AULA 5 Ciência e Tecnologia do Vácuo (1)

-2024- 23/08/24

passar a lista

Resumo da aula anterior

Teoria Cinética dos Gases

- Número de Avogadro $\boxed{N_A = 6,02 \times 10^{23}}$

Todos os gases contêm o mesmo número de moléculas ou átomos quando ocupam um mesmo volume nas mesmas condições de temperatura e pressão (CNTP)

- Número de moles $n = N/N_A$
- Equação de gases ideais

$$PV = nRT \Rightarrow PV = \frac{N}{N_A} RT \Longrightarrow \boxed{PV = NkT}$$

$k = \frac{R_0}{N_A}$ é a cte de Boltzman

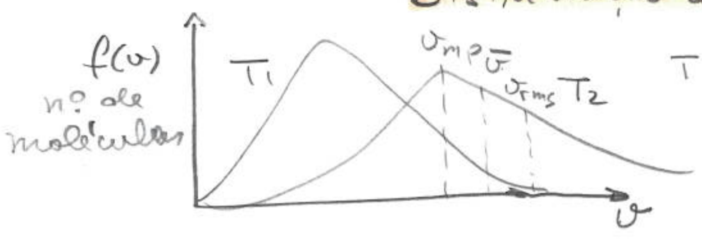
- Livre caminho médio

$$\lambda = \frac{V}{4\pi\sqrt{2}\, r^2 N} \longrightarrow \lambda = \frac{kT}{P\, 4\pi\sqrt{2}\, r}$$

N_2 $T = 300K$

$$\boxed{\lambda = \frac{5\times 10^{-3}}{P(Torr)} (cm)}$$

Distribuição de Boltzman



$T_2 > T_1$

$$v_{mp} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$$

$$v_{rms} = \overline{v^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

Fluxo de moléculas

$$\nu = \frac{1}{4} n \bar{v} \qquad \nu = \frac{\text{nº de moléculas incidentes}}{\text{área tempo}}$$

$$\boxed{\nu = 3,5 \times 10^{22}\ P(Torr)\ (MT)^{-1/2}\ cm^{-2}s^{-1}}$$

Exercícios (lista 1)

(11) Quanto tempo leva para formar uma monocamada em função da pressão?

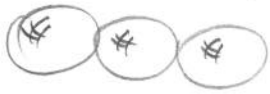
⇒ Quantas moléculas de N_2 cabem em $1\,cm^2$?

$$\delta_{N_2} = 3{,}7\times10^{-8}\,cm \quad \text{diâmetro da molécula de } N_2$$

Área de uma molécula

$$A = \pi R^2 = \frac{\pi\delta^2}{4}$$

Modelo simples



Regra de 3

$$1 \;-\; \pi\delta_{N_2}^2 \;\; \text{área } cm^2$$

$$N \;-\; 1\,cm^2$$

$$N = \frac{\text{número de partículas}}{\text{área}} = \frac{1}{A} = \frac{4}{\pi\delta^2} = 9{,}0\times10^{14} \sim 10^{15}\ \frac{\text{partículas}}{cm^2}$$

- Pela teoria cinética dos gases o fluxo é dado por:

$$\nu = \frac{1}{4} n\bar{v} = \frac{n^{\circ}\text{ de moléculas}}{\text{área tempo}}$$

sabendo que $\boxed{PV = NkT}$ e $\boxed{n = \frac{N}{V} = \frac{P}{kT}}$ e $\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$

$$\nu = 3{,}5\times10^{22}\, P(Torr)\,(MT)^{-1/2}$$

Para N_2 a $T = 300\,K$ e $M = 28$ uma, vem

$$\nu = 3{,}8\times10^{20}\, P(Torr)\ \frac{\text{moléculas}}{cm^2\,s}$$

em $1\,s \;-\; 3{,}8\times10^{20}\,P(Torr)$

$\tau \;-\; 10^{15}$ moléculas

então

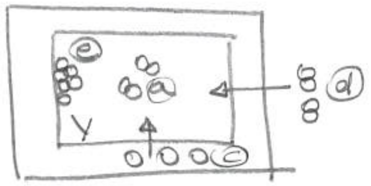
$$\boxed{\tau = \frac{2{,}6\times10^{-6}}{P(Torr)}}$$

τ é o tempo de formação de uma monocamada.

TABELA $\tau \times P$

P (Torr)	τ (s)
1atm	10^{-10}
10^{-3}	10^{-3}
10^{-6}	3
10^{-8}	5 min
10^{-10}	7,5 horas
10^{-14}	9 anos

Lista 1, Ex 10



Fontes de gases

ⓐ gás do volume

ⓑ molécula na superfície

ⓒ moléculas absorvidas no metal (difusão)

ⓓ moléculas do exterior (permeação)

ⓔ Desorpção térmica (superfície

SLIDE 1

Lista 1, Ex 12

Qual a pressão em que $N_{VOL} = N_{superfície}$?

Se a pressão for alta as moléculas se aprisionam na superfície

As moléculas ficam aprisionadas (COESAS) devido a forças físicas e químicas

- Moléculas fracamente ligadas à superfície
- Moléculas pouco ligadas
- Moléculas fortemente ligadas à superfície

Em P = 1 atm (760 Torr) as moléculas ficam fixas inclusive pelas moléculas que blindam essas moléculas na parede

Para responder quando $N_V = N_S$ vamos iniciar pela lei dos gases ideais.

$$\boxed{PV = NkT}$$

$$N_V = \frac{PV}{kT} \qquad \begin{cases} V_{esfera} = \frac{4}{3}\pi R^3 \\ A_{esfera} = 4\pi R^2 \end{cases}$$

$$\boxed{N_V = \frac{P}{kT}\frac{4}{3}\pi R^3}$$

$$N_S = \frac{4\pi R^2}{\text{área ocupada por uma molécula}}$$

$$N_S = \frac{4\pi R^2}{\frac{\pi \delta^2}{4}} = \boxed{\frac{16 R^2}{\delta^2}}$$

Queremos $N_V = N_S$, então:

$$\frac{16 R^2}{\delta^2} = \frac{P}{kT}\frac{4}{3}\pi R^3 \Longrightarrow \boxed{P = \frac{12 kT}{\pi R \delta^2}}$$

Para N_2 $\delta_{N_2} = 3{,}7 \times 10^{-8}$ cm $k = 10^{-22} \frac{\text{Torr}\,\ell}{K} = 10^{-19} \frac{\text{Torr}\,cm^3}{K}$

Para $T = 300K \Longrightarrow \boxed{P = \frac{0{,}167\,(\text{Torr})}{D\,(\text{cm})}}$ $D = 2R$

Considerando uma câmara de vácuo de $D \cong 20$cm

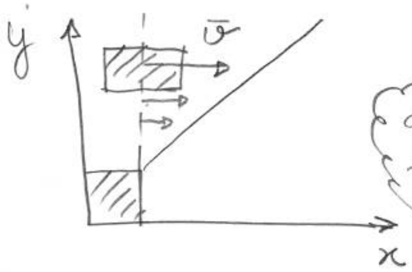
$$\boxed{P = 8{,}5 \times 10^{-3}\,\text{Torr}}$$

A molécula proveniente da superfície da câmara de vácuo torna-se importante a partir de 10^{-2} Torr.

Atenção: Num sistema de vácuo o gás do volume não é muito importante, pois esse gás é retirado da câmara rapidamente.

Verificar esse fato na bancada 2
Medidor diafragma

VISCOSIDADE



duas placas com fluidos entre elas

Placa se movendo em relação à outra

$\boxed{\text{gradiente de velocidade}}$

$$\frac{d\vec{v}}{dy}$$

A camada inferior se desloca com velocidade menor e assim sucessivamente.

Experimentalmente é verificado que para manter o deslocamento é necessário aplicar uma força na <u>direção</u> e sentido do deslocamento, proporcional à <u>área</u> (A) da placa e ao gradiente de velocidade

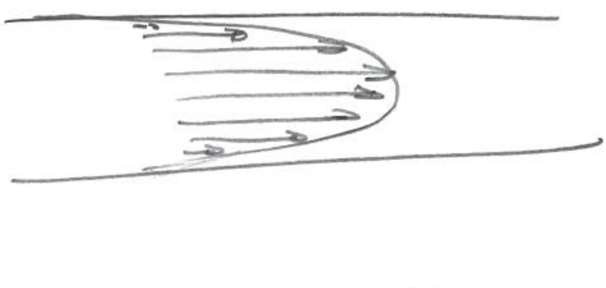
$$\boxed{F = \eta A \frac{d\vec{v}}{dy}}$$

η é o coeficiente de viscosidade do fluido

Isso equivale dizer que o gás exerce, sobre a placa, uma força de reação chamada FORÇA VISCOSA, de mesmo módulo e direção, mas com sentido oposto ao movimento

A velocidade do gás afeta o fluxo de escoamento quando o sistema está no regime <u>viscoso</u>

Perfil de velocidades



Velocidade máxima na parte central do tubo
velocidade nula para as moléculas da parede.

Exemplo: Folhas nas margens de um rio.

Podemos imaginar o gás deslizando em camadas longitudinais.

Cada camada exerce uma força tangencial sobre a outra camada adjacente, freiando a camada de maior velocidade e tendendo a aumentar o movimento das camadas mais lentas.

No sistema <u>CGS</u> a unidade de viscosidade (η) é chamada <u>POISE</u>

$$[P] = \left[\frac{\text{dina s}}{\text{cm}^2}\right]$$

Relação entre η e λ

$$\boxed{\eta = \frac{1}{3}\lambda n m \bar{v}}$$

Regimes de Escoamento

A. Roth cap 3.

Ao diminuir a pressão desde a pressão atmosférica até pressões mais baixas, o sistema passa por vários regimes de escoamento

- Viscoso → { fluxo turbulento / fluxo laminar }
- Intermediário
- MOLECULAR

VISCOSO
- Movimento coletivo do gás
- $\lambda << D$
- colisões elásticas entre as moléculas
- O escoamento é regido pela viscosidade do gás

MOLECULAR -
- λ grande ($\lambda >> D$)
- Movimento independente das moléculas

Regime Viscoso

Velocidades altas (turbulento)
Velocidades baixas (laminar)

No fluxo laminar as velocidades aumentam da borda para o centro.

O limite entre o fluxo turbulento e o laminar é dado pelo número de Reynolds, enquanto que os limites entre os regimes viscoso (laminar), intermediário e molecular são dados pelo número de Knudsen.

Osborne Reynolds (1842-1912)

Número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta} \qquad \begin{cases} \rho \text{ é a densidade do gás} \\ v \text{ é a velocidade das moléculas} \\ \eta \text{ é a viscosidade do gás} \\ D \text{ é o diâmetro do tubo} \end{cases}$$

$Re > 2100$ fluxo turbulento

$Re < 1100$ fluxo laminar

Análise dimensional

$$Q = PS = P\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{P \Delta L A}{\Delta t} = \frac{P v D^2}{4}$$

então $\boxed{Q = \frac{P v \pi D^2}{4}}$ ou $\boxed{v = \frac{4Q}{P \pi D^2}}$ (1)

$$\rho = \frac{\overset{\text{massa do gás}}{W}}{V} = \frac{Nm}{V} = nm \quad \text{mas } n = \frac{\text{nº de moléculas}}{V}$$

Pela lei dos gases $n = \frac{P N_A}{RT}$, então:

$$\rho = \frac{P N_A}{RT} m$$ lembrando que $N_A m = M$ {massa molar

logo $\rho = \frac{PM}{RT}$ ou seja $Re = \frac{PM}{RT}\frac{vD}{\eta}$

$$Re = \frac{\cancel{P}M}{RT}\overbrace{\left(\frac{4Q}{\cancel{P}\pi D^2}\right)}^{v}\frac{D}{\eta}$$

$$\therefore \boxed{Re = \frac{4QM}{\pi D R T \eta}}$$

Para o ar seco $T = 20°C \Rightarrow T = 293 K$

$\eta = 1{,}829 \times 10^{-4}$ poise

$R = 62{,}364 \ \frac{Torr\,l}{K}$

$M = 28{,}98$

$$\boxed{Q_{air} = 9{,}06 \times 10^{-2}\, Re\, D}$$

fluxo turbulento $Q > 200\, D$ (cm)
fluxo laminar $Q < 100\, D$ (cm)

Número de Knudsen

Martin Knudsen (1871-1949) Dinamarquês.

$$\boxed{N_K = \frac{\lambda}{D}}$$

$\frac{D}{\lambda} > 100$ Regime Viscoso

$1 < \frac{D}{\lambda} < 100$ intermediário

$\frac{D}{\lambda} < 1$ Regime molecular

Como $\lambda = \dfrac{5 \times 10^{-3}}{P\ (\text{Torr})}$ [cm]

<u>então</u>

$$\begin{cases} DP \geq 1 & \text{Regime viscoso} \\ 10^{-2} < DP < 1 & \text{Intermediário} \\ DP \leq 10^{-2} & \text{Molecular} \end{cases}$$

$$\bar{P} = \frac{P_1 + P_2}{2}$$

Essas definições são feitas apenas para se ter uma ordem de grandeza. Mas, o regime determina as aproximações que devem ser feitas para o cálculo das condutâncias, uma vez que descrevem situações físicas muito diferentes.

Fluxo turbulento Situações com dimensões pequenas (diâmetro)
As linhas de campo não são retas e nem regulares - formam-se redemoinhos
Esse tipo de fluxo aparece nos primeiros instantes do bombeamento. Em geral, não nos preocupamos com esse regime - a não ser com filmes finos na câmara.

Fluxo laminar

Perfil da velocidade das moléculas

Lei de Poiseuille

As linhas de campo, neste caso, tornam-se retas, tendendo a serem constantes no tempo.

VIDE Van Atta pag 26-30

Movimento coletivo das moléculas

A figura das linhas de fluxo é razoavelmente regular. A velocidade das moléculas aumenta desde a proximidade da superfície do tubo até o centro, onde é máxima.

O fluxo apresenta características de camadas (laminar) e viscosidade entre as camadas.

O livre caminho médio (λ) é pequeno comparado com as dimensões do sistema

As moléculas chocam-se entre si.

A impedância depende do tamanho e das formas das irregularidades do tubo, da velocidade e da PRESSÃO do gás.

Regime Intermediário (TRANSIÇÃO)

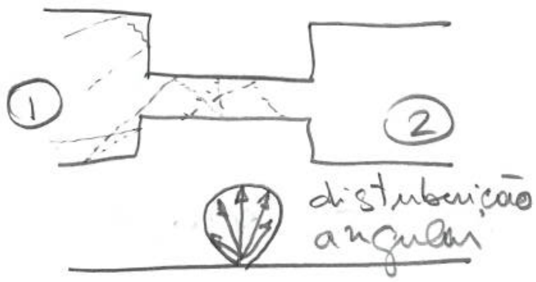
A pressão diminui e o λ aumenta ($\lambda \sim D$)

O fluxo deixa de ser totalmente viscoso

O número de choques com as paredes do sistema é da mesma ordem de grandeza do número de choques com as outras moléculas.

Regime Molecular

Neste regime as moléculas chocam-se principalmente com as paredes do tubo. As moléculas movem-se independentemente uma das outras.



Em pressões baixas, os resultados experimentais indicam que as moléculas condensam na superfície, entram em repouso e são re-evaporadas numa direção independente do ângulo de incidência

A transmissão não é 100%

A colisão com a parede não tem o mesmo ângulo de reflexão e o ângulo de incidência

A distribuição angular das partículas é máxima em 90° e é <u>simétrica</u>!!

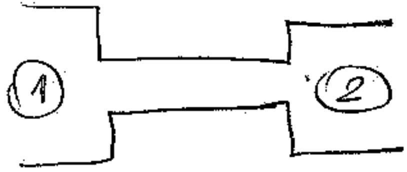
A quantidade máxima que atravessa o tubo é igual ao número de moléculas incidentes.

$$\boxed{N_0 \cdot P_{1-2}}$$

P_{1-2} é a probabilidade de transmissão $1 \rightarrow 2$

- P_{1-2} depende da geometria do sistema
- Independe da pressão
- Depende do gás
- Depende da temperatura
- Nesse regime as <u>condutâncias</u> são pequenas!
- Neste regime a eficiência das bombas de vácuo é muito pequena

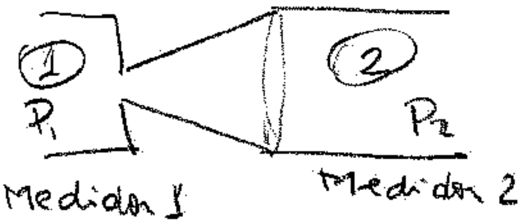
CASO A



Simétrico

A probabilidade de transmissão é a mesma das moléculas passarem de $1 \to 2$ e $2 \to 1$

CASO B



Assimétrico

As impedâncias são as mesmas $1 \to 2$ e $2 \to 1$

Os dois caminhos oferecem a mesma impedância.

$$\therefore \boxed{N_1 P_1 \equiv N_2 P_2}$$

Com a bomba de vácuo desligada os dois medidores vão indicar as mesmas pressões

Não existe preferência

Com essas definições, vamos calcular nas próximas aulas:

Condutância
- orifício
- orifício anular
- TUBOS
  - duto circular
  - duto quadrado
  - duto anular

Densidade Molecular

$$\boxed{N_A = 6{,}02 \times 10^{23}}$$

Todos os gases têm o mesmo nº de moléculas quando estão num mesmo volume sob as mesmas condições de pressão e temperatura (CNTP)

$$PV = NkT = N\frac{R_o}{N_A}T = \frac{Nm}{mN_A}R_oT = \frac{W}{M}R_oT$$

W — massa do gás

M — massa molar

$\frac{W}{M}$ é o número de moles $\quad \frac{W}{M}\frac{N_A}{V} = n \equiv$ nº de moléculas por unidade de volume

$$n = N_A\frac{W}{M}\frac{1}{V} = N_A\frac{W}{M}\frac{P}{\frac{W}{M}RT} = \frac{N_A P}{RT}$$

$$\boxed{n = \frac{N}{V} = \frac{Nm}{mN_A}\frac{N_A}{V}}$$

$$\boxed{n = \frac{W}{M}\frac{N_A}{V}}$$

então $\quad n = \frac{6{,}02\times10^{23}}{6{,}236\times10^{4}}\left(\frac{P}{T}\right) \Rightarrow \boxed{n = 9{,}656\times10^{18}\frac{P}{T}}$

Para $P = 760$ Torr e $T = 273$ K

$$\boxed{n = 2{,}687\times10^{19} \text{ moléculas}/cm^3}$$

ou

$PV = NkT \; ; \quad \boxed{n = \frac{N}{V} = \frac{P}{kT}}$

$$\boxed{n = 9{,}6\times10^{18}\frac{P}{T}}$$

$P = 760$ Torr $\qquad T = 273$ K

$$\boxed{n = 2{,}687\times10^{19}\frac{\text{moléculas}}{cm^3}}$$

definição de vácuo $\equiv n < 2{,}687\times10^{19}\frac{\text{moléculas}}{cm^3}$

EXEMPLOS

1 Considere um sistema de vácuo sendo bombeado por uma bomba mecânica $S = 60\ \ell/_{min} = 1\ \ell/s$ em uma tubulação de $2'' \sim 5$ cm de diâmetro (D)

Seja inicialmente $P \sim 500$ Torr

$$Q = PS = 500 \times 1 = 500\ \text{Torr}\,\ell/s$$

limites
- fluxo turbulento $200D \rightarrow 200 \times 5 = 1000\ \frac{\text{Torr}\,\ell}{s}$
- fluxo laminar $100D \rightarrow 100 \times 5 = 500\ \frac{\text{Torr}\,\ell}{s}$

Estamos num caso limite!

2 (a) Considere uma bomba difusora de $10'' \sim 25$ cm

$S_{BD} \sim 50\% \times$ Condutância de um orifício $S_{BD} = \frac{1}{2} 9D^2 = 4{,}5\,D^2$

$\boxed{S_{BD} \sim 4{,}5 D^2}$ D [cm] $[S_{BD}] = [\ell/s]$

Se $P \sim 10^{-3}$ Torr $Q = PS = 2812 \times 10^{-3} \sim 2{,}8\ \frac{\text{Torr}\,\ell}{s}$

Condição de fluxo turbulento $\boxed{Q > 200\,D}$

$2{,}8 > 200\,D$ então $D < \frac{2{,}8}{200}$ $\boxed{D < 0{,}01\ \text{cm}}$

muito pequeno

(b) Considere agora uma bomba rotativa

$P \sim 600$ Torr
$S_b \sim 50\ \ell/s$

$$Q = PS = 600 \times 50 = 3000\ \frac{\text{Torr}\,\ell}{s}$$

Condição $Q > 200\,D$

$3000 > 200\,D$

$$D < \frac{3000}{200} \Rightarrow \boxed{D = 15\ \text{cm}}$$

Exercícios nº de Knudsen

(a) Qual o regime de uma câmara de vácuo de 20 cm de diâmetro em uma pressão $P = 10^{-2}$ Torr?

$D \times P = 20 \times 10^{-2} = 0{,}2$ Torr cm

Recordando

$[DP] = [\text{cm Torr}]$

$$\begin{cases} DP \geq 1 & \text{Viscoso} \\ DP \leq 10^{-2} & \text{molecular} \\ 10^{-2} < DP < 1 & \text{intermediário} \end{cases}$$

Resposta: Regime intermediário

(b) Qual o regime de uma câmara de vácuo de $D = 20$ cm com pressão de $P = 10^{-4}$ Torr?

$DP = 20 \times 10^{-4} = 2 \times 10^{-3}$ Torr . cm

Resposta = Regime molecular