Ciência e Tecnologia do Vácuo

AULA 17

2018

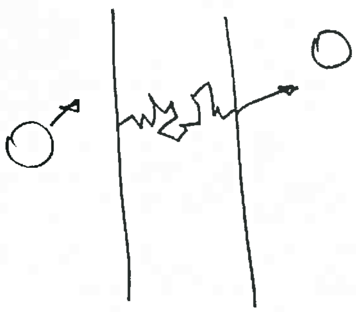
Fontes de gases de um sistema de vácuo

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

MOSTRAR TRANSPARÊNCIAS

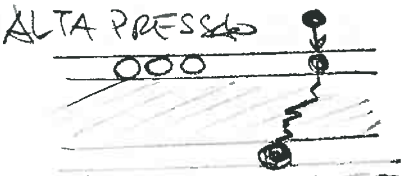
Permeação de gases

Roth cap 4



(1) Adsorção do 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 vácuo 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
Willian Henry (botânico) 1775-1836

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

$C \equiv$ concentração
$s =$ solubilidade
$P =$ pressão do gás

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

$[C] \equiv$ Torr ou atm

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

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 ≡ throughput por unidade de área $\frac{Torr\,l}{cm^2\,s}$ [q]

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

A constante de difusão diminui exponencialmente com a temperatura

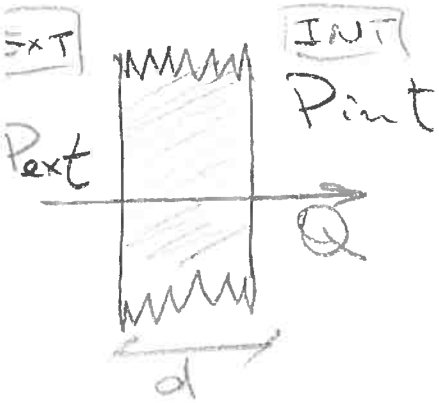
$$\boxed{D = D_0\, e^{-E/RT}}$$

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

R é a constante universal dos gases

D_0 é uma constante de proporcionalidade

Vamos considerar 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:

$$C_1 = s P_1^n \quad e \quad C_2 = s P_2^n$$

$\boxed{\text{Lei de Henry}}$

Como $Q = -D \dfrac{dc}{dx}$, então — 1ª lei de Fick

$$Q \int_0^d dx = -D \int_{C_1}^{C_2} dc \Longrightarrow Q d = -D(C_2 - C_1)$$

$$Q = \frac{D}{d}(C_1 - C_2) \xrightarrow[\text{a lei de Henry}]{\text{substituindo}} \boxed{Q = \frac{Ds(P_1^n - P_2^n)}{d}}$$

Ds é a constante de permeação K

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

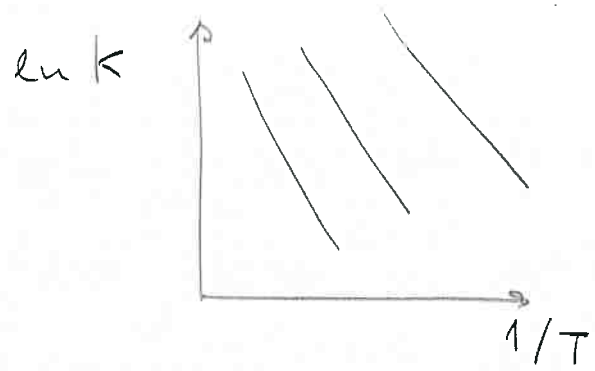
K é expresso como a quantidade de gás, em cm^3 nas CNTP, que difunde através de uma área em uma parede de espessura 1 cm para uma diferença de 1 atm.

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

$$\ln K = \ln K_o - \frac{E}{RT}$$ $\boxed{\text{reta} \rightarrow y = a - bx}$

MOSTRAR SLIDE

gráfico de $\ln K$ em função de $1/T$



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

$cm^3 \longrightarrow \ell$
$atm \longrightarrow Torr$

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

Exemplo 1 N_2 em Neoprene

$n = 1$ gás em não metal

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

dados $T = 330\,K$ $P_{ext} = 700$ To[rr]

$d \sim 0{,}3\,cm$ $P_{ex_{N_2}} = 80\%$ P[ext]

Pelo gráfico da curva 18 pag 27 do G. Lewin

temos: $\frac{10^3}{T} \sim \frac{1000}{330}$ $k = 10^{-7}\,\frac{cm^2}{s}$; $n = 1$

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

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

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

$$Q = 1{,}9 \times 10^{-4}\ \frac{Torr}{s}\ \frac{10^{-3}\,l}{cm^2} \Longrightarrow Q' = q = \boxed{1{,}9 \times 10^{-7}\ \frac{Torr\ l}{s\ cm^2}}$$

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

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

$$Q = qA = 1{,}9 \times 10^{-7} \times 785 \Longrightarrow \boxed{Q = 1{,}5 \times 10^{-4}\ \frac{Torr\ l}{s}}$$

Supondo o Tubo estar conectado a uma bomba com $S \sim 100$

vem:

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

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

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

$$C = \frac{1,5\times10^{-4}}{560}$$

$C \cong 15D^2$ para o regime viscoso

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

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

1,3 μm

O vazamento de um orifício dessas dimensões é equivalente ao se usar um tubo de neoprene de D = 1" e L = 100 cm.

EXEMPLO 2: N_2 em câmara de Fe

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

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

80 N_2 $\qquad$ 1 atm — 760 Torr
$\qquad$ x — 560 Torr $\qquad \boxed{P_{ext} = 0{,}74\,atm}$

$$q = Q' = \frac{10^{-12}(0{,}74)^{1/2}}{0{,}2} \Longrightarrow Q' = 4{,}3\times10^{-12}\,\frac{cm^3\,atm}{s\ \ cm^2}$$

Mudança de variáveis

$$q = Q' = 4{,}3\times10^{-12}\,\frac{cm^3\,atm}{s\ cm^2} = 4{,}3\times10^{-12}\,\frac{(10^{-3}\ell)\,760\,Torr}{s\,cm^2}$$

$$\boxed{q = Q' = 3{,}3\times10^{-12}\,\frac{Torr\,\ell}{s\ cm^2}}$$

Supondo uma câmara esférica de D = 20 cm

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

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

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

Se a bomba for de $S_b = 100 \; l/s$, então:

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

Evitar Ferro fundido

Conclusão: Em alto vácuo, usar sempre metais

(b) Diâmetro do furo equivalente:

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

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

ou

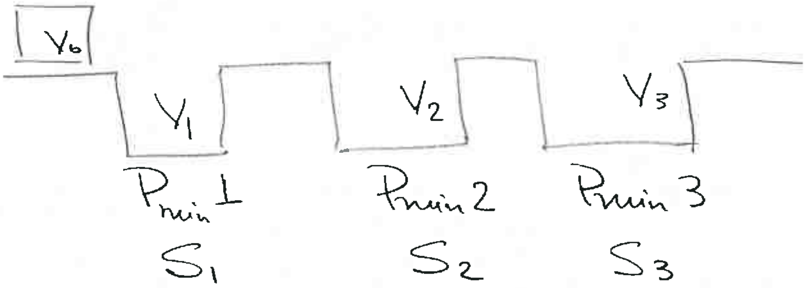
$$9 D^2$$

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

$$D \sim 10 \text{ Å}$$

Depósito de Vácuo

Produção industrial



Esse sistema é usado para atingir pressões baixas em pouco tempo.

Suposição $\quad \dfrac{6 \text{ recipientes}}{\text{min}} \longrightarrow 1 \text{ recipiente}/10\,s$

$V = V_0 + V_1$

Qual o valor equivalente de S_1, S_2, S_3?

Desprezando o tempo de passagem entre as bombas e possíveis vazamentos

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

$$V = V_1 + V_0$$

Ao atingir a posição de V_1, a pressão final será reduzi

Lei de Boyle

$$S_1 = \left(\frac{V_0 + V_1}{10}\right) \ln \frac{P^*}{P_{min}1} \; ; \; (V_0 + V_1) P^* = P_0 V_0 + P_{min}1 \, V_1$$

$$S_2 = \left(\frac{V_0 + V_2}{10}\right) \ln \frac{P^{**}}{P_{min}2} \; ; \; (V_0 + V_2) P^{**} = P^* V_0 + P_{min}2 \, V_2$$

$$S_3 = \left(\frac{V_0 + V_3}{10}\right) \ln \frac{P^{***}}{P_{min3}} \; ; \; (V_0 + V_3) P^{***} = P^{**} V_0 + P_{min3} V_3$$

Exemplo prático $\quad V_0 = 1\,l \quad V = 100\,l \quad P_{min} = 10^{-3}$ Torr

$$P^* = \frac{P_0 V_0 + P_{min1} V_1}{V_0 + V_1} \Rightarrow P^* = \frac{700 \times 1 + 10^{-3} \times 100}{101} = 7 \text{ Torr}$$

$$S_1 = \frac{(V_0 + V_1)}{10} \ln \frac{P^*}{P_{min1}} = \left(\frac{101}{10}\right) \ln \frac{7}{10^{-3}} = 89\, l/s$$

$$P^{**} = \frac{7 \times 1 + 10^{-3}\, 100}{101} = 0{,}07 \text{ Torr} \; ; \; S_2 = \frac{101}{10} \ln \frac{0{,}07}{10^{-3}} = 42\, l/s$$

$$P^{***} = \frac{0{,}07 \times 1 + 10^{-3}\, 100}{101} = 2 \times 10^{-3} \text{ Torr} \; ; \; S_3 = \frac{101}{10} \ln \frac{2 \times 10^{-3}}{10^{-3}} = 7\, l/s$$

Comparação

$$\begin{cases} V_0 = 1\,l \\ t = 10\text{ s} \end{cases} \quad S = 1\, l/s$$

$$\boxed{P = P_0\, e^{-\frac{S}{V} t} + P_{res}} \qquad P = 700\, e^{-\frac{1}{1} 10} + P_{res}$$

$$\boxed{P = 3 \times 10^{-2} \text{ Torr} + P_{res}}$$

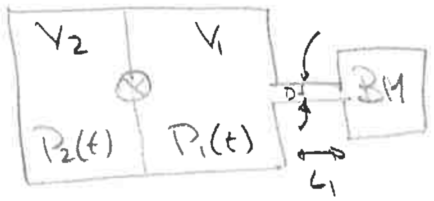
$$P = P_0\, e^{-\frac{S}{V} t}$$

$$t = \frac{V}{S} \ln \frac{P_0}{P}$$

$$t = \frac{1}{1} \ln \frac{700}{10^{-3}} \Longrightarrow t = 13{,}5 \text{ s}$$

Exercício: P(t)

Considere um sistema de vácuo conforme a figura 1



dados:
$L_1 = 60\,cm$
$D_1 = 5\,cm$
$S_b = 150\,\ell/min$

$\begin{cases} V_1 = 10\,\ell \\ V_2 = 10\,\ell \end{cases}$

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

O volume V_1 é bombeado desde a pressão atmosférica pela bomba de $150\,\ell/min$. A válvula entre V_1 e V_2, mesmo fechada, se comporta como se houvesse um canal de passagem com $D = 1\,mm$ 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 de $P_1(t)$ 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) $$\frac{1}{C_1} = \frac{1}{C_o} + \frac{1}{C_{t_1}}$$

$$\begin{cases} C_{o_1} = 9D^2 = 9 \times 5^2 = 225\,\ell/s \\ C_{t_1} = \dfrac{12D^3}{L} = \dfrac{12 \times 5^3}{60} = 25\,\ell/s \end{cases}$$

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

$$\frac{1}{C_2} = \frac{1}{C_{o2}} + \frac{1}{C_{t2}}$$

$$\begin{cases} C_{o_2} = 9D^2 = 9 \times (0{,}1)^2 = 0{,}09\,\ell/s \\ C_{t_2} = \dfrac{12D^3}{L} = \dfrac{12(0{,}1)^3}{4} = 0{,}003\,\ell/s \end{cases}$$

$$\frac{1}{C_2} = \frac{1}{0.09} + \frac{1}{0{,}003} \Rightarrow \boxed{C_2 = 0{,}003\,\ell/s}$$

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 !!

$$\boxed{P_2(t) = P_0\, e^{-\frac{S_{ef2}}{V_2}t} + P_{res} = 700\, e^{-\frac{0{,}0029t}{10}} + P_{res}}$$

$$P_1(t) = P_0\, e^{-\frac{S_{ef1}t}{V_1}} + P_{\text{VAZAMENTO VIRTUAL}}$$

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

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

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

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

$$\ln \frac{10^{-4}}{0{,}9} = -0{,}00029t \quad \therefore \quad t = 31396\ s$$

$$\boxed{t = 8{,}7 \text{ horas}}$$

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

$$\ln \frac{10^{-4}}{700} = -0{,}00029 \quad \therefore \quad \boxed{t = 54350\ s}$$

$$\boxed{t = 15 \text{ horas}}$$

MOSTRAR SLIDES