

AULA 5

Ciência e Tecnologia do Vácuo

12/03/2

Lista de presença

Resumo da aula anterior

Teoria cinética dos gases

- Número de Avogadro

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

Movimento Brownian

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

- Número de moles $n = N/N_A$
- Dedução de equação dos gases ideais

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

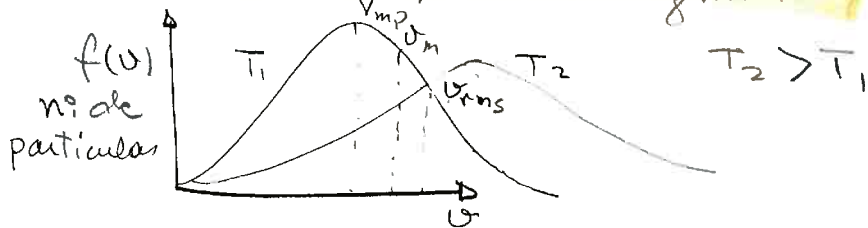
$k = \frac{R}{N_A}$
cte de Boltzmann

- livre caminho médio

$$\lambda = \frac{V}{4\pi\sqrt{2}r^2N} ; \lambda = \frac{kT}{P4\pi\sqrt{2}r^2}$$

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

- Distribuição de Boltzmann



- Fluxo de moléculas

$$\nu = \frac{1}{4} n \bar{v}$$

$$\nu = \frac{\text{nº de moléculas}}{\text{área} \cdot \text{tempo}}$$

$$\nu = 3,8 \times 10^{22} P \text{ (Torr)}^{-1/2} (19T)^{-2} \text{ cm s}^{-1}$$

Resolução dos problemas da lista 1

lista 1 ex 11

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

a) Quantas moléculas de N_2 cabem em 1 cm^2 ?

$\delta_{N_2} \approx 3,7 \times 10^{-8} \text{ cm}$ diâmetro da molécula de N_2

Área da molécula

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

Regra de 3

$$1 \text{ — } \frac{\pi \delta^2}{4}$$

$$N \text{ — } 1 \text{ cm}^2$$

Modelo Simples



$$N' = \frac{\text{nº de partículas}}{\text{área}} = \frac{1}{A} = \frac{4}{\pi \delta^2} = 9,0 \times 10^{14} \sim 10^{15} \frac{\text{partículas}}{\text{cm}^2}$$

b) Pela teoria cinética dos gases o fluxo é dado por:

$$\gamma = \frac{1}{4} n \bar{v} \equiv \frac{\text{nº de moléculas}}{\text{área tempo}}$$

substituindo $PV = NkT$ e $n = \frac{N}{NA}$ $\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$

$$\gamma = 3,5 \times 10^{22} P(\text{Torr}) (MT)^{-1/2}$$

Para N_2 a $T = 300 \text{ K}$ e $M = 28$, temos

$$\gamma = 3,8 \times 10^{20} P(\text{Torr}) \frac{\text{moléculas}}{\text{cm}^2 \text{ s}}$$

em 1 s — $3,8 \times 10^{20} P(\text{Torr})$

ϕ — 10^{15} moléculas.

$$\phi = \frac{2,6 \times 10^{-6}}{P(\text{Torr})}$$

ϕ é o tempo de formação de uma monocamada

Tabela

(2)

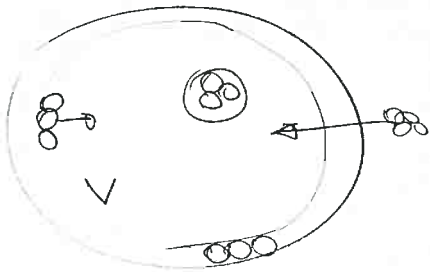
P (Torr)	τ (s)
1	10^{-10}
10^{-3}	10^{-3}
10^{-6}	3s
10^{-8}	300s
10^{-10}	7,5 horas
10^{-14}	9 anos

Slide 1

Questão 10

Fontes de Gases

3 Slides



Gras do volume
 descrição técnica (superfície)
 moléculas absorvidas (difusão)
 moléculas do exterior (permeação)

Questão 12

Qual a pressão em que $N_{VOL} \equiv N_{SUP}$

Se a pressão for alta as moléculas se aqumionam na superfície.

As moléculas ficam aqumionadas (presas) devido a forças físicas e forças químicas.

- moléculas facilmente ligadas à superfície
- moléculas pouco ligadas
- moléculas fortemente ligadas à superfície

Em $P = 1 \text{ atm}$ as moléculas ficam fixas inclusive pelas moléculas que "blindam" essas moléculas na parede

Para estimar quando $N_V \equiv N_S$ vamos começar com a lei dos gases ideais \Rightarrow $PV = NkT$

$$N_V = \frac{PV}{kT} \left\{ \begin{array}{l} V_{\text{sfera}} = \frac{4}{3}\pi R^3 \\ A_{\text{sfera}} = 4\pi R^2 \end{array} \right.$$

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

$R =$ raio da superfície

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

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

δ é o diâmetro da molécula

Queremos estimar $N_S = N_V$

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

Exemplo prático: Para N_2 $\delta_{N_2} = 3,7 \times 10^{-8}$ cm

$$\text{sendo } k = 10^{-22} \frac{\text{Torr l}}{K} = 10^{-19} \frac{\text{Torr cm}^3}{K}$$

$$1 \text{ l} = 1 \text{ dm}^3$$

$$\text{Para } 300K \Rightarrow P = \frac{0,167}{D(\text{cm})} (\text{Torr}) \quad \underline{\underline{D=2R}}$$

Considerando uma câmara de $D \approx 20$ cm

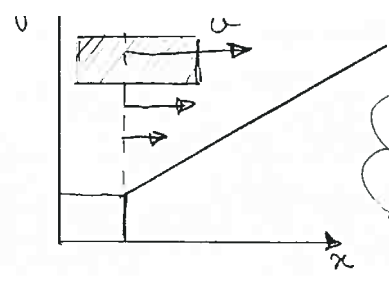
$$P = 8,5 \times 10^{-3} \text{ Torr}$$

As moléculas provenientes da superfície do sistema tornam-se importantes a partir de 10^{-2} Torr

\Rightarrow Num sistema de vácuo o gás do volume NÃO é muito importante, uma vez que esse gás é retirado da câmara rapidamente!

Verificar esse fato na bancada do laboratório

VISCOZIDADE



duas placas
com fluido
entre elas

Placa se movendo em
relação a outra

gradiente de velocidade: $\frac{d\vec{u}}{dy}$

A placa inferior se desloca com velocidade
menor e assim sucessivamente

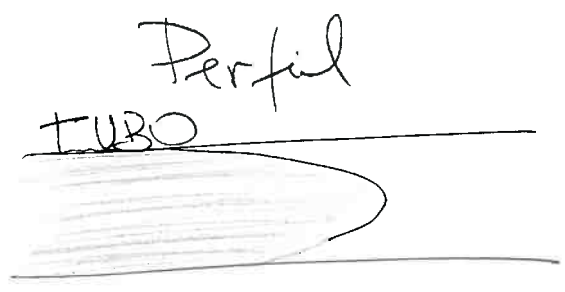
Verifica-se experimentalmente que para manter o
deslocamento é necessário aplicar uma força na
direção e no sentido do deslocamento, proporcional
à área A da placa e ao gradiente de velocidade.

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

η é o coeficiente de
viscosidade do fluido.

Isso equivale a dizer que o gás (fluido) exerce
sobre a placa uma força de reação chamada
força viscosa, do mesmo módulo e direção, mas com
sentido oposto ao movimento.

A viscosidade do gás afeta o fluxo do escoamento
quando o sistema está no regime viscoso.



→ Velocidade máxima
na parte central do
tubo

→ Velocidade nula
para as moléculas
na parede.

Exemplo. folhas nas margens de um rio

Pode-se imaginar o gás deslizando em camadas longitudinais.

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

No sistema CGS a unidade de viscosidade é chamada POISE

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

Relação St:1 entre η e λ

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

Regimes de Escoamento

(4)

A. Roth capítulo 3.

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

Viscoso - fluxo laminar
- fluxo turbulento
INTERMEDIÁRIO
MOLECULAR

Viscoso

movimento coletivo das moléculas
caracterizado por 1 pequeno
colisões elásticas
Escoamento é regido pela viscosidade do gás

MOLECULAR

Caracterizado por 2 grande ($\lambda \gg D$)
movimento independente das moléculas

Regime viscoso - Velocidades baixas - fluxo laminar
Velocidades altas - fluxo turbulento

No fluxo laminar as velocidades das moléculas aumentam da borda para o centro

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

Definições do número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta}$$

ρ é a densidade do gás
 v é a velocidade das moléculas
 D é diâmetro do sistema
 η é a viscosidade do gás

$\left\{ \begin{array}{l} Re > 2100 \text{ fluxo turbulento} \\ Re < 1100 \text{ fluxo laminar} \end{array} \right.$

ANÁLISE DIMENSIONAL

$$Q = Ps = \frac{P \Delta X}{\Delta t} = \frac{P \Delta L A}{\Delta t} = P v \frac{\pi D^2}{4}$$

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

$\rho = \frac{W}{V}$ masse do gás $= \frac{Nm}{V} = nm$

mas $n = \frac{n^\circ \text{ de moléculas}}{V} = \frac{P N_A}{RT}$

Pg 29 Roth

$\rho = \frac{P N_A m}{RT}$ mas $m N_A = M$ (massa molecular)

então $\rho = \frac{MP}{RT}$ logo $Re = \frac{MP v D}{RT \eta} = \frac{MP}{RT} \frac{4Q}{\pi D^2} \frac{D}{\eta}$

então

$$Re = \frac{4QM}{\pi D RT \eta}$$

Para o ar seco $T = 20^\circ\text{C} \Rightarrow T = 293\text{K}$ (5)

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

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

$$M = 28,98$$

então

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

fluxo turbulento

$$Q > 200 D \text{ (cm)}$$

$$Q < 100 D \text{ (cm)}$$

Unidade

$$\frac{\text{Torr litro}}{\text{seg}}$$

Número de Knudsen

$$N_k = \frac{\lambda}{D}$$

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

VISCOSO

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

INTERMEDIÁRIO

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

Molecular

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

então

$DP \geq 1$ Regime viscoso

$DP \leq 10^{-2}$ Regime molecular

$10^{-2} < DP < 1$ intermediário

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

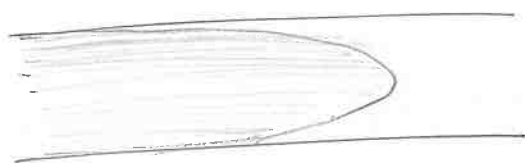
Nome tubulações

As definições são feitas apenas para se ter uma ordem de grandeza. No entanto, o tipo do regime determine 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.

• **Fluxo laminar**



Perfil da velocidade das moléculas.

Lei de Poiseuille

As linhas de campo nesse caso tornam-se retas, tendendo a serem constantes com o tempo. ⑥

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 duto, 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 outras moléculas.

Regime Molecular

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



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

A transmissão por um tubo não é 100%

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

A distribuição angular das partículas é máxima em 90° e é SIMÉTRICA !!

- A máxima quantidade de moléculas que atravessa o tubo é igual ao número de moléculas incidentes vezes a probabilidade de transmissão

$$N_0 \times P_{1-2}$$

P_{1-2} é a probabilidade de transmissão.

P_{1-2} depende da geometria do sistema

Independente da pressão

Depende do gás

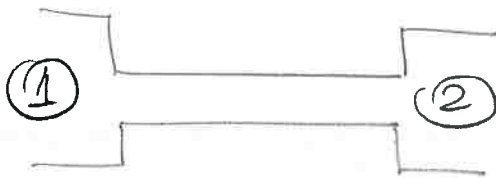
Depende da temperatura

A presente condutância pequena

Neste regime a eficiência da bomba é muito pequena!

CASO

(A)



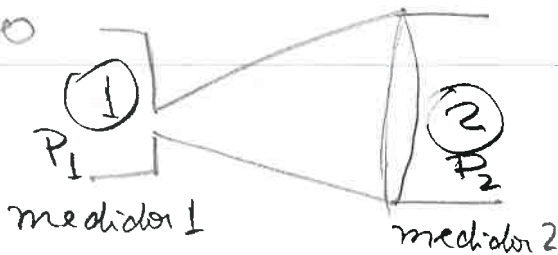
Simétrico

(7)

A probabilidade de transmissão é a mesma, as moléculas passam de 1-2 e 2-1

CASO

(B)



Assimétrico

As impedâncias são as mesmas 1-2 e 2-1
Os dois caminhos oferecem a mesma resistência.

$$\therefore N_1 P_{12} = N_2 P_{21}$$

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

Não existe preferência

————— 1-1 —————

Com essas definições, nas próximas aulas vamos calcular:

CONDUTÂNCIAS :

ORIFÍCIO
ORIFÍCIO circular

TUBOS :

- Duto circular
- Duto quadrado
- duto anular

Densidade Molecular

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

Todos os gases têm o mesmo número de moléculas quando estão num mesmo volume sob as mesmas condições de pressão e temperatura (CNTP)

$$PV = NkT = \frac{NR}{N_A} T = \frac{Nm}{N_A m} RT = \frac{W}{M} \frac{RT}{1} \begin{matrix} \text{massa do gás} \\ \text{massa molecular} \end{matrix}$$

$$PV = \frac{W}{M} RT \quad \frac{W}{M} \text{ é o número de moles} \quad \frac{W}{M} \cdot \frac{N_A}{V} = n \quad \begin{matrix} \text{n.º de moléculas} \\ \text{por} \\ \text{unidade de volume} \end{matrix}$$

$$PV = \frac{W}{M} RT \quad \text{e} \quad \frac{W}{M} \frac{N_A}{V} = n$$

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

$$n = \frac{6,02 \times 10^{23}}{6,236 \times 10^4} \frac{P}{T} \Rightarrow n = 9,656 \times 10^{18} \frac{P}{T}$$

Para $P = 760 \text{ Torr}$ e $T = 273 \text{ K}$

$$n = 2,687 \times 10^{19} \frac{\text{moléculas}}{\text{cm}^3}$$

$$PV = NkT \quad \text{ou} \quad n = \frac{P}{kT} \quad n = 9,6 \times 10^{18} \frac{P}{T}$$

para $P = 760 \text{ Torr}$ e $T = 273 \text{ K}$

$$n = 2,687 \times 10^{19} \frac{\text{moléculas}}{\text{cm}^3}$$

definição de vácuo

$$n < 2,1 \times 10^{19} \frac{\text{moléculas}}{\text{cm}^3}$$

EXEMPLOS

(8)

a) Considere um sistema de vácuo sendo bombeado por uma bomba mecânica $S \approx 60 \text{ l/min} \approx \frac{1 \text{ l}}{\text{s}}$ em uma tubulação de 2" ou 5 cm de diâmetro

$$1 \text{ pol} = 2,54 \text{ cm}$$

Considere inicialmente $P \approx 500 \text{ Torr}$

$$Q = SP = 1 \times 500 = 500 \text{ Torr l/s}$$

limite, fluxos turbulentos $200D \rightarrow 200 \times 5 = 1000 \frac{\text{Torr l}}{\text{s}}$
fluxos laminares $100D \rightarrow 100 \times 5 = 500 \frac{\text{Torr l}}{\text{s}}$

→ Estamos no caso limite!!

b) Considere uma bomba difusora de 10" ou 25 cm

$$S_{BD} \approx 4,5 D^2 \quad D[\text{cm}] \quad [S_{BD}] = [\text{l/s}]$$

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

Condições do fluxo turbulento $Q > 200D$
↳ Sistema

$$2,8 > 200D$$

$$D < \frac{2,8}{200} \Rightarrow D < 0,014 \text{ cm} \quad \text{Muito pequeno!}$$

- Considerando uma bomba mecânica } $P \approx 600 \text{ Torr}$
 $S_b \approx 50 \text{ l/s}$

$$Q = PS = 50 \times 600 = 3000 \text{ Torr l/s}$$

Condição $Q > 200D$

$$3000 > 200D$$

$$D < \frac{3000}{200} = 15 \text{ cm} \quad \text{É possível operar!}$$

Exercício

Número de Knudsen

a) Considere uma câmara de vácuo de 20 cm de diâmetro

$$P = 10^{-2} \text{ Torr}$$

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

Recordando } $DP \geq 1$ viscoso
 } $DP \leq 10^{-2}$ molecular
 } $10^{-2} < DP < 10^0$ intermediário

Resposta: Regime intermediário

b) Considere a mesma câmara ($D=20\text{cm}$) com pressões da ordem de 10^{-4} Torr.

$$D \times P = 20 \times 10^{-4} = 2 \times 10^{-3} \text{ Torr cm}$$

Resposta: Regime molecular

Ciência e Tecnologia do Vácuo

4300323

Março 2020

1ª Lista de Exercícios

Questões teóricas

1. Apresente a relação entre as unidades de pressão atm, Torr, bar, mbar e Pa.
2. Qual a pressão ao nível do mar, na cidade de São Paulo (800 m de altitude), a 10 km, a 100 km, a 1000 km e a 10000 km?
3. Apresente os valores das velocidades \bar{v} , $\overline{v^2}$ e v_{mp} deduzidos a partir da distribuição de Maxwell-Boltzmann.
4. Qual a definição de *throughput* (Q)? Apresente cinco formas distintas de expressar a quantidade Q .
5. Qual a definição de impedância, condutância e velocidade de bombeamento num sistema de vácuo?
6. Apresente a relação entre condutância (C) e *throughput* (Q).
7. Como se pode relacionar a condutância C com a velocidade de bombeamento?
8. Defina a quantidade livre caminho médio (λ).
9. Quais são os regimes de fluxo que passamos ao reduzir a pressão de um sistema de vácuo desde a pressão atmosférica (700 Torr) até 10^{-6} Torr?
10. Quais são as fontes de gás em um sistema de vácuo?
11. Quanto tempo leva para formar uma monocamada na superfície de uma câmara de vácuo? Apresente os valores para pressões de 760 Torr, 1 Torr, 10^{-2} Torr, 10^{-6} Torr e 10^{-10} Torr.
12. A que pressão o número de moléculas do gás do volume é igual ao número de moléculas da superfície?

Questões experimentais

1. O que são medidores diretos e indiretos? Dê exemplos.
2. Qual o princípio de funcionamento dos manômetros McLeod e Vacustat?
3. Qual o princípio de funcionamento dos manômetros de termo-condutividade?
4. Apresente as diferenças entre os manômetros Pirani, Termístor e Termopar?
5. Quais as vantagens e desvantagens de um medidor Pirani e de um Termopar?
6. Qual o efeito de distintos gases na leitura de pressão de manômetros termo-condutores?
7. Os manômetros McLeod e Vacustat dependem do tipo de gás presente no sistema de vácuo? Discuta a diferença de medida na presença dos gases He e Ar?
8. Qual a importância da armadilha de nitrogênio líquido (N_2L) para os manômetros McLeod e Vacustat?
9. Por que a pressão diminui quando se coloca N_2L ?
10. Explique o princípio de funcionamento dos manômetros de ionização Bayard-Alpert (catodo quente) e do Penning (catodo frio)?
11. Por que os medidores Bayard-Alpert e Penning são comumente chamados de medidores de catodo quente e catodo frio, respectivamente?
12. Qual a influência de distintos gases na leitura da pressão desses medidores?
13. Qual a função da degaseificação no Bayard-Alpert?
14. Discuta as principais vantagens e desvantagens dos medidores Bayard-Alpert e do Penning?

