AULA 10 — Ciência e Tecnologia do Vácuo (1)

24/09/24

- 2024 -

Passar lista de presença
distribuir lista 3,
perguntar sobre relatórios
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 $\Rightarrow$

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

eq. 2º grau

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

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

MOSTRAR GRÁFICO $[S_b \times t/V]$

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

Para $L \to 0$ em $E \to \infty$, então

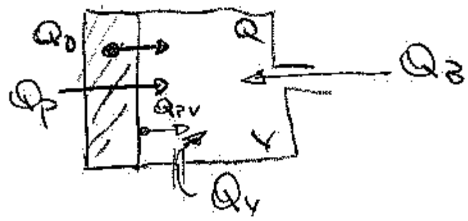
$$\frac{t}{V} = \frac{1}{S_b}\ln\frac{P_i + P_i}{P + P} \Rightarrow \boxed{\frac{t}{V} = \frac{1}{S_b}\ln\frac{P_i}{P}}$$

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

Bombeamento no Regime Molecular

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

Fontes de Gases



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

$$\boxed{Q_G = \sum Q_i}$$

Equação Geral

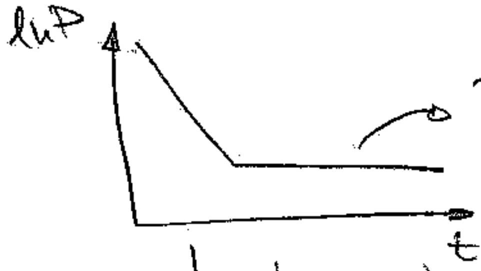
$$\boxed{-V\frac{dP}{dt} = PS - \sum Q_i}$$

Depois de um longo tempo $\frac{dP}{dt} \to 0$ então $\boxed{PS = \sum Q_i}$

logo $\boxed{P_{res} = \frac{\sum Q_i}{S}}$ Fontes de gases X velocidade de bombeamento

Resolvendo a equação diferencial

$$\boxed{P = P_0 e^{-\frac{S_0}{V}t} + P_{res}}$$



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

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 $\ln 2^{-1} = \ln e^{-\frac{S}{V}t}$ $\quad -\ln 2 = -\frac{S}{V}t \underbrace{\ln e}_{=1}$

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

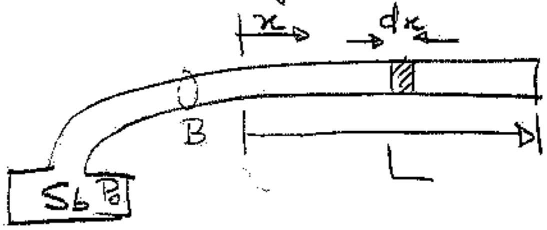
$$\therefore \boxed{T_{1/2} = \tau \ln 2}$$

Pressão ao longo do tubo

A. Roth

Na condição estacionária $P_{res} = \frac{\sum_1^n Q_i}{S}$; $Q_G = \sum_1^n Q$

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 $\left[\frac{Torr\,l}{s} \frac{1}{cm^2} \right]$

$$\boxed{-dQ = q\,B\,dx \quad (1)}$$ 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 $Q = C\Delta P \longrightarrow$ $$\boxed{Q = C\,dP\,\frac{L}{dx}}$$

Podemos escrever a relação:

$$dQ = CL\,\frac{d^2P}{dx^2}\,dx \qquad (11)$$

$$\frac{dP^2}{dx^2} = \frac{dQ}{dx}\frac{1}{CL}\,, \quad \text{mas} \quad \frac{dQ}{dx} = -qB \quad \text{(equação 1)}$$

então $$\boxed{\frac{d^2P}{dx^2} = -\frac{qB}{CL}}$$ 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 $k_1 = \frac{qB}{C}$

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

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

condição de contorno para calcular k_2

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

então $k_2 = P_0$

Mas, $Q = PS$ e $Q = qA$ ← área do tubo $A = BL$

então $P_0 = \frac{Q}{S} = \frac{qA}{S} = \frac{qBL}{S}$

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

Reescrevendo

$$\boxed{P(x) = qB\left[\frac{L}{S_b} + \frac{x}{C} - \frac{x^2}{2CL}\right]}$$

Perfil da pressão em um tubo segue uma parábola com concavidade para baixo.

Os valores da pressão em um tubo são dados por: ③

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

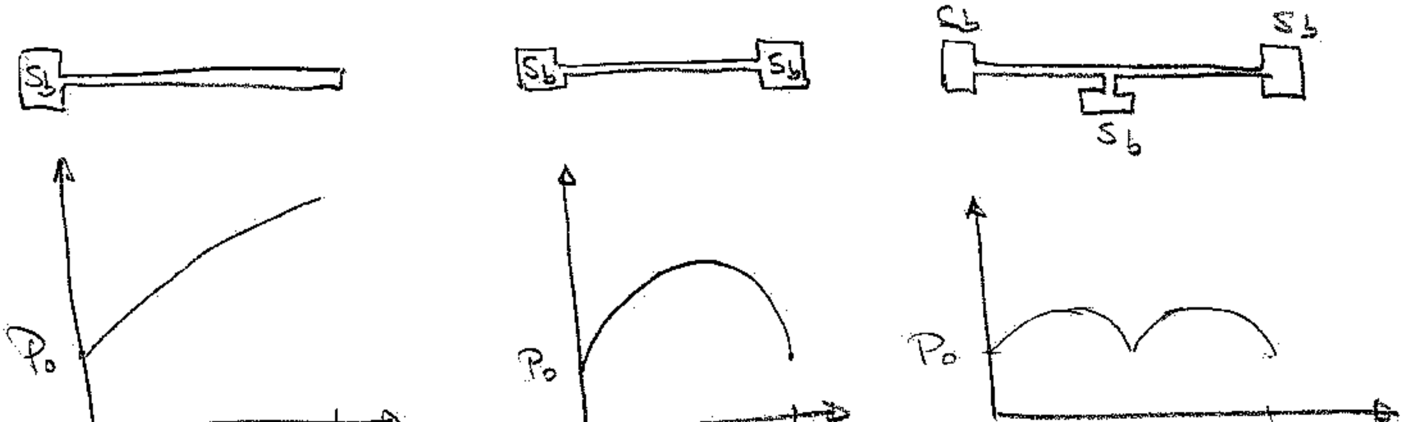
Para $P(L)$, temos

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

$$\therefore \boxed{P_L - P_0 = \frac{qBL}{2C}}$$ Independente da pressão.

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

SLIDES



ESTUDO DE VAZAMENTOS

Tópicos
ⓐ Vazamento REAL (cte)
ⓑ Vazamento VIRTUAL (dependente do tempo)
ⓒ Dimensão dos VAZAMENTOS
ⓓ Outras fontes de gases $\left\{ \begin{array}{l} Q \text{ permeação} \\ Q \text{ difusão} \\ Q \text{ desgaseificação} \end{array} \right.$

Regime Viscoso

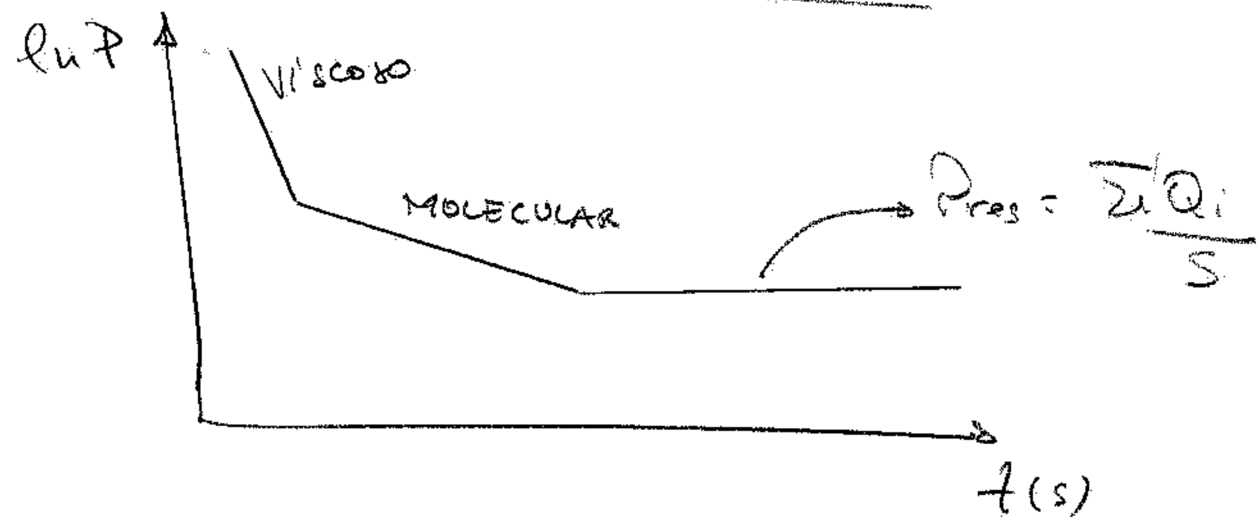
$\lambda << D$ $\qquad S_{ef} = \dfrac{S_b \, C_{viscoso}}{S_b + C_{viscoso}} \longrightarrow \boxed{S_{ef} \sim S_b}$

Regime Molecular

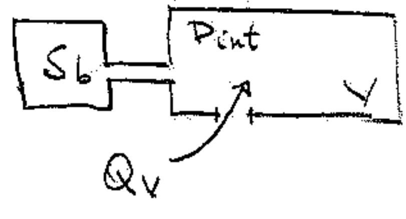
$\lambda >> D$ $\qquad S_{ef} = \dfrac{S_b \, C_{molecular}}{S_b + C_{molecular}} \Longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{Depende da} \\ \text{condutância} \end{array} \right.$

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

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



VAZAMENTO REAL



Suponha um sistema de vácuo conectado à pressão externa através de uma abertura de geometria variável.

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

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

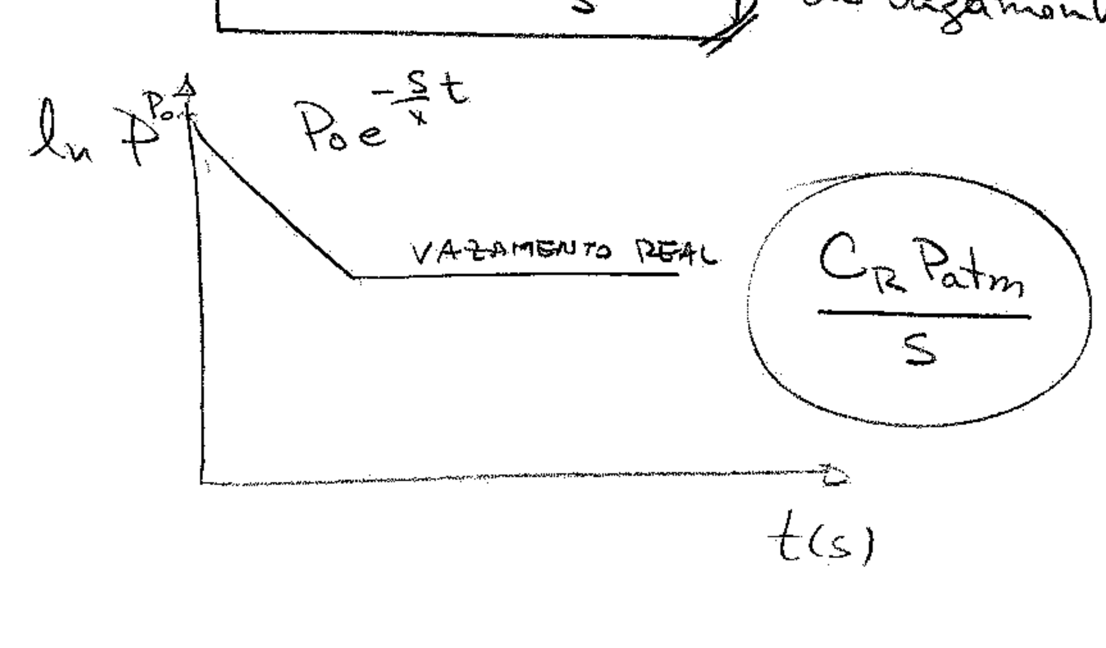
Supondo um único vazamento no sistema, temos que a pressão residual será:

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

Na maioria dos casos

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

então $\boxed{P_{RES} = \frac{C_R\,P_{atm}}{S}}$ C_R é a condutância do vazamento real



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

$P_{SISTEMA} = 10^{-6}$ 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?

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

desprezando as outras fontes de gases

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

$S_{BD} = 50\%\ C_0$

C_0 é a condutância de uma abertura circular

$$C_0 = 9D^2 \longrightarrow S_{BD} \simeq 4{,}5\,D^2$$

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

suposição do início do problema

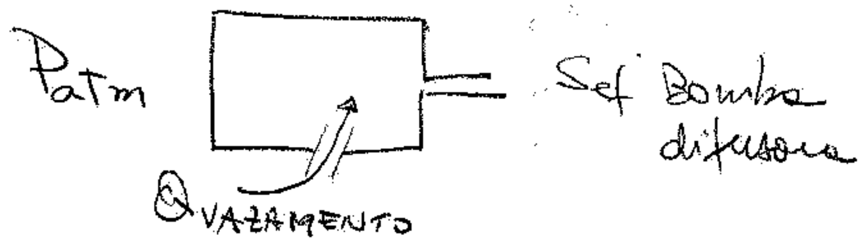
$$S_{ef} = \frac{S_b C}{S_b + C} = \frac{450 \times 450}{450 + 450} \simeq 225\ \ell/s$$

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



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

(a) No regime molecular

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

(b) No regime viscoso

$$C = 20A \quad \text{Para } P_2 < 0{,}1 P_1$$

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

MOSTRAR SLIDE

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

Substituindo:

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

$$2{,}25 \times 10^{-3} = 9D^2 \times 700 \quad \therefore \quad \boxed{D = 6 \times 10^{-4}\,cm}$$ 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 $\boxed{10^{-6} \frac{Torr\,\ell}{s\,cm^2}}$

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

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

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

$$q_v = \frac{Q_v}{\text{área}} = \frac{2{,}25 \times 10^{-3}}{1256} \frac{Torr\,\ell}{s\,cm^2} \simeq 1{,}8 \times 10^{-6} \frac{Torr\,\ell}{s\,cm^2}$$

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"!

<u>EXERCÍCIO</u> Qual seria o vazamento equivalente de um sistema "limpo" (D = 20 cm)

TAXA DE DESGASEIFICAÇÃO

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

$$Q_v = C\Delta P = C\,(P_{ext} - \cancel{P_{int}}^{\,0}) = C\,P_{ext} = C\,P_{atm}$$

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

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

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

$$\therefore \boxed{D = 1{,}1 \times 10^{-5} \ cm} \qquad 1000 \ \text{Å}$$

Mensagem mais importante dessas estimativas

→ 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) Conhecimento prévio do sistema de vácuo e leitura dos manômetros.

(b) Ouvir o vazamento

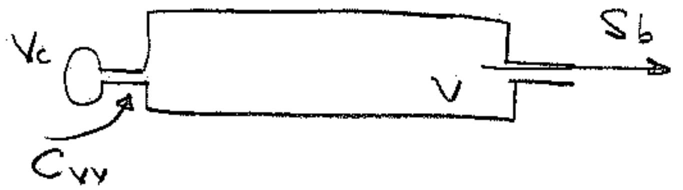
(c) Usar alcool isopropílico (com seringa)
   - Inicialmente e furo é tampado pelo alcool e a pressão diminui.
   - Depois o valor da leitura aumenta muito por estar num ambiente com alcool ao invés de ar.
   (Medidores Pirani, Termopar e Thermistor se comportam de maneira diferente para gases diferentes)

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

Leak detector ≡ Espectrômetro de massa calibrado para He.

VAZAMENTO VIRTUAL

Este 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 da pressão do sistema P(t) pode ser extremamente lenta!



CAVIDADE + ORIFÍCIO PEQUENO $\equiv$ VAZAMENTO VIRTUAL

Neste caso, $C_{vv} \ll S_b$ 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 $\boxed{Q_{vv} = C_{vv}P_c}$

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

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

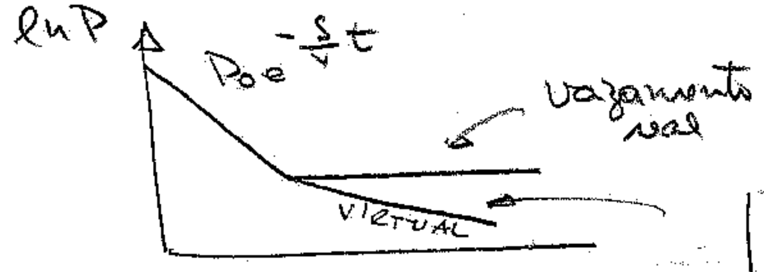
A pressão residual do sistema, será:

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

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

Note que o termo $\frac{C_{VV} P_0'}{S}$ é constante

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



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

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

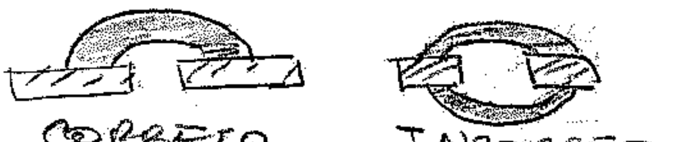
Atenção: O vazamento virtual pode "parecer" o real

Devemos evitar sempre vazamentos virtuais

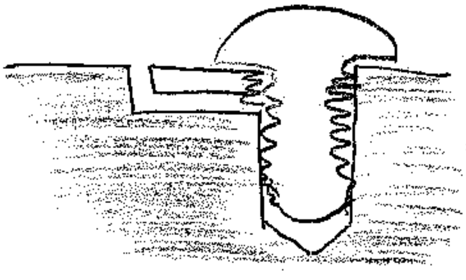
No projeto deve-se evitar o aparecimento de volumes conectados ao sistema com grandes impedâncias

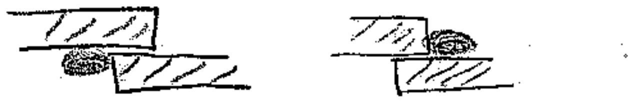
SLIDES { GRÁFICOS lnP x t
<u>Soldas</u>

Soldas

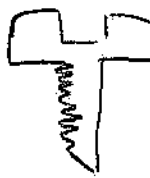


CORRETO INCORRETO





CORRETO INCORRETO



FACEAR OS PARAFUSOS