Ciência e Tecnologia do Vácuo

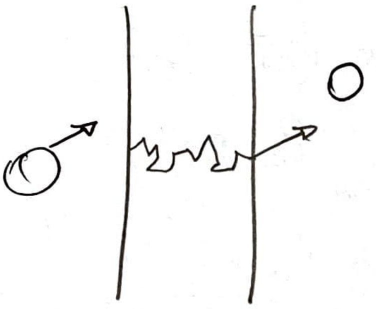
- 2022 -

Fontes de gases em um sistema de vácuo

Ref. J. O'Hanlon - A user's guide to vacuum technology
G. Lewin - Fundamentals of Vacuum technology
A. Roth - Vacuum Technology.

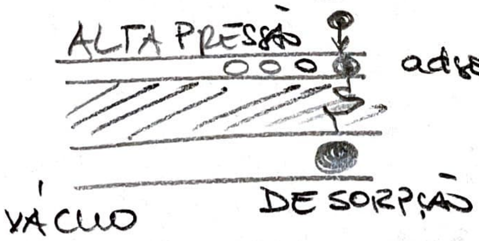
MOSTRAR SLIDES

Permeação de Gases   Roth cap. 4



① Adsorção de gás pela superfície onde a pressão é alta.

Depois de ser absorvido o gás se dirige para o gradiente de concentração e difunde para o lado da superfície onde tem baixa pressão e é "desorbido"!!



GASES DIATÔMICOS: A molécula se divide durante a passagem, mas se recombina no volume.

Pequenas concentrações: Os gases usualmente se dissolvem em sólidos de acordo com a lei de Henry

$$\boxed{c = s P^n}$$

Físico/químico
William Henry (botânico) 1775 - 1836

$$\boxed{C = s P^n}$$

$C \equiv$ concentração
$s \equiv$ solubilidade
$P \equiv$ Pressão do gás

$$n = \begin{cases} 1 & \text{Todos os gases em não metais} \\ 1/2 & \text{gases diatômicos em metais} \end{cases}$$

$[C] \equiv$ Torr ou atm

$[s] \equiv$ solubilidade $\begin{cases} n = 1 & \text{sem dimensão} \\ n = 1/2 & 1/\sqrt{atm} \end{cases}$

C é a quantidade de gás em Torr cm^3 ou atm cm^3 em $T = 293\,K$ que é dissolvido em $1\,cm^3$ da substância.

s é a quantidade de gás em cm^3 nas CNTP que está dissolvido em $1\,cm^3$ do material em uma pressão $P = 1$ atm.

Se existir uma diferença de pressão, o gás difunde no estado estacionário de acordo com a lei de difusão, dada pela 1ª lei de Fick.

No regime estacionário

1ª lei de Fick

$$\boxed{Q = -D \frac{dc}{dx}}$$

Adolf Fick (1855)
(1829 - 1901)
Fisiologista alemão

Q é o fluxo de gás através de uma área transversal unitária.

O sinal negativo é devido ao fato do fluxo ser oposto ao gradiente de concentração.

$Q \equiv$ throughput por unidade de área $\frac{\text{Torr}\,\ell}{\text{cm}^2\,\text{s}}$ $[q]$

D é o coeficiente de difusão $[D] = \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$

A constante de difusão diminui exponencialmente com a temperatura.

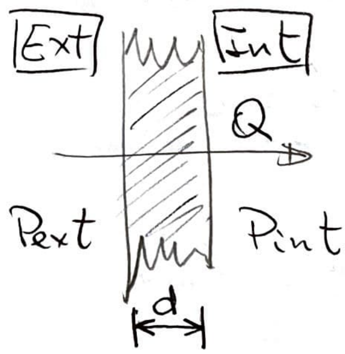
$$\boxed{D = D_0\, e^{-E/RT}}$$

E é a energia de ativação por difusão, sendo expressa usualmente em $\frac{\text{kcal}}{\text{mol}}$

R é a constante universal dos gases

D_0 é uma constante de proporcionalidade.

Considerando uma seção reta de área unitária dentro de uma parede muito extensa, com espessura d e pressões P_1 e P_2 em suas faces.



As concentrações nas superfícies podem ser descritas por:

$c_1 = s P_1^n$ e $c_2 = s P_2^n$ | $\boxed{\text{Lei de Henry}}$

Como $Q = -D\dfrac{dc}{dx}$, então $\boxed{\text{1ª Lei de Fick}}$

$$Q\int_0^d dx = -D\int_{c_1}^{c_2} dc \Longrightarrow Qd = -D\,(c_2 - c_1)$$

$$Q = \frac{D}{d}(c_1 - c_2) \xrightarrow[\text{a lei de Fick}]{\text{substituindo}} Q = \frac{Ds\,(P_1^n - P_2^n)}{d}$$

Ds é a constante de permeação K

$$\boxed{Ds = K(T)}$$

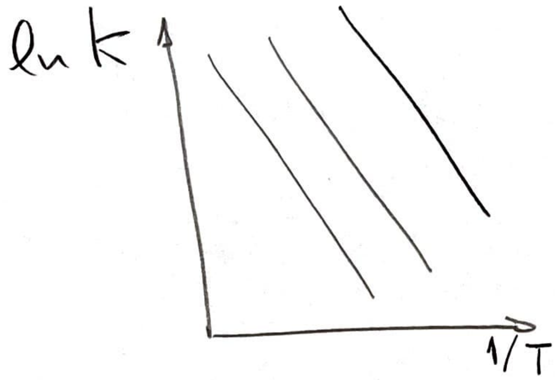
K é expresso como a quantidade de gás, em cm^3 nas CNTP, que difunde através de uma área em uma parede de espessura 1 cm para uma diferença de pressão de 1 atm.

(3)

$$\underline{K = K_0 \, e^{-E/RT}}$$

$\ln K = \ln K_0 - \frac{E}{RT}$ $\boxed{\text{reta} \Rightarrow y = ax + b}$

gráfico de $\ln K$ em função de $1/T$ $\boxed{\text{SLIDE}}$



Para diferentes gases permeando em diferentes materiais

Para $n = 1$ Todos os gases em não metais

$K \left(\frac{cm^2}{s}\right)$ $Q \left(\frac{cm^3 \, atm}{s \, cm^2}\right)$

Para $n = 1/2$ Gases diatômicos em metais

$K \left(\frac{cm^2 \sqrt{atm}}{s}\right)$ $Q \left(\frac{cm^3 \, atm}{s \, cm^2}\right)$

Transformação de unidades

cm^3 —— ℓ

atm —— Torr

$Q \left(\frac{Torr \, \ell}{s \, cm^2}\right)$

Exemplo 1

N_2 em neoprene

$n = 1$ gás em não metal

$$Q = \frac{K(P_{ext} - P_{int})}{d}$$

dados $T = 330 K$ $P_{ext} = 700$ Torr

$d \sim 0{,}3$ cm $P_{ext_{N_2}} = 80\%\ P_{ext}$

Pelo gráfico da curva 18 (pag 27 do G. Lewin), temos:

$$\frac{10^3}{T} \sim \frac{1000}{330} \qquad K = 10^{-7}\ \frac{cm^2}{s} \ ; \quad n = 1$$

$$P_{ext} = 80\%\,(700)\ \text{Torr} \qquad \boxed{P_{ext_{N_2}} = 560\ \text{Torr}}$$

$$Q = \frac{10^{-7}(560)}{0{,}3}\ \frac{cm^2\ \text{Torr}}{s\ cm}$$

$$Q = 1{,}9 \times 10^{-4}\ \frac{\text{Torr}}{s}\ \frac{cm^3}{cm^2} = 1{,}9 \times 10^{-4}\ \frac{\text{Torr}}{s}\ \frac{10^{-3}\,\ell}{cm^2}$$

$$\boxed{Q' = q = 1{,}9 \times 10^{-7}\ \frac{\text{Torr}\,\ell}{s\ cm^2}}$$

Supondo um tubo de neoprene de $D = 1''$ e $L = 1$ m

$$\text{Área} = \pi D L = \pi\,(2{,}5)\,100 = 785\ cm^2$$

$$Q = q A = 1{,}9 \times 10^{-7} \times 785 \longrightarrow \boxed{Q = 1{,}5 \times 10^{-4}\ \frac{\text{Torr}\,\ell}{s}}$$

Supondo o tubo estar conectado a uma bomba com $S \cong 100\ \frac{\ell}{s}$

$$P_{res} = \frac{Q}{S} = \frac{1{,}5 \times 10^{-4}}{100} \cong 10^{-6}\ \text{Torr}$$

Conclusão:

Não usar tubos de neoprene em sistemas de alto vácuo!!

(b) Qual o diâmetro do furo equivalente?
(VAZAMENTO)

$$Q = C\,\Delta P$$

$$1{,}5\times10^{-4} = C\,(P_{ext} - \cancel{P_{int}}^{\,0})$$

$$1{,}5\times10^{-4} = C\,P_{ext}$$

$$C = \frac{1{,}5\times10^{-4}}{560} \qquad \underline{C \simeq 15D^2} \quad \left(\text{Regime Viscoso}\right)$$

$$15D^2 = \frac{1{,}5\times10^{-4}}{560}$$

$$\boxed{D \sim 1{,}3\times10^{-4}\ \text{cm}}$$

$$D \sim 1{,}3\ \mu m$$

O vazamento real de um orifício dessas dimensões é equivalente ao se usar um tubo de neoprene de $\underline{D = 1''}$ e $\underline{L = 100\ \text{cm}}$

Exemplo 2 N_2 em câmara de Fe

Neste caso, $n = 1/2$ (gás diatômico em metal)

Espessura da câmara de Fe $\boxed{d \sim 0{,}2\,cm}$

Para estimar o valor de K ($K = Ds$) devemos extrapolar a curva 4 do gráfico 3-3 pag 28 do livro de G. Lewin.

Pelo menos $K = 10^{-12} \dfrac{cm^2 atm^{1/2}}{s}$ $\qquad \dfrac{10^3}{T} \sim \dfrac{1000}{330} \sim 3$

$$Q = \frac{K}{d}\left(P_{ext}^{1/2} - \cancel{P_{int}^{1/2}}_{\,0}\right) = \frac{10^{-12} P_{ext}^{1/2}}{d} \quad \frac{cm^2\, atm^{1/2}}{s} \quad \frac{atm^{1/2}}{cm}$$

80% N_2 $\qquad$ 1 atm — 760 Torr $\qquad \Rightarrow \boxed{P_{ext} = 0{,}74\,atm}$

$\qquad\qquad\quad$ x — 560 Torr

$$Q' = q = \frac{10^{-12}(0{,}74)^{1/2}}{0{,}2} \Rightarrow Q' = 4{,}3 \times 10^{-12} \frac{cm^3}{s} \frac{atm^1}{cm^2}$$

Mudança de variáveis

$$Q' = q = 4{,}3 \times 10^{-12} \frac{cm^3}{s} \frac{atm}{cm^2} = 4{,}3 \times 10^{-12} \frac{(10^{-3}\ell)(760\,Torr)}{s \quad cm^2}$$

$$\boxed{Q' = q = 3{,}3 \times 10^{-12} \frac{Torr\,\ell}{s\,cm^2}}$$

Supondo uma câmara esférica de D = 20 cm

$$A = \pi D^2 = \pi (20)^2 = 1257 \text{ cm}^2$$

$$P_{res} = \frac{\sum Q_i}{S} = \frac{q A}{S} = \frac{3{,}3 \times 10^{-12}}{S} \frac{\text{Torr l}}{\cancel{\text{cm}^2}\text{ s}} \times 1257 \cancel{\text{cm}^2}$$

$$P_{res} = \frac{4{,}1 \times 10^{-9}}{S} \frac{\text{Torr l}}{\text{s}}$$

Se a velocidade da bomba for $S_b = 100$ l/s, então

$$\boxed{P_{res} = 4{,}1 \times 10^{-11} \text{ Torr}}$$

EVITAR FERRO FUNDIDO

Conclusão: Em sistemas de alto vácuo, usar sempre metais!

(b) Qual o diâmetro equivalente?

$$Q = C \Delta P \qquad Q = 10^{-9} \frac{\text{Torr l}}{\text{s}}$$

$$10^{-9} = 15 D^2 (560)$$

ou

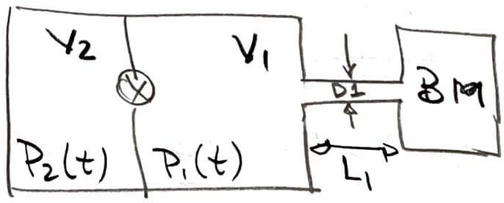
$$9 D^2$$

$$D \sim 10^{-7} \text{ cm}$$

$$\boxed{D \sim 10 \text{ Å}}$$

Exercício: função P(t) (6)

Considere um sistema de vácuo conforme a figura abaixo



dados:

$\begin{cases} L_1 = 60\,cm \\ D_1 = 5\,cm \\ S_b = 150\,\ell/min \end{cases}$ $\begin{cases} V_1 = 10\,\ell \\ V_2 = 10\,\ell \end{cases}$

VÁLVULA $\begin{cases} D = 1\,mm \\ L = 40\,mm \end{cases}$

O volume V_1 é bombeado desde a pressão atmosférica pela bomba de 150 l/min. A válvula entre V_1 e V_2, mesmo fechada, se comporta como se houvesse um canal de passagem com $D = 1{,}0\,mm$ e $L = 40\,mm$.

A menor pressão do sistema (Pres) é da ordem de 10^{-4} Torr. Considere gás N_2 à temperatura ambiente.

(a) Faça o gráfico $P_1(t)$ e $P_2(t)$ em função do tempo a partir de $P_0 = 1\,atm$.

(b) Qual o tempo necessário para V_1 e V_2 atingirem a pressão residual $P_{res} = 10^{-4}$ Torr?

Resolução

(a) $\frac{1}{C_1} = \frac{1}{C_{o1}} + \frac{1}{C_{t1}}$ $\begin{cases} C_{o1} = 9D^2 = 9 \times 5^2 = 225\,\ell/s \\ C_{t1} = \frac{12D^3}{L} = \frac{12(5)^3}{60} = 25\,\ell/s \end{cases}$

$\frac{1}{C_1} = \frac{1}{225} + \frac{1}{25} \Rightarrow \boxed{C_1 = 22{,}5\,\ell/s}$

$\frac{1}{C_2} = \frac{1}{C_{o2}} + \frac{1}{C_{t2}}$ $\begin{cases} C_{o2} = 9D^2 = 9(0{,}1)^2 = 0{,}09\,\ell/s \\ C_{t2} = \frac{12D^3}{L} = \frac{12(0{,}1)^3}{4} = 0{,}003\,\ell/s \end{cases}$

$\frac{1}{C_2} = \frac{1}{0{,}09} + \frac{1}{0{,}003} \Rightarrow \boxed{C_2 = 0{,}003\,\ell/s}$

Bomba de vácuo $S_b = 150\ \ell/min \Rightarrow \boxed{S_b = 2{,}5\ \ell/s}$

$$S_{ef_1} = \frac{S_b C_1}{S_b + C_1} = \frac{2{,}5 \times 22{,}5}{2{,}5 + 22{,}5} = 2{,}25\ \ell/s$$

$$S_{ef_2} = \frac{S_b C_2}{S_b + C_2} = \frac{2{,}5 \times 0{,}0029}{2{,}5 + 0{,}0029} = 0{,}0029\ \ell/s$$

Vazamento Virtual

$$P_2(t) = P_0\, e^{-\frac{S_{ef_2}}{V_2} t} + P_{res} = 700\, e^{-\frac{0{,}0029t}{10}} + P_{res}$$

$$P_1(t) = P_0\, e^{-\frac{S_{ef_1}t}{V_1}} + P_{\text{VAZAMENTO VIRTUAL}}$$

$$P_1(t) = 700\, e^{-\frac{2{,}25t}{10}} + \frac{C_x P_0}{S_{ef_1}}\, e^{-\frac{C_x}{V_2}t}$$

$$P_1(t) = 700\, e^{-0{,}225t} + \frac{2{,}9 \times 10^{-3} \times 700}{2{,}25}\, e^{-\frac{0{,}0029}{10}t}$$

$$\boxed{P_1(t) = 700\, e^{-0{,}225t} + 0{,}9\, e^{-0{,}00029t}}$$

(b) $\boxed{P_1(t) = 0{,}9\, e^{-0{,}00029t}}$ $\qquad P_1(t) = 10^{-4}\ \text{Torr}$

$$\ln\frac{10^{-4}}{0{,}9} = -0{,}00029t \Rightarrow \boxed{t = 31396\ s = 8{,}7\ \text{horas}}$$

$\boxed{P_2(t) = 700\, e^{-0{,}00029t}}$ $\qquad P_2(t) = 10^{-4}\ \text{Torr}$

$$\ln\frac{10^{-4}}{700} = -0{,}00029t \Rightarrow \boxed{t = 54350\ s = 15\ \text{horas}}$$

Mostrar slides