \; ; \; \boxed{Q_V = C\,P_{ext}}$$

Na maioria dos casos

$$P_{res} \simeq \frac{C\,P_{ext}}{S} \quad \text{pois } P_{ext} >> P_{int}$$

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)

$P_{sistema} = 10^{-6}$ Torr   Considerando $C \sim S_b$

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

$P_{res} = \frac{\sum Q_i}{S}$ desprezando as outras fontes de gás.

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

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

C_o é a condutância de uma abertura circular (furo)

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

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

suposição do início do problema

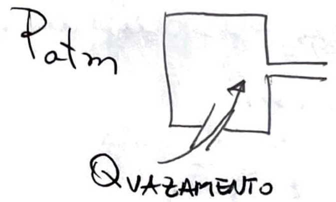
$$S_{ef} = \frac{S_b C}{S_b + C} = \frac{450 \times 450}{450 + 450} \simeq 225\ \ell/s$$

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

$$Q_v = 10^{-5}\ \text{Torr} \times 225\ \ell/s$$

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

Supondo a seguinte situação:



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

ⓐ No regime molecular

$C_0 = 9D^2$ então $\boxed{Q_V = 9D^2 P_{atm}}$

ⓑ No regime viscoso

$C = 20A$ para $P_2 < 0,1 P_i$

$C = 20\frac{\pi D^2}{4} \therefore C_{viscoso} = 15D^2$ MOSTRAR SLIDE

→ As condutâncias nos dois regimes têm a mesma ordem de grandeza

Substituindo

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

$2,25 \times 10^{-3} = 9D^2\,700 \therefore \boxed{D = 6 \times 10^{-4}\,cm}$ TAMANHO DO FURO

$D \sim 6\,\mu m$

Comentários

Em um sistema "sujo" a taxa de emissão de moléculas por desgaseificação é da ordem de $10^{-6} \frac{Torr\,\ell}{s\,cm^2}$

A taxa de desgaseificação de um sistema "limpo" pode ser da ordem de $10^{-9} \frac{Torr\,\ell}{s\,cm^2}$

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

$$A = 4\pi R^2 = \pi D^2 = 1256\,cm^2, \text{ então}$$

$$q_v = \frac{Q_v}{\text{area}} = \frac{2{,}25 \times 10^{-3}}{1256} \frac{Torr\,l}{s\,cm^2} \simeq 18 \times 10^{-6} \frac{Torr\,l}{s\,cm^2}$$

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

EXERCÍCIO Qual seria o vazamento equivalente de um sistema "limpo". ($D = 20\,cm$)

taxa de desgaseificação

$$q = 10^{-9} \frac{Torr\,l}{s\,cm^2} \longrightarrow Q = qA = 10^{-6} \times 1256 = 1{,}2 \times 10^{-6} \frac{Torr\,l}{s}$$

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

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

então: $1{,}2 \times 10^{-6} \frac{Torr\,l}{s} = 9D^2\,700$

$$D^2 = 1{,}2 \times 10^{-10}$$

$$\therefore \boxed{D = 1{,}1 \times 10^{-5}\,cm}$$

$1000\,\mathring{A}$

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

Exemplos de vazamentos reais:

- Ranhuras/Riscos nas peças sobre os o'rings
- falhas nas soldas
- O'rings partidos ou com ranhuras

Como ter indicações da existência de vazamentos reais

(a) Leitura dos manômetros e conhecimento prévio do sistema de vácuo

(b) Ouvir o vazamento

(c) Usar alcool isopropílico (seringa)

- Inicialmente o furo é tampado pelo alcool e a pressão diminui
- Depois a leitura do valor da pressão aumenta muito por causa de estar num ambiente com alcool ao invés de ar

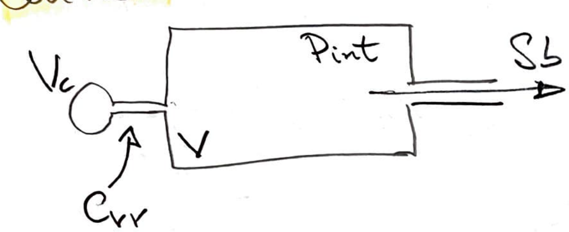
(Medidores Pirani se comportam de maneira diferente para gases diferentes)

(d) Para detectar vazamentos pequenos deve ser usado um detector de vazamentos (leak detector)

Leak detector ≡ Espectrômetro de massa calibrado para He.

Vazamento Virtual

Esse vazamento consiste em um pequeno volume de gás aprisionado dentro do sistema de vácuo, sendo bombeado através de uma abertura com alta impedância, contribuindo para um fluxo de massa (throughput) dependente do tempo. Dessa forma, a queda de pressão do sistema $[P(t)]$ pode ser extremamente lenta



CAVIDADE + ORIFÍCIO PEQUENO $\equiv$ VAZAMENTO VIRTUAL

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

$$\boxed{-V\frac{dP}{dt} = Q - \sum_i Q_i}$$

Analogamente, podemos escrever.

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

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

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

$$\frac{dP_c}{dt} = -\frac{C_{vv} P_c}{V_c} \xrightarrow[\text{Solução}]{} \boxed{P_c = P_0' \, e^{-\frac{C_{vv}}{V_c}t}}$$

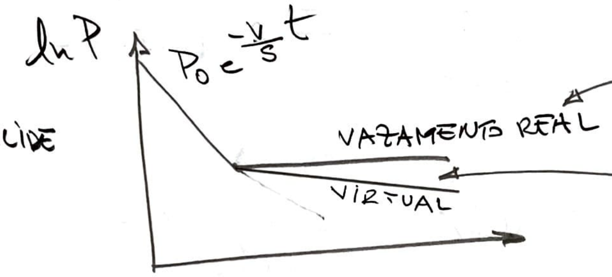
A pressão residual do sistema, neste caso, será:

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

então $P_{res} = \dfrac{C_{vv} P_c}{S} \Rightarrow \boxed{P_{res} = \dfrac{C_{vv}}{S} P_0' \, e^{-\frac{C_{vv}}{V_c} t}}$

Note que o termo $\dfrac{C_{vv} P_0'}{S}$ é constante

P_0' pode ser estimado como sendo $P_0' = P_{atm}$



$$\boxed{P_R = \frac{C_R P_{atm}}{S}}$$

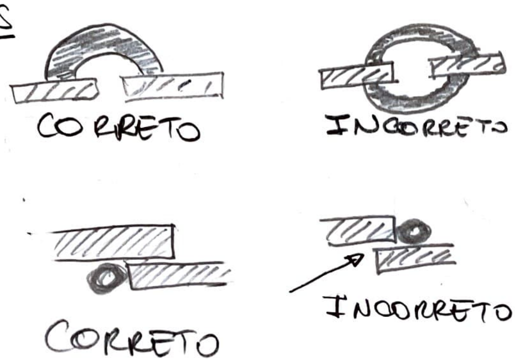
$$\boxed{\frac{C_{vv} P_0'}{S} e^{-\frac{C_{vv}}{V_c} t}}$$

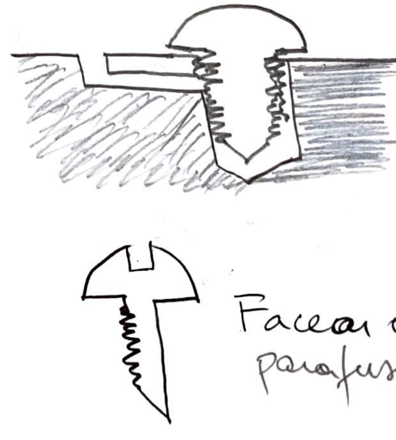
Atenção: O vazamento virtual pode "parecer" o vazamento real.

Devemos procurar evitar <u>sempre</u> vazamentos virtuais
o projeto deve evitar o aparecimento de volumes conectados ao sistema com grandes impedâncias.

SLIDES { GRÁFICOS ln P x t
soldas.

<u>SOLDAS</u>





Facear os parafusos.