

2020

Distribuir apostilas } Escoamento de gases  
Teoria cinética

Para lista de presença

VÁCUO ≡ Espaço preenchido com gás em pressões abaixo da pressão atmosférica

$$P < 2,5 \times 10^{-9} \text{ moléculas/cm}^3$$

- Comentar sobre camadas.

definições

Pressão =  $\frac{F}{A} \left[ \frac{N}{m^2} \right]$  MKS ;  $\left[ \frac{\text{dina}}{\text{cm}^2} \right]$  CGS

Unidade [Pascal] =  $\frac{N}{m^2}$  ; 1 bar =  $10^6 \frac{\text{dina}}{\text{cm}^2}$

Diferentes valores de pressão correspondem a diferentes situações físicas.

Conceitos úteis

} densidade molecular  
caminho livre médio  
tempo de formação de uma mono camada

Esses conceitos estão relacionados com a pressão, do tipo do gás e a temperatura.

→ Tempo para formar uma mono camada

Esse tempo é dado pela razão entre o número de moléculas necessárias para formar uma camada compacta ( $\sim 8 \times 10^{14}$  moléculas/cm<sup>2</sup>) e a taxa de moléculas incidentes em uma superfície.

Slide 1 { Pressão x tempo de formação de uma nova camada  
 Pressão x densidade  
 Pressão x livre-caminho médio  
 pró-vácuo, — ultra alto vácuo

Slide 2 { pró-vácuo mantém a mesma composição  
 Composição do ar { alto vácuo 70 a 90% Vapor d'água  
 ultra alto vácuo  $H_2$  (permeação)

### Aplicações do vácuo-a-dia

Tomar coca-cola pelo canudinho 300 Torr

Respiração 740 Torr

Dorvo 100 Torr

### Pressão x Altitude

nível do mar	760 mmHg
São Paulo	700 mmHg (700m)
10 km	100 mmHg (avião)
100 km	$10^{-4}$ mmHg
1000 km	$10^{-12}$ mmHg
10000 km	$10^{-14}$ mmHg
390 000 km	luz

# Historico da Tecnologia do Vácuo

(2)

## Slide 3

1643 - Torricelli

Vácuo produzido no topo de uma coluna de Hg



1654 - Otto von Guericke

Magdeburg hemisphere - demonstram a força da pressão atmosférica.

} Vela não queime  
} animais morrem

1879

Edison

(Lâmpada elétrica)

Lei dos gases

Boyle - Mariotte

J. Charles

Gay-Lussac

Bernoulli

Avogadro

Maxwell

Boltzmann

1874

McLeod gauge

1879

Tubo de raios catódicos (Crookes)

1906

Pirani gauge

1915

W. Goede

1916

I. Langmuir

} bomba difusora

1940

Pesquisa em física nuclear

} ciclotron  
} separador isotópico

1950

$10^{-6}$  a  $10^{-7}$  Torr

1950

Bayard - Alpert

ultra alto vácuo (trios)

1953

R Herb - bombas iônicas (fundador da NEC-Pellets)

Ciências

} Espaciais

} Superfícies

} Semicondutores

} nanotecnologia

# Definições Básicas

## Unidades de pressão

$$\text{mmHg} = \text{Torr}$$

$$1 \text{ Ba (barge)} = 1 \text{ dina/cm}^2 \quad \text{CGS}$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg}$$

$$1 \text{ mbar} = 100 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ m bar} = 0,75 \text{ Torr}$$

$$1 \text{ Torr} = 1,33 \text{ mbar}$$

$$1 \text{ Tor} = 133,32 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Pa} = 10^{-2} \text{ mbar} = 10^{-5} \text{ bar}$$

$$1 \text{ atm} = 10^5 \text{ bar}$$

## Regimes de Pressão

• VISCOSO

massa de gás e pequena  $\lambda$

→ fluxos laminares

→ fluxos turbulentos

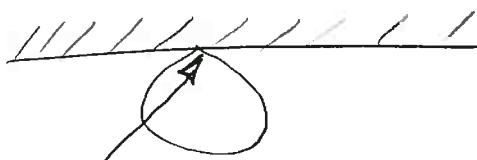
• Transição ou intermediário

• Molecular

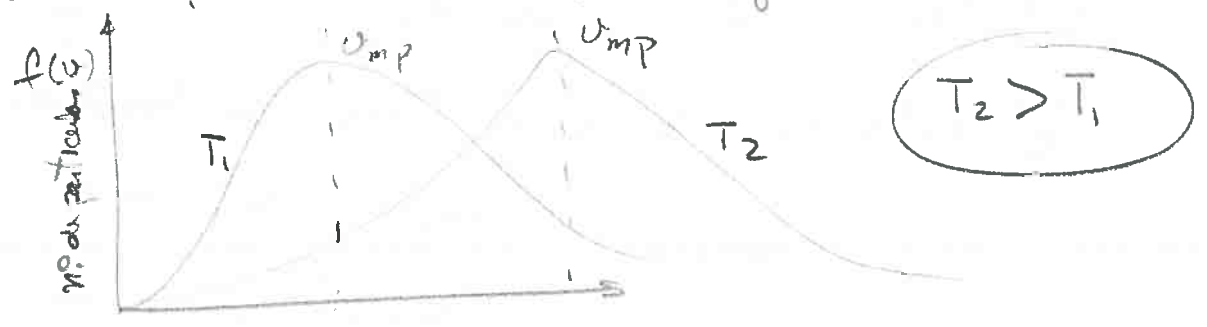
} colisão molécula-pared  
grande  $\lambda$

Colisões: Depende da temperatura (Movimentos Brownianos)

Importante: Após a colisão, o ângulo de saída não depende do ângulo de incidência



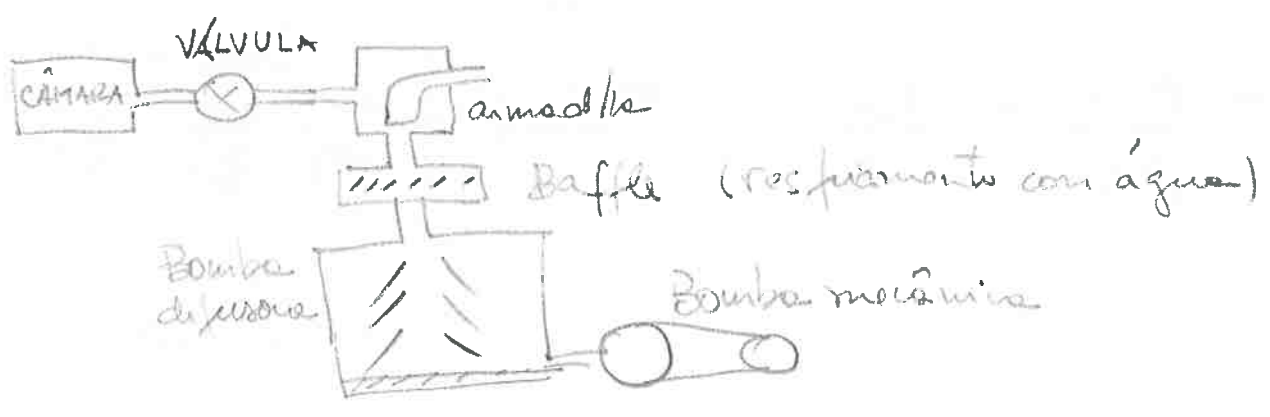
A distribuição de moléculas é regida pela distribuição de Maxwell-Boltzmann



### Teoria cinética dos gases

### Composição básica de um sistema de vácuo

- CÂMARA - VÁLVULAS - TUBOS E CONEXÕES - ARMAÇILHAS
- BAFFLE - Bomba de vácuo (Turbo/difusa) - Bomba de vácuo mecânica, torção membrana.

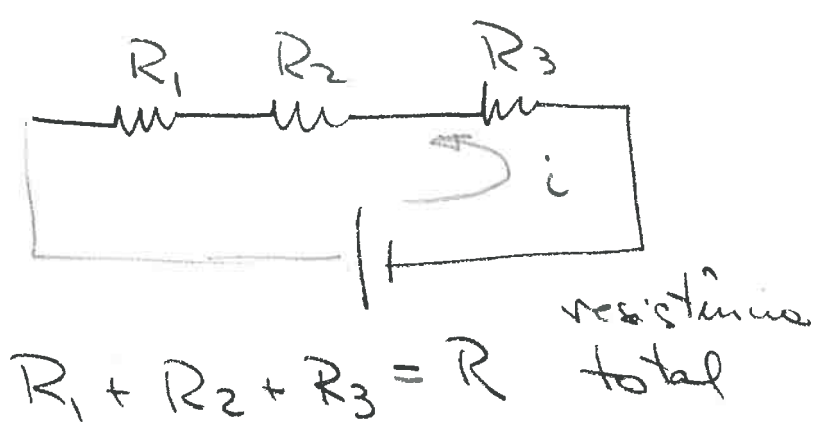


### Probabilidade de Transmissão

- Regime de fluxo
- Geometria do sistema

ANALOGIA A UM CIRCUITO ELÉTRICO

- $\Delta V \approx \Delta P$
- $R \approx$  impedância
- $i \approx$  fluxo de massa (Q) throughput



# Definições Básicas

Condutância  $\equiv$  inverso da impedância

Condutância  $\equiv$  velocidade de bombeamento

depende  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Regime de fluxo} \\ \text{Geometria do sistema} \end{array} \right.$

## TAXA DE ESCOAMENTO

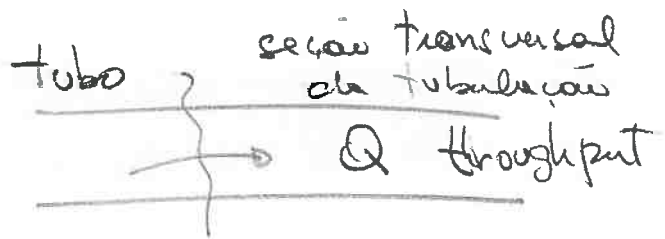
### FLUXO DE MASSA

Quantidade de moléculas em um fluxo

Throughput

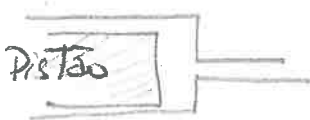
$$Q = \frac{PV}{t} = PS$$

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{Q}{P}$$



$Q = PS$   $S$  é a velocidade de bombeamento

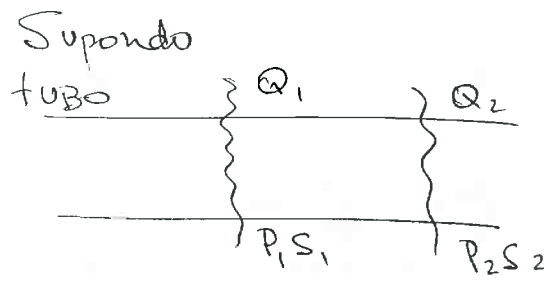
Lei dos gases  $PV = NkT$   $k$  é a cte de Boltzmann



$$P \frac{\Delta V}{\Delta t} = kT \left( \frac{\Delta N}{\Delta t} \right) \text{ corrente molecular}$$

$$\left[ P \frac{\Delta V}{\Delta t} \right] \equiv \text{Torr } \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

$$\text{Unidade } [Q] = \text{Torr } \frac{\text{l}}{\text{s}}$$



Lei de conservação

$$Q_1 = Q_2$$

Condição: Se não houver uma região que aprisione moléculas e se não houver fluxo adicional (vazamento) de moléculas para o sistema.

throughput = fluxo de massa

$$\left. \begin{array}{l} Q_v \text{ de vazamento} \\ Q_d \text{ de difusão} \\ Q_p \text{ de permeação} \end{array} \right\} \Rightarrow Q_T = \sum_{i=1}^N Q_i$$

O throughput também é definido como sendo a quantidade de gás, numa dada temperatura, atravessando uma seção reta (área) por unidade de tempo

UNIDADE  $\left[ \frac{\text{Torr l}}{\text{s}} \right]$   $\left[ \frac{\text{Pa m}^3}{\text{s}} \right]$

$$1 \frac{\text{std cc}}{\text{min}} = 1,27 \times 10^{-2} \frac{\text{Torr l}}{\text{s}}$$

$$= 1,67 \times 10^{-2} \frac{\text{atm cc}}{\text{s}}$$

$$1 \frac{\text{Torr l}}{\text{s}} = 1,3 \frac{\text{atm cc}}{\text{s}}$$

Equação geral de um sistema de vácuo

$$V_0 \frac{\Delta P}{\Delta t} \Rightarrow -V_0 \frac{\Delta P}{\Delta t} = Q - \sum_{i=1}^N Q_i$$

$$-V_0 \frac{\Delta P}{\Delta t} = PS - \sum_i Q_i$$

Lei dos Gases

$$PV = NkT, \text{ então } P \frac{\Delta V}{\Delta t} = kT \frac{\Delta N}{\Delta t} \quad (I)$$

reescrivendo

$$PS = \frac{\Delta N}{\Delta t} kT \Rightarrow Q = PS = \frac{\Delta N}{\Delta t} kT$$

então

$$S = \frac{\Delta N}{\Delta t} \frac{kT}{P}$$

$\Delta N$  é o número de moléculas que escoram por unidade de tempo.

da eq. I, com:

$$m \frac{\Delta N}{\Delta t} = m \frac{Q}{kT}$$

$m$  é a massa da molécula.

Corrente molecular  $\equiv$  massa que escoa por unidade de tempo através de uma seção reta de tubulação.

Para uma mistura de gases

$$\text{de (I)} \quad Q = kT \sum_{i=1}^n \frac{\Delta N_i}{\Delta t}$$



# Algumas equações úteis

5

$$PV = NkT$$

$$k = \frac{R_0}{N_A}$$

$N_A$  é o n.º de avogadro

$$PV = N \frac{R_0}{N_A} T$$

multiplicando por  $m$

$$PV = Nm \frac{R_0}{m N_A} T$$

$N_A m \equiv$  massa molecular do gás  
 $\equiv M$

$W = Nm =$  massa do gás

então 
$$P \frac{\Delta V}{\Delta t} = \left( \frac{R_0 T}{M} \right) \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

$$\Rightarrow \boxed{Q = cte \frac{\Delta W}{\Delta t}}$$

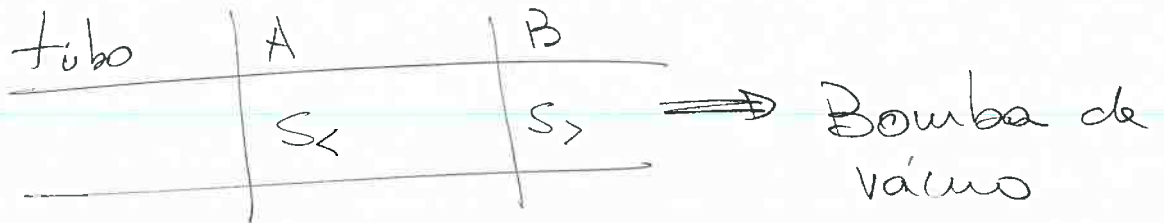
$Q$  é o fluxo de massa //



# ESCOAMENTO DE GASES

(6)

A velocidade de bombeamento não é constante ao longo da tubulação, pois  $S$  é resultante da diferença de pressões. Mas,  $PS$  é constante!!



A variação da pressão ao longo da tubulação é o resultado de uma certa impedância, oferecida pela própria tubulação, ao escoamento.

$$Z_{AB} = \frac{P_A - P_B}{Q}$$

Analogia com um circuito elétrico

$$V = Ri$$

○ inverso da impedância é a condutância

$$C = 1/Z$$

$$C_{AB} = \frac{Q}{P_A - P_B} \Rightarrow \text{unidade [l/s]}$$

Os cálculos dependem fortemente do regime de pressão e da geometria do sistema.

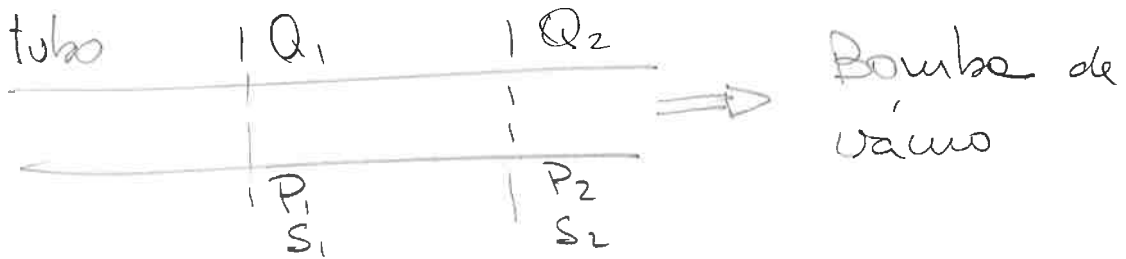
- Velocidade de bombeamento  $S$  [l/s]

Característica de um ponto

- Condutância  $C$  [l/s]

Característica entre dois pontos

## Relação entre C e S.



$$Q_1 = P_1 S_1$$

$$Q_2 = P_2 S_2$$

$$\frac{1}{S_1} = \frac{P_1}{Q_1} \quad (\text{I})$$

$$\frac{1}{S_2} = \frac{P_2}{Q_2} \quad (\text{II})$$

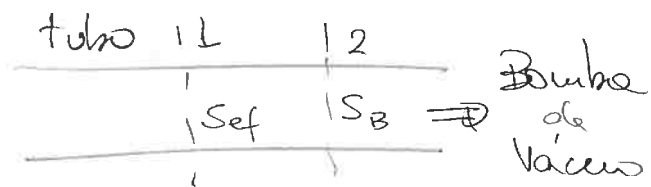
Subtraindo (I) de (II), temos:

$$\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2} = \frac{P_1}{Q_1} - \frac{P_2}{Q_2}$$

como  $Q = \text{cte}$   $Q_1 = Q_2$

então  $\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2} = \frac{P_1 - P_2}{Q} = \frac{1}{C}$ , logo:

$$\boxed{\frac{1}{C} = \frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2}}$$



Supondo o ponto 2 estar na boca da bomba de vácuo

$$S_1 = S_{ef} \quad S_2 = S_b$$

$$\frac{1}{S_{ef}} - \frac{1}{S_b} = \frac{1}{C}$$

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{S_b}$$

$$\boxed{S_{ef} = \frac{C \cdot S_b}{C + S_b}}$$

## EXEMPLOS:

(7)

(a) Se  $S_b \gg C$   
 $S_{ef} = C$

ou seja, não adianta comprar uma bomba de vácuo com velocidade de bombeamento muito maior do que a condutâncias do sistema

(b) Se  $S_b \ll C$

$$S_{ef} = S_b$$

⇒ Situação ideal

## EXEMPLOS PRÁTICOS:

(1)  $C = 100 \text{ l/s}$   
 $S_b = 100 \text{ l/s}$

$$S_{ef} = \frac{S_b C}{S_b + C} = \frac{100 \times 100}{100 + 100} = 50 \text{ l/s}$$

(2)  $S_{ef} = 60 \text{ l/s}$        $C = 50 \text{ l/s}$        $S_b = ?$

$$S_b = \frac{S_{ef} C}{C - S_{ef}} = \frac{60 \times 50}{60 - 50} < 0$$

$S_b$  negativo?

A bomba funciona, mas não com esse velocidade efetiva.

## Informações úteis

- No regime molecular a condutância independe da pressão. Depende apenas da geometria do sistema.
- No regime viscoso as condutâncias são enormes e dependem da pressão.

## Definições de throughput

$$Q = P S ; \quad Q = C \Delta P ; \quad Q = P \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

$$Q = k T \frac{\Delta N}{\Delta t} ; \quad Q = V \frac{\Delta P}{\Delta t}$$

## Revistas sobre Tecnologia do Vácuo

- ① Le vide (France)
- ② Vacuum - Pergamon Press
- ③ The Journal of vacuum Science and Technology (AIP)
- ④ Review of Scientific Instruments (AIP)
- ⑤ Journal of Scientific Instruments (Inglaterra)