

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Disciplina: Estequiometria Industrial
Código: 1709008

PROF(a). FABIOLA DIAS DA SILVA CURBELO

Estequiometria Industrial

1

- I. Sistema de Unidades

Medidas: são utilizadas pelas ciências, em geral, para descreverem um fenômeno de interesse.

- 1ª) Determinar o que se quer observar, ou seja, qual a variável a ser medida;
- 2ª) Achar um nome para esta variável;
- 3ª) Achar uma unidade para esta variável;
- 4ª) Medir esta variável.

1) Conceitos importantes

- 1) **Medida:** comparar, portanto é necessário um padrão para realizar a comparação (unidade);
- 2) **Variável:** denominada de grandeza física;
- 3) **Unidade:** é o padrão escolhido para efetuar as medidas.

Processos Unitários I

2

2) Dimensões

- É uma propriedade que pode ser medida. Ex.: comprimento, tempo, massa ou temperatura.
- Ou calculada pela multiplicação ou divisão de outras dimensões. Ex.: velocidade (comprimento/tempo), volume (comprimento³) ou massa específica (massa/volume³).
- **Unidades:** são meios de expressar as dimensões.

Os valores numéricos de duas quantidades podem ser **somados** ou **subtraídos** apenas se tiverem as mesmas unidades.

$$3 \text{ cm} + 1 \text{ cm} = 4 \text{ cm}$$

$$3 \text{ cm} - 1 \text{ mm (ou } 1 \text{ s)} = ?$$

Os valores numéricos e as suas unidades correspondentes podem sempre ser combinadas por **multiplicação** ou **divisão**.

$$3 \text{ m} \times 4 \text{ m} = 12 \text{ m}^2 ; 6 \text{ cm} \times 5 \text{ cm/s} = 30 \text{ cm}^2/\text{s} ; 6\text{g}/2\text{g} = 3 ; 7 \text{ km/h} \times 4 \text{ h} = 28 \text{ km}$$

3) Análise Dimensional

Permite resolver problemas cujas soluções não são encontradas pelos processos usuais de cálculo.

- Grandezas físicas fundamentais:

São aquelas a partir das quais todas as outras grandezas físicas são definidas.

- Grandezas físicas derivadas:

São combinações das grandezas fundamentais.

O valor de qualquer medida física é expresso pela combinação de dois fatores: a unidade e o número dessa unidade.

Ex.: tempo e comprimento são grandezas fundamentais;

velocidade é uma unidade derivada da razão entre as unidades fundamentais metro e segundo (m/s).

4) Estabelecimento de um Sistema de Unidades

Para o estabelecimento de um sistema de unidades é necessário uma 3ª grandeza fundamental:

massa ou força

- **Sistemas de Unidade Absolutos ou Dinâmicos:**

- Apresentam a massa como a 3ª grandeza fundamental.

- **Sistemas de Unidade Técnicos ou Gravitacionais:**

- Apresentam a força como a 3ª grandeza fundamental.

- **Sistemas de Unidade Mistos ou de Engenharia:**

- Apresentam tanto a massa quanto a força como grandezas fundamentais.

Processos Unitários I

5

5) Histórico

1º) **Medidas imprecisas:**

- Baseadas no corpo humano.

Ex.: palmo (22 cm); pé (30,48 cm = 12 polegadas), polegada (2,54 cm), braça (45 . 52 cm), côvado (45,72 cm).

Obs.: Este método gerou inúmeros problemas, principalmente no comércio, devido à falta de um padrão para determinar quantidades de produtos.

2º) **Sistema Métrico Decimal:**

- Criado pelo Governo Republicano Francês (1789).

- Baseado numa constante que, inicialmente, adotou 3 unidades básicas de medida: o metro, o litro e o quilograma.

Processos Unitários I

6

3º) Sistema de Unidades Absoluto:

- É mais complexo e sofisticado.
- Existem 3 sistemas de unidades absoluto: cujas grandezas fundamentais são comprimento, massa e tempo.

CGS, MKS e Sistema inglês

Tabela 1. Sistema de Unidade Absoluto.

Grandeza	Sistemas		
	CGS	MKS	Inglês
Comprimento (L)	1 centímetro (cm)	1 metro (m)	1 pé (ft)
Massa (M)	1 grama (g)	1 quilograma (Kg)	1 libra (lb)
Tempo (t)	1 segundo (s)	1 segundo (s)	1 segundo (s)

Processos Unitários I

7

Tabela 2. Unidades derivadas do Sistema Absoluto.

Grandeza	Sistemas		
	CGS	MKS	Inglês
Força (F)	1 dina (dyn)	1 newton (N)	1 poundal
Energia (E)	1 erg	1 joule (J)	1 (polegada)(pé)

- Quando as grandezas relacionadas à temperatura são usadas é conveniente definir a unidade:

- **Sistemas CGS e MKS:** T (°C) (graus centígrados ou celsius)
- **Sistema Inglês:** T (°F) (graus Fahrenheit)

Obs.: As unidades de temperatura são definidas independentemente do sistema de unidades.

Processos Unitários I

8

4º) Sistema de Unidades Técnico:

- Entre os mais usados estão os sistemas métrico e o inglês.
- Em ambos as grandezas fundamentais são comprimento, força e tempo.

Tabela 3. Sistema de Unidade Técnico.

Grandeza	Sistemas	
	Métrico	Inglês
Comprimento (L)	1 metro (m)	1 pé (ft)
Força (F)	1 quilograma-força(kgf)	1 libra-força (lbf)
Tempo (t)	1 segundo (s)	1 segundo (s)
Temperatura (T)	1 grau centígrado (°C)	1 grau Fahrenheit (°F)

5º) Sistema de Unidades de Engenharia:

- São consideradas 4 unidades básicas: comprimento, tempo, massa e força.

Tabela 4. Unidades do sistema usado em Engenharia.

Grandeza	Sistemas	
	Métrico	Inglês
Comprimento (L)	1 metro (m)	1 pé (ft)
Massa (M)	1 quilograma (kg)	1 libra (lb)
Força (F)	1 quilograma-força(kgf)	1 libra-força (lbf)
Tempo (t)	1 segundo (s)	1 segundo (s)
Temperatura(T)	1 grau centígrado (°C)	1 grau Fahrenheit (°F)

Processos Unitários I

9

6º) Sistema Internacional de Unidades (SI):

- O MKS foi adotado como o sistema internacional e denominado como SI. Embora a obrigatoriedade do sistema seja reconhecida, outros sistemas ainda são utilizados.

Tabela 5. Sistema Internacional de Unidades.

Grandeza	Unidade	Abreviação	Dimensão
Comprimento	Metro	m	L
Massa	Quilograma	Kg	M
Tempo	Segundo	s	T
Força	Newton	N	MLT ⁻²
Energia	Joule	J	ML ² T ⁻²
Potência	Watt	W	MLT ⁻³
Pressão	Pascal	Pa	ML ⁻¹ T ⁻²
Frequência	Hertz	Hz	T ⁻¹

Processos Unitários I

10

- As unidades fundamentais podem ser expressas em potência de base 10, utilizando múltiplos e submúltiplos.

Tabela 6. Múltiplos e submúltiplos.

Prefixo	Fator de multiplicação	Símbolo SI	Prefixo	Fator de multiplicação	Símbolo SI
Tera	10^{12}	T	Centi	10^{-2}	c
Giga	10^9	G	Mili	10^{-3}	m
Mega	10^6	M	Micro	10^{-6}	μ
Quilo	10^3	K	Nano	10^{-9}	n
Hecto	10^2	h	Pico	10^{-12}	p
Deca	10	da	Femto	10^{-15}	f
Deci	10^{-1}	d	Atto	10^{-18}	a

Para se formar o múltiplo ou submúltiplo de uma unidade, basta colocar o nome do prefixo desejado na frente do nome desta unidade.

Ex.: Para multiplicar e dividir a unidade volt por mil.
quilo + volt = quilovolt; k + V = kV
mili + volt = milivolt; m + V = mV

Processos Unitários I

11

6) NOMENCLATURA

6.1) Símbolo

a) Não é abreviatura.

O símbolo é um sinal convencional e invariável utilizado para facilitar e universalizar a escrita e a leitura das unidades do SI. Por isso, não é seguido de ponto.

	CERTO	ERRADO
segundo	s	s.; seg.
metro	m	m.; mtr.
quilograma	kg	Kg.; kgr.
hora	h	h.; hr.

b) Não é expoente.

O símbolo não é escrito na forma expoente.

CERTO	ERRADO
250 m	250 ^m
10 g	10 ^g
2 mg	2 ^{mg}

Processos Unitários I

12

c) Não tem plural.

O símbolo é invariável, não é seguido de ~~s~~.

	CERTO	ERRADO
cinco metros	5 m	5 ms
dois quilogramas	2 kg	2 kgs
oito horas	8 h	8 hs

d) Unidade composta.

Ao escrever uma unidade composta, não misturar nome com símbolo.

CERTO	ERRADO
quilômetro por hora; km/h	quilômetro/h; km/hora
metro por segundo; m/s	metro/s; m/segundo

6.2) O grama

O **grama** pertence ao **gênero masculino**. Por isso, ao se escrever e pronunciar essa unidade, seus múltiplos e submúltiplos, fazer a concordância corretamente.

Ex.: dois quilogramas
quinhentos miligramas
duzentos e dez gramas
oitocentos e um gramas

Processos Unitários I

13

6.3) Prefixo quilo

O prefixo quilo (símbolo k) indica que a unidade está multiplicada por mil. Portanto, não pode ser usado sozinho.

CERTO	ERRADO
quilograma; kg	quilo; k

Usar o prefixo quilo de maneira correta.

CERTO	ERRADO
quilômetro	Kilômetro
quilograma	Kilograma
quilolitro	kilolitro

6.4) Medidas de tempo

Ao escrever as medidas de tempo, observar o uso correto dos símbolos para hora, minuto e segundo.

CERTO	ERRADO
9h 25min 6s 11h 20min	9:25 h ou 9h 25' 6'' 11:20h ou 11,20h

Obs.: Deve-se observar que a subdivisão decimal da hora pode também ser utilizada. Assim, 11,20h significa 11 horas e 20 centésimos de hora que é igual a 11h 12 min.

Processos Unitários I

14

6.5) Prefixos das unidades do SI

a) Para formar o múltiplo ou submúltiplo de uma unidade, coloca-se o nome do prefixo desejado na frente do nome desta unidade. O mesmo se dá com o símbolo.

Ex.: Para multiplicar e dividir a unidade grama por mil.

quilo + grama = quilograma; $k + g = kg$

mili + grama = miligrama; $m + g = mg$

b) Os prefixos do SI também podem ser empregados com unidades fora do SI.

Ex.: milibar; quilocaloria; megatonelada.

c) Por motivos históricos, o nome da unidade de massa no SI contém um prefixo: **quilograma**. Por isso, os múltiplos e submúltiplos dessa unidade são formados a partir do grama.

7) OPERAÇÕES COM GRANDEZAS

7.1) Cálculos aritméticos

Representação por notação científica: tanto para números muito grandes quanto para números muito pequenos. O número é expresso pelo produto de um outro número, com seus algarismos significativos, e a potência 10.

Ex.: $168000 = 1,68 \times 10^5$ (ou $0,168 \times 10^6$)
 $0,000787 = 7,87 \times 10^{-4}$ (ou $0,787 \times 10^{-3}$)

7.2) Algarismos significativos

São calculados diferentemente para um número inteiro e para um número real.

Para um número inteiro: os algarismos significativos são os algarismos situados entre o 1º algarismo não-nulo à esquerda e o último algarismo não-nulo do número.

Para um número real (com parte decimal): os algarismos significativos são os algarismos situados entre o 1º algarismo não-nulo à esquerda e o último algarismo, nulo ou não-nulo, à direita do número.

Ex.: 3600 ou $3,6 \times 10^3$ → tem 2 algarismos significativos
 36060 ou $3,606 \times 10^4$ → tem 4 algarismos significativos
 5300,0 ou $5,3000 \times 10^3$ → tem 5 algarismos significativos
 0,0028 ou $2,8 \times 10^{-3}$ → tem 2 algarismos significativos
 0,00280 ou $2,80 \times 10^{-3}$ → tem 3 algarismos significativos

Obs.: O número de algarismos significativos no valor registrado de uma grandeza medida ou calculada fornece a precisão com que a grandeza é conhecida.

Quanto mais algarismos significativos tiver o valor da grandeza, maior a sua precisão.

Ex.: Para uma grandeza medida com 3 algarismos significativos: indica-se que o 3º algarismo significativo é aproximado.

Para comprimento = 8,48m (3 algarismos significativos)
o comprimento está entre 8,475 e 8,485 m

Para comprimento = 8,480m (4 algarismos significativos)
o comprimento está entre 8,4795 e 8,4805 m

Se a grandeza é conhecida precisamente como um número inteiro ou um número exato conhecido por definição, como o valor da aceleração da gravidade padrão, 9,80665 m/s², ela terá, então, um número infinito de algarismos significativos.

7.3) Multiplicação e Divisão

O número de algarismos significativos do resultado deve ser igual ao da grandeza de menor número de algarismos significativos.

Ex.: (7,82) x (4,388) = 34,31416 → 34,3

3AS 4AS 7AS 3AS

Ex.: (3,40.10⁻²) x (2,435.10⁶) / (3,42) = 24207,60234 → 2,42.10⁴

3AS 4AS 3AS 10AS 3AS

7.4) Adição e Subtração

Envolve a posição do último algarismo significativo, ou seja, a posição do algarismo relativo ao ponto decimal. A regra é:

Quando 2 ou mais números são somados ou subtraídos, a posição do último algarismo significativo de cada número deve ser comparada. O algarismo significativo mais à esquerda é a posição do último algarismo significativo permissível para a soma ou diferença.

REGRAS

- Quando o 1º algarismo à direita do último algarismo significativo for maior do que 5 ou 5 seguido de pelo menos um algarismo diferente de zero, o último algarismo significativo é arredondado para cima, ou seja, soma-se uma unidade a ele (letras a e b), e quando for menor do que 5 arredonda-se para baixo, ou seja, mantém-se o último algarismo significativo (letra c).

- Quando o 1º algarismo à direita do último algarismo significativo for igual a 5 ou 5 seguido de zeros, o último algarismo significativo será sempre par, ou seja, se ele for par, permanecerá inalterado (letra d), se não for par, é tornado par, somando-se uma unidade a ele (letra e).

Obs.: Regras adotadas pelas normas NBR 5891, ASTM 380 e ISSO R370.

8) ALGUMAS GRANDEZAS DA QUÍMICA E DA ENGENHARIA QUÍMICA

8.1) Quantidade de matéria (N): número de mols.

$$N = \frac{m \text{ (g)}}{M \text{ (g/mol)}}$$

em mol:

1 mol equivale a $6,022 \times 10^{23}$ moléculas (Número de Avogadro)

ou Kmol (SI):

1 kmol equivale a $6,022 \times 10^{26}$ moléculas

ou lbmol (sistema de engenharia): lb - 453,6g

1 lbmol - $453,6 \times 6,022 \times 10^{23}$ moléculas

1 lbmol - $2,732 \times 10^{26}$ moléculas

8.2) Massa molar (M):

- Relação entre as grandezas massa e quantidade de matéria (tabela periódica).

$$M = \frac{m \text{ (g)}}{N \text{ (mol)}}$$

Ex.:	Massa molar do carbono =	12,01 g/mol ou 12,01 kg/kmol ou 12,01 lb/lbmol
	Massa molar da água =	18,02 g/mol ou 18,02 kg/kmol ou 18,02 lb/lbmol

8.3) Massa específica (ρ) e volume específico (v):

- De acordo com a norma ISO 31, o adjetivo massico+ou especifico+é adicionado ao nome de uma grandeza para indicar o quociente dessa grandeza pela massa.

Grandeza	Definição	Unidades SI
Massa específica	$\rho = \text{massa/volume}$	Kg/m^3
Volume específico	$v = \text{volume/massa}$	m^3/Kg

Obs.: densidade é a relação entre as massas específicas de duas substâncias, uma delas tomadas como padrão.

8.4) Volume molar (Vm):

$$V_m = \frac{V \text{ (m}^3\text{)}}{N \text{ (mol)}}$$

8.5) Vazão ou taxa de escoamento:

$$W \text{ (kg/s)} = q \text{ (m}^3\text{/s)} \times \rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$n \text{ (kmol/s)} = q \text{ (m}^3\text{/s)} / V_m \text{ (m}^3\text{/kmol)}$$

$$n \text{ (kmol/s)} = W \text{ (kg/s)} / M \text{ (kg/kmol)}$$

8.6) Fluxo de material:

- Tem-se fluxo volumétrico, fluxo mássico e fluxo molar do fluido.

$$\text{Fluxo} = \text{taxa ou vazão por área transversal}$$

$$\text{Fluxo volumétrico} = \frac{\text{Vazão volumétrica}}{\text{Área transversal}} = \frac{q \text{ (m}^3\text{/s)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} = u \text{ [m/s]}$$

Obs.: o fluxo volumétrico corresponde à velocidade média (u) de escoamento do fluido na tubulação.

Processos Unitários I

23

$$\text{Fluxo mássico} = \frac{\text{Vazão mássica}}{\text{Área transversal}} = \frac{W \text{ (kg/s)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} = G \text{ [kg/m}^2\text{.s]}$$

Obs.: o fluxo mássico também pode ser chamado de velocidade mássica do fluido (G).

$$\text{Fluxo molar} = \frac{\text{Vazão molar}}{\text{Área transversal}} = \frac{n \text{ (kmol/s)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} = G_m \text{ [kmol/m}^2\text{.s]}$$

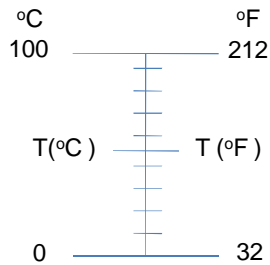
Obs.: o fluxo molar pode ser chamado de velocidade molar (G_m).

Processos Unitários I

24

8.7) Temperatura:

- É uma medida quantitativa do grau de aquecimento de um ambiente, de uma substância, etc.



“ Na escala Celsius, o intervalo entre os valores dos pontos fixos 0 e 100 é dividido em 100 espaços iguais.

“ Na escala Fahrenheit, o intervalo entre os valores dos pontos fixos 32 e 212 é dividido em 180 espaços iguais.

- Regra das proporções relativas:

$$\frac{T(^{\circ}\text{C}) - 0}{100 - 0} = \frac{T(^{\circ}\text{F}) - 32}{212 - 32} \quad \therefore \quad \frac{T(^{\circ}\text{C})}{100} = \frac{T(^{\circ}\text{F}) - 32}{180}$$

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{T(^{\circ}\text{F}) - 32}{1,8}$$

Processos Unitários I

25

- Relação entre as unidades de temperatura:

$$0\text{K} = 0\text{R} = -273^{\circ}\text{C} = -460^{\circ}\text{F}$$

Obs.: K e R sem o símbolo de grau °.

$$\left\{ \begin{array}{l} T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273 \\ T(\text{R}) = T(^{\circ}\text{F}) + 460 \\ T(\text{R}) = 1,8 T(\text{K}) \\ T(\text{R}) = 1,8 T(^{\circ}\text{C}) + 492 \end{array} \right.$$

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{T(\text{R}) - 492}{1,8}$$

$$\Delta 100^{\circ}\text{C} = \Delta 180^{\circ}\text{F}$$

$$\Delta^{\circ}\text{C} = 1,8 \Delta^{\circ}\text{F}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \text{K} = 1,8 \Delta \text{R} \\ \Delta \text{K} = \Delta^{\circ}\text{C} \\ \Delta \text{R} = \Delta^{\circ}\text{F} \\ \Delta \text{K} = 1,8 \Delta^{\circ}\text{F} \\ \Delta^{\circ}\text{C} = 1,8 \Delta^{\circ}\text{F} \end{array} \right.$$

Processos Unitários I

26

- Escalas de temperatura

212	672	Ponto de ebulição da água à 760 mmHg	373	100
32	492	Ponto de congelamento da água à 760 mmHg	273	0
0	460		255	- 18
- 40	420	°F = °C	233	- 40
Fahrenheit	Rankine		Kelvin	Celsius
- 460	0	Zero absoluto	0	- 273

$$T(R) = T(^{\circ}F) \cdot \frac{1 \Delta R}{1 \Delta^{\circ}F} + 460R$$

$$T(^{\circ}F) - 32^{\circ}F = T(^{\circ}C) \cdot \frac{1,8 \Delta^{\circ}F}{1 \Delta^{\circ}C}$$

$$T(K) = T(^{\circ}C) \cdot \frac{1 \Delta K}{1 \Delta^{\circ}C} + 273K$$

$$T(^{\circ}C) = [T(^{\circ}F) - 32^{\circ}F] \cdot \frac{1 \Delta^{\circ}C}{1,8 \Delta^{\circ}F}$$

Processos Unitários I

27

8.8) Pressão:

8.8.1) Pressão de fluido e pressão hidrostática:

A pressão é a razão entre a força e a área sobre a qual a força atua.

$$P = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$P = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot a}{A} = \frac{MLT^{-2}}{L^2} = ML^{-1}T^{-2}$$

No SI: $\longrightarrow P = Kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = N \cdot m^{-2} = Pa$

No Sistema da Engenharia: $\longrightarrow P = \frac{F}{L^2} = \frac{kgf}{m^2}$

No Sistema Inglês: $\longrightarrow P = \frac{lbf}{ft^2}$

Processos Unitários I

28

- Considere um fluido contido em um vaso fechado (Figura 1.a) ou escoando através de uma tubulação (Figura 1.b).

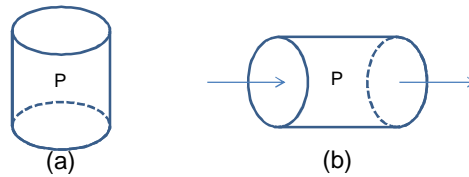


Figura 1. Pressão de fluido.

Tanto no vaso fechado quanto na tubulação, a pressão em consideração é a pressão real no interior dos equipamentos que vai governar a força F . Esta pressão é chamada de **pressão absoluta do fluido**.

Supõe-se uma coluna de fluido de h metros de altura e área da seção transversal igual a A m². Considere que o fluido tem a massa específica ρ (kg/m³) e que a pressão p_0 (Pa) é exercida sobre a superfície superior da coluna.

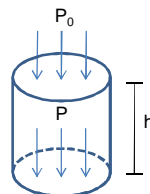


Figura 2. Pressão na base de uma coluna de fluido.

Processos Unitários I

29

A pressão P do fluido na base da coluna, chamada de **pressão hidrostática do fluido**, é, por definição, a força F exercida na base da coluna dividida pela área da base A . Esta força F na base da coluna é igual à força F_0 no topo da coluna mais o peso P da coluna de fluido na coluna. Logo,

$$F = F_0 + P = F_0 + mg \quad (2)$$

÷ por A , tem-se:

$$\frac{F}{A} = \frac{F_0}{A} + \frac{mg}{A} \quad \therefore \quad P = P_0 + \frac{mg}{A} = P_0 + \frac{mgh}{Ah}$$

Sabe-se que $Ah = v$ (volume de fluido na coluna)

$$P = P_0 + \frac{mgh}{v} = P_0 + \rho gh \quad (3)$$

com $\rho = \frac{m}{v}$

Obs.: Como a área A da seção transversal não aparece na equação, a fórmula se aplica tanto para uma coluna muito fina quanto para um oceano, ou seja, a **pressão hidrostática** do fluido não depende da forma do recipiente onde o fluido está contido.

Processos Unitários I

30

De acordo com a equação (3), conclui-se que a pressão, além de força por área, pode ser expressa como a altura de um fluido particular. Isto significa que a coluna hipotética de um fluido com altura h metros exerceria uma dada pressão na base, se a pressão no topo fosse zero, ou seja:

$$P_0 = 0$$

$$P = \rho gh = \rho_{H_2O} \cdot g \cdot h_{H_2O} = \rho_{Hg} \cdot g \cdot h_{Hg} \quad (4)$$

$$\therefore \frac{h}{h_{H_2O}} = \frac{\rho_{H_2O}}{\rho} \quad (5) \quad \text{ou} \quad \frac{h}{h_{Hg}} = \frac{\rho_{Hg}}{\rho} \quad (6)$$

8.8.2) Pressão atmosférica, pressão absoluta e pressão manométrica:

Pressão atmosférica: variável (medida por um barômetro).

Não confundir com a atmosfera-padrão: 760 mmHg à 0°C.

Unidades para atmosfera É padrão:

Unidade	atm	Pa	mmHg	mH ₂ O	psi	inHg	Kgf/cm ²
Valor	1,000	101325	760	10,332	14,696	29,92	1,033

Obs.: A pressão atmosférica local depende da altura do ponto de medição, da temperatura ambiente e das condições climáticas. Em um dado local, ela pode variar ao longo do dia e com a época do ano.

Considere um barômetro, onde um tubo fino de vidro graduado, completamente cheio de mercúrio, é emborcado no interior de uma cuba, também contendo mercúrio, com cuidado para não entrar ar no tubo.

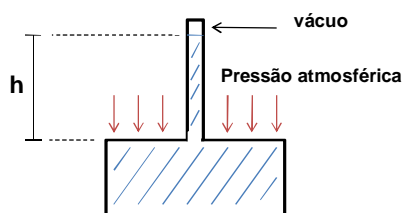


Figura 3. Barômetro.

Como a cuba está em contato com a atmosfera, a coluna de mercúrio no interior do tubo se equilibrará com a pressão atmosférica, indicando a diferença da altura em relação ao nível de mercúrio na cuba.

Obs.: Se no RJ, em um determinado dia, ao nível do mar, a pressão barométrica se situa em torno de 101325 Pa (760 mmHg), em BH, que fica em local mais alto, a pressão barométrica deve oscilar em torno de 91000 Pa (690 mmHg).

- A pressão, assim como a temperatura, pode ser expressa tanto por escala **absoluta** quanto **relativa** e é medida por um **manômetro**.
- Pode ser utilizado um manômetro com extremidade aberta para a pressão atmosférica ou com extremidade fechada, onde é criado um vácuo total (sem contra-pressão).

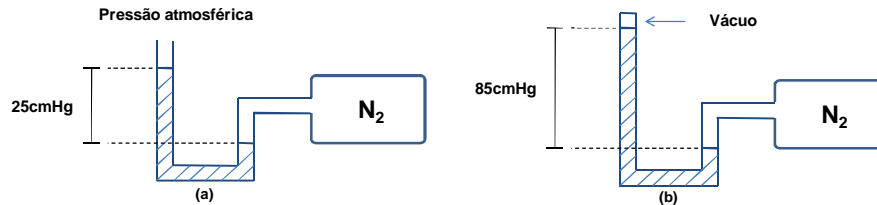


Figura 4. Manômetro de pressão absoluta (a) e pressão relativa (b).

- A **pressão absoluta** é baseada no vácuo completo, portanto, o valor lido independe do local, da temperatura e das condições atmosféricas. O **ponto zero** para uma escala de pressão relativa depende da pressão atmosférica local (pressão barométrica).
- A **pressão relativa** lida no manômetro é conhecida como pressão manométrica e é **inferior** ao valor da **pressão absoluta**.

$$P_{\text{absoluta}} = P_{\text{manométrica}} + P_{\text{barométrica}} \quad (7)$$

Processos Unitários I

33

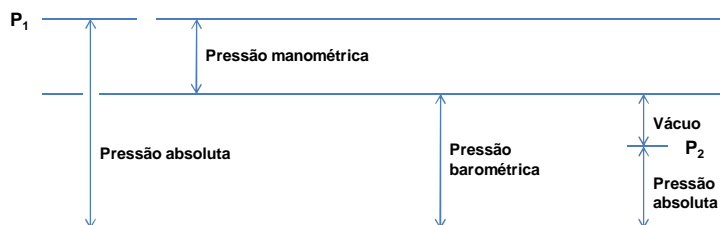


Figura 5. Relação entre as pressões.

Obs.: Quando a pressão absoluta é inferior à pressão atmosférica, tem-se o **vácuo**, que mede o quanto a **pressão absoluta** é inferior à **pressão barométrica** (ponto 2 da Figura 5).

- No Sistema Inglês:

$$P \rightarrow \text{lbf/in}^2 = \text{psi} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{psia (pressão absoluta)} \\ \text{psig (pressão manométrica)} \end{array} \right.$$

- No SI:

$$P \rightarrow \text{Pa} \quad (\text{tanto para pressão absoluta quanto manométrica, sem alterar os símbolos})$$

Processos Unitários I

34

8.9) Peso específico:

- É uma grandeza não prevista no SI e deve ser evitada, pois a grandeza massa específica já é suficiente para caracterizar essa propriedade da matéria.

- Por definição, o peso específico (γ) é a relação entre o peso e o volume de uma substância.

$$\gamma = \frac{F_p}{V} = \frac{P}{V} = \frac{m \cdot g}{V} \rightarrow \gamma = \rho \cdot g \quad (8)$$

- **No SI:**

$$\gamma = \rho \cdot g = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \frac{\text{N}}{\text{m}^3} = \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$$

- **No Sistema de engenharia: inclui-se o g_c .**

$$\gamma = \frac{P}{V \cdot g_c} = \frac{m \cdot g}{V \cdot g_c} = \rho \cdot \frac{g}{g_c} \quad \text{em que: } g_c = \text{aceleração da gravidade local}$$

Se $g_c = g$, o peso específico e a massa específica terão o mesmo valor numérico, embora com unidades diferentes.

- **No Sistema MKKfS:**

$$\gamma = \rho \cdot \frac{g}{g_c} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{\text{Kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{Kg} \cdot \text{m}} = \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$$

Processos Unitários I

35

8.10) Viscosidade absoluta (μ) e viscosidade cinemática (ν):

Viscosidade: propriedade que determina o grau de resistência do fluido a uma força cisalhante.

- A **viscosidade absoluta** (ou dinâmica) de um fluido é importante no estudo do escoamento de fluidos newtonianos através de tubulações e dutos.

Lei da viscosidade de Newton:

A tensão cisalhante (τ), razão entre a força F e a área A em que ela se aplica, numa interface tangente à direção do escoamento é proporcional à variação de velocidade u na direção y normal à interface. Matematicamente, tem-se:

$$\tau = \frac{F}{A} \propto \frac{du}{dy} \quad (9)$$

- Os fluidos que seguem esta lei são chamados de **fluidos newtonianos**. Introduzindo uma constante de proporcionalidade, tem-se:

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (10)$$

em que: μ é a viscosidade absoluta (cte de proporcionalidade)

$\mu \rightarrow$ depende da T do fluido e independe da P

Processos Unitários I

36



- **No SI:** $\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{du}{dy}} = \frac{\frac{M.L}{T^2.L^2}}{\frac{L}{T.L}} = \frac{M}{T.L} = M.T^{-1}.L^{-1} \rightarrow \mu = kg.m^{-1}.s^{-1} = Pa.s$

- **No Sistema de engenharia: inclui-se o g_c .**

$$\tau = \frac{\mu}{g_c} \cdot \frac{du}{dy} = \mu q \frac{du}{dy}$$

$$[\mu q] = \frac{[\mu]}{[g_c]} = \frac{\frac{M}{T.L}}{\frac{M.L}{T^2.F}} = \frac{F.T}{L^2} \rightarrow [\mu q] = \frac{Kgf.s}{m^2} \text{ ou } \frac{lbf.s}{ft^2}$$

- **No CGS:** $[\mu] = \frac{g}{cm.s} = P \text{ (poise) ou cP (centipoise)}$

- A **viscosidade cinemática** (ν) é definida como a relação entre a viscosidade absoluta (μ) e a massa específica do fluido (ρ), ambas à mesma T e P .

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{M.T^{-1}.L^{-1}}{M.L^{-3}} = L^2.T^{-1} \quad (11)$$

Processos Unitários I

37

ν foi criada para a determinação da viscosidade em viscosímetros-padrão industriais.

- **No SI:** $\nu = m^2/s$

- **No CGS:** $\nu = St \text{ (stokes), equivalente a } cm^2/s, \text{ ou cSt (centistokes)}$

Processos Unitários I

38

8.11) Energia (E):

- Existem diferentes formas de energia.

8.11.1) Energia Potencial (Ep):

- É a energia associada à força de atração exercida por um campo gravitacional sobre a massa m de um corpo (ou de um sistema), situada em um nível h em relação a um nível de referência.

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad (12)$$

- No SI: $[E_p] = [m \cdot g \cdot h] = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = \text{J}$

Em balanços energéticos, normalmente, se usa a energia específica ou mássica, ou seja, a razão entre a energia e a massa do corpo.

$$e_p = \frac{E_p}{m} = g \cdot h \quad (13)$$

$$[e_p] = [g \cdot h] = \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} = \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

- No Sistema de Engenharia:

$$E_p = \frac{m \cdot g \cdot h}{g_c} \quad (14)$$

$$e_p = \frac{E_p}{m} = \frac{g \cdot h}{g_c} \quad (15)$$

$$E_p = \frac{m \cdot g \cdot h}{g_c} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kgf}^{-1}} = \text{m} \cdot \text{kgf}$$

$$e_p = \frac{g \cdot h}{g_c} = \frac{\text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kgf}^{-1}} = \frac{\text{m} \cdot \text{kgf}}{\text{kg}}$$

Processos Unitários I

39

8.11.2) Energia Cinética (Ec):

- É a energia associada à velocidade (u) de um corpo (ou de um sistema) em relação à vizinhança.

$$E_c = \frac{m \cdot u^2}{2} \quad (16)$$

- No SI: $[E_c] = \left[\frac{m \cdot u^2}{2} \right] = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = \text{J}$

A energia cinética específica é dada por:

$$e_c = \frac{E_c}{m} = \frac{u^2}{2} \quad (17) \quad [e_c] = \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

- No Sistema de Engenharia:

$$E_c = \frac{m \cdot u^2}{2 g_c} \quad (18) \quad [E_c] = \frac{m u^2}{2 g_c} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}}{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kgf}^{-1}} = \text{m} \cdot \text{kgf}$$

$$e_c = \frac{E_c}{m} = \frac{u^2}{2 g_c} \quad (19) \quad [e_c] = \frac{u^2}{2 g_c} = \frac{\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}}{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kgf}^{-1}} = \frac{\text{m} \cdot \text{kgf}}{\text{kg}}$$

Processos Unitários I

40

8.11.3) Energia de Pressão (E_{pr}):

- Este tipo de energia é muito presente nos balanços de energia em sistemas abertos.

$$E_{pr} = p \cdot V \quad (20)$$

- **No SI:** $[E_{pr}] = [p \cdot V] = \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \cdot \text{m}^3 = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = \text{J}$

A energia de pressão específica é dada por:

$$[e_{pr}] = \frac{E_{pr}}{m} = \frac{p \cdot V}{m} \rightarrow [e_{pr}] = \frac{p}{\rho} \quad (21)$$

- **No SI:** $[e_{pr}] = \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = \frac{\text{J}}{\text{kg}}$

- **No Sistema de Engenharia:**

$$E_{pr} = \frac{p \cdot v}{g_c} \quad (22)$$

$$e_{pr} = \frac{p}{\rho \cdot g_c} \quad (23)$$

$$E_{pr} = \frac{p \cdot v}{g_c} = \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}^3}{\text{m}^3 \cdot \text{s}^2} \cdot \frac{\text{s}^2 \cdot \text{kgf}}{\text{kg} \cdot \text{m}} = \text{m} \cdot \text{kgf}$$

$$e_{pr} = \frac{p}{\rho \cdot g_c} = \frac{\text{kgf}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot \frac{\text{s}^2 \cdot \text{kgf}}{\text{kg} \cdot \text{m}} = \frac{\text{m} \cdot \text{kgf}}{\text{kg}}$$

Processos Unitários I

41

8.12) Energia Térmica ou Calor (Q):

- **Energia térmica:** energia transferida de um corpo para outro, ou de um sistema para a vizinhança, devido, unicamente, à diferença de temperatura existente entre eles.

- **Capacidade calorífica ou capacidade térmica:** é a quantidade de calor (Q) necessária para produzir uma certa diferença de temperatura (ΔT) em uma dada substância. O valor da capacidade calorífica é correspondente à quantidade de calor necessária para elevar a temperatura do corpo em uma unidade de valor de temperatura.

$$\begin{cases} C_p \text{ É capacidade calorífica à pressão constante.} \\ C_v \text{ É capacidade calorífica à volume constante.} \end{cases}$$

$$C_p \text{ ou } C_v = \frac{Q}{\Delta T} \quad (24) \quad \therefore [C_p \text{ ou } C_v] = \frac{[\text{energia}]}{[\Delta \text{temperatura}]}$$

- **No SI:** $[C_p \text{ ou } C_v] = \frac{\text{J}}{\text{K}}$

É Capacidade calorífica específica (c_p ou c_v):

$$c_p = \frac{C_p}{m} \quad \text{ou} \quad c_v = \frac{C_v}{m}$$

É Capacidade calorífica molar (C_{pm} ou C_{vm}):

$$C_p = \frac{C_p}{N} \quad \text{ou} \quad C_v = \frac{C_v}{N}$$

Processos Unitários I

42

Obs.: Capacidade calorífica específica da água pura é igual a 1,0 cal/g.°C ou 1,0 kcal/kg.°C à 14,5°C ou, ainda, 1,0 BTU/lb. °F à 59 - 60°F.

$$\frac{1,0 \text{ kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} = \frac{1,0 \text{ BTU}}{\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}} = \frac{4,1868 \text{ kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

9) CONVERSÃO DE UNIDADES ENTRE O SI E OUTROS SISTEMAS

9.1) Conversão de valores de grandezas:

É uma tarefa bastante comum. Deve-se pegar os fatores de conversão das unidades correspondentes e efetuar a conversão facilmente.

Ex.: Conversão de unidades de viscosidade.

Se a viscosidade de um fluido é $\mu = 300 \text{ lb}/(\text{ft} \cdot \text{s})$, calcule o valor equivalente nas unidades do SI.

$$\mu = 300 \frac{\text{lb}}{\text{ft} \cdot \text{s}} \cdot \frac{0,454 \text{ kg}}{1 \text{ lb}} \cdot \frac{1 \text{ ft}}{0,3048 \text{ m}} \cdot \frac{1 \text{ s}}{3600 \text{ s}} = (300 \cdot 0,454 / 0,3048 \cdot 3600) \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

$$\mu = 0,124 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 124 \text{ mPa} \cdot \text{s}$$

9.2) Conversão de equações:

Não tem o mesmo procedimento que a conversão de grandezas. Uma equação deve ser dimensionalmente homogênea e consistente, ou seja, ambos os lados devem ter as mesmas dimensões e unidades.

$$u \text{ (m/s)} = u_0 \text{ (m/s)} + g \text{ (m/s}^2\text{)} \times t \text{ (s)} \quad (\text{A})$$

Esta equação é dimensionalmente homogênea e consistente, pois ambos os lados da equação e os termos somados no lado direito têm as mesmas dimensões (L/T) e as mesmas unidades (m/s).

Se uma equação é dimensionalmente homogênea, mas os termos que se somam algebricamente têm unidades inconsistentes, a equação pode se tornar consistente aplicando-se os fatores de conversão apropriados.

Ex.: Se na equação do movimento retilíneo uniforme se deseja utilizar o tempo em minutos mantendo-se as demais unidades, tem-se:

$$u \text{ (m/s)} = u_0 \text{ (m/s)} + 60 \text{ g (m/s}^2\text{)} \times t \text{ (min)} \quad (B)$$

A constante 60 é o fator de conversão 60s/min. Com esse fator, os termos passam a ter as mesmas unidades para que sejam somados, o que torna a equação consistente.

Exercício: consistência e homogeneidade dimensional.

A equação de van Der Waals, que é a equação mais simples para descrever o comportamento dos gases reais, é:

$$\left(P + \frac{a}{V_m^2}\right) \cdot (V_m - b) = RT$$

- a) Quais as dimensões das constantes a e b ?
b) Quais as unidades das constantes a e b se for usado o SI?

$$\frac{[a]}{[V_m^2]} = [P] \quad \therefore [a] = [P] \cdot [V_m]^2 = [Pa] \cdot \left[\frac{L^3}{N}\right]^2 = [Pa] \cdot \frac{[L]^6}{N^2} \quad \therefore [a] = Pa \cdot m^6 / kmol^2$$

$$[b] = [V_m] = \left[\frac{L^3}{N}\right] = \frac{[L]^3}{N} \quad \therefore [b] = m^3/kmol$$

Processos Unitários I

45

Obs.: expoentes, funções exponenciais, logaritmo, tangente → adimensionais.

$$2^{0,8m} \quad \log(10kg) \quad \text{tg}(25s)$$

As unidades de $[0,8] = m^{-1}$; $[10] = kg^{-1}$; $[25] = s^{-1}$, para que os expoentes e os argumentos das funções transcendentais sejam adimensionais.

Exercício: consistência dimensional.

A Lei de Arrhenius, usada no estudo da cinética das reações químicas, estabelece que:

$$K = k_0 \cdot e^{(-E_a/RT)}$$

Na qual:

K = constante cinética, $kmol/(s \cdot m^3)$

R = constante dos gases ideais, $kJ/(kmol \cdot K)$

T = temperatura, K .

Quais são as unidades do fator de frequência k_0 e da energia de ativação da reação E_a ?

Para que a função seja dimensionalmente homogênea, k_0 deve ter as mesmas unidades de k , uma vez que a função exponencial é adimensional. Portanto,

$$[k_0] = [k] = kmol/(s \cdot m^3)$$

O argumento e deve ser adimensional:

$$\frac{E_a}{RT} = 1 \quad \rightarrow \quad [E_a] = [RT] = \frac{kJ}{kmol \cdot K} \cdot K \quad \therefore [E_a] = kJ/kmol$$

Processos Unitários I

46

Ex.: Conversão de unidades de equação.

Obter a equação (B) a partir da equação (A).

$$\text{eq. (A): } u \text{ (m/s)} = u_0 \text{ (m/s)} + g \text{ (m/s}^2\text{)} \times t \text{ (s)}$$

Procedimento errado: usar o fator de conversão (min/60s) diretamente na equação.

$$u \text{ (m/s)} = u_0 \text{ (m/s)} + g \text{ (m/s}^2\text{)} \times t \text{ (s)} \cdot \frac{\text{min}}{60 \text{ s}}$$

$$u \text{ (m/s)} = u_0 \text{ (m/s)} + g \text{ (m/s}^2\text{)} \times t \text{ (min)}/60 \quad (\text{C})$$

Verificação da validade da eq. (C) e comparação com a equação válida (A).

Seja: $u_0 = 0 \text{ m/s}$; $g = 10 \text{ m/s}^2$; $t = 60 \text{ s} = 1 \text{ min}$.

Eq (A): $u = 0 + 10 \text{ m/s}^2 \cdot 60 \text{ s} = 600 \text{ m/s}$.

Eq (C): $u = 0 + 10 \text{ m/s}^2 \cdot 1 \text{ min}/60 = 0,166 \text{ m/s}$.

Conclui-se que o procedimento usado para a conversão das unidades de grandezas NÃO se aplica para a conversão de unidades de equações.

Processos Unitários I

47

- V. Materiais Gasosos e Líquidos

Estados físicos da matéria → sólido, líquido e gasoso

Gases

Volume: sensível, bastante expansíveis (ocupam todo o volume oferecido)
T e P: pouco sensíveis

Sólidos e Líquidos

Volumes menos sensíveis às variações de T e P que os gases.

Líquidos: não têm forma definida, apresentam uma superfície que limita o espaço no recipiente que os contêm.
Sólidos: apresentam volume e forma bem definidos.

- Dos 3 estados, o **gasoso** é o mais simples com relação ao estudo de suas propriedades, pois existem relações simples entre P, T e V, associadas a uma certa massa.

- **Dependendo da T e da P:** composto puro (sólido, líquido ou gasoso).

- **Fase:** estado da matéria completamente homogêneo e uniforme.

Processos Unitários I

48

Ex.: Ebulição da água: 2 fases

{ fase líquida (água)
 fase vapor (vapor d'água)

Líquidos imiscíveis: formação de 2 fases diferentes

{ água
 hidrocarbonetos

Material:

a) Homogêneo: quando forma apenas uma única fase.

Ex.: misturas e soluções.

a.1) Misturas: quando as substâncias formam materiais de aspecto uniforme em qualquer proporção.

Ex.: água e etanol

pentano e hexano

} formam material homogêneo em qualquer proporção destas substância

a.2) Soluções: quando as substâncias não formam materiais de aspecto uniforme em qualquer proporção.

Ex.: **soluto:** componente em menor proporção;

solvente: componente em maior proporção.

b) Heterogêneo: quando forma mais de uma fase.

Ex.: água (substância polar)

composto orgânico (substância apolar)

Processos Unitários I

49

- PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS: relações entre grandezas

1) Composição: determina os componentes contidos no material, seja líquido ou gasoso.

Formas de expressar a composição de materiais. Considere um material com k componentes.

Fração ou % em massa	$f_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^k m_i}$ ou $f_i (\%) = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^k m_i} \times 100$
Fração ou % em volume	$\phi_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^k V_i}$ ou $\phi_i (\%) = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^k V_i} \times 100$
Fração ou % em quantidade de matéria (fração molar)	$x_i = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^k N_i}$ ou $x_i (\%) = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^k N_i} \times 100$

$$\begin{cases}
 \sum f_i = 1 \text{ ou } 100\% \\
 \sum \phi_i = 1 \text{ ou } 100\% \\
 \sum x_i = 1 \text{ ou } 100\%
 \end{cases}$$

Obs.: A composição é usada quando se conhece as quantidades relativas de todos os componentes dos materiais.

Processos Unitários I

50

Relação entre composições:

A composição de uma mistura pode ser expressa como a razão entre um componente e um outro tomado como base, principalmente quando se tem até 3 componentes na mistura.

$$\left\{ \begin{array}{l} W_i = \text{razão em massa (letra maiúscula)} \\ X_i = \text{razão em quantidade de matéria} \end{array} \right.$$

Formas de expressar a razão.

Razão em massa	$W_i = \frac{\text{Massa do componente } i}{\text{Massa do componente base}}$
Razão em quantidade de matéria	$X_i = \frac{\text{Quantidade de matéria do componente } i}{\text{Quantidade de matéria do componente base}}$

Processos Unitários I

51

2) Teor: determina a quantidade de um componente em uma dada quantidade de material, sem se importar quais são os outros componentes e as suas quantidades.

Obs.: O teor é usado quando se conhece a quantidade relativa de um ou de alguns componentes dos materiais. Quando a quantidade do material é expressa em volume, usa-se o termo concentração ao invés de teor.

2.1) Teores expressos como ppm, ppb e ppt: expressões usadas quando o teor (em massa, volume ou quantidade de matéria) de um dado componente em uma mistura é muito pequeno.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ppm} = \text{parte por milhão} \\ \text{ppb} = \text{parte por bilhão} \\ \text{ppt} = \text{parte por trilhão} \end{array} \right.$$

Ex.: 0,0001% (fração = 0,000001) é designado 1 ppm, que é equivalente a 1mg/kg de mistura.

Formas de expressar teor para materiais diluídos.

Tipo de fração	ppm	ppb	ppt
Massa	mg/kg	µg/kg	ng/kg
Volume	cm³/m³ ou µL/L	mm³/m³ ou nL/L	dm³/km³ ou pL/L
Quantidade de matéria	µmol/mol ou mmol/kmol	µmol/kmol ou mmol/Mmol	nmol/kmol ou µmol/Mmol

Obs.: Para misturas gasosas estas expressões estão definidas em fração em volume ou em quantidade de matéria.
Para misturas líquidas ou sólidas estas expressões estão definidas em fração em massa.

Processos Unitários I

52

3) Concentração: determina a quantidade de uma substância (soluto) em uma dada quantidade de material, expressa em volume.

Formas de expressar a concentração.

Concentração em massa	$y_i = \frac{m_i}{V_{\text{mistura}}}$
Concentração em volume	$\sigma_i = \frac{V_i}{V_{\text{mistura}}}$
Concentração em quantidade de matéria	$C_i = \frac{N_i}{V_{\text{mistura}}}$

- VI. Gases ideais ou perfeitos

Gás ideal ou perfeito: é um gás imaginário que obedece as leis empíricas de Boyle-Mariotte e de Charles e Gay-Lussac.

- Lei de Boyle-Mariotte:

Estabelece que: **A temperatura constante, o produto da pressão absoluta pelo volume ocupado por um certo número de moléculas (ou por uma certa massa) de gás é constante.** A expressão analítica desta lei é:

$$p \cdot V = \text{constante} = K \quad \text{ou} \quad P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (1)$$

- Lei de Charles e Gay-Lussac:

Estabelece que: **A pressão constante, o volume ocupado por um certo número de moléculas (ou por uma certa massa) de gás é proporcional a sua temperatura absoluta.** A expressão analítica desta lei é:

$$\frac{V}{T} = \text{constante} = K \quad \text{ou} \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (2)$$

Estas duas leis combinadas originam à **Equação de estado dos gases ideais.**

$$\frac{PV}{T} = \text{constante} = r \quad \text{ou} \quad \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (3)$$

O r depende da massa e da natureza do gás, ou seja, se m corresponder à quantidade de matéria N , r pode ser substituído por R , que independe da massa e da natureza do gás e relacionar como:

$$r = RN = R \frac{m}{M}$$

Assim, a eq. (3) pode ser escrita como:

$$PV = NRT \quad (4)$$

ou $\frac{PV}{N} = RT \quad \therefore PV_m = RT \quad (5)$

A eq. (5) pode ser reescrita, baseando-se no volume molar:

$$\frac{P_1 V_{m1}}{P_2 V_{m2}} = \frac{T_1}{T_2} \quad (6)$$

1) Condições-padrão:

- **Condições normais de temperatura e pressão (CNTP):** 273,15K (0°C) e 101,325kPa (1atm padrão)
- **Na Indústria de Petróleo e Gás Natural:**
Í Standard conditions (SC): 60°F (15°C) e 14,7 psia (1atm padrão)
- **No Brasil:** tem-se as condições BR adotada por algumas indústrias (20°C e 1atm, além das CNTP)

Processos Unitários I

55

2) Volume Molar: bastante usado para o estado gasoso.

Condições-padrão	Volume molar (V_m)
CNTP	22,415 m ³ /kmol
BR	24,055 m ³ /kmol
SC	379,49 ft ³ /lbmol

- Valores de R:

$$R = 82,06 \frac{\text{atm.cm}^3}{\text{mol.K}} = 10,73 \frac{\text{psia.ft}^3}{\text{lbmol.R}} = 1,9872 \frac{\text{cal}}{\text{mol.K}} = 0,08478 \frac{(\text{Kgf/cm}^2).\text{m}^3}{\text{kmol.K}} = 8,314 \frac{\text{L.kPa}}{\text{mol.K}}$$

Processos Unitários I

56

3) Massa específica e densidade:

Como o volume de um gás varia com a temperatura e a pressão, estas duas condições devem ser especificadas para definir claramente a massa específica do gás. Caso estas condições não sejam especificadas, a massa específica é considerada nas condições-padrão (CNTP ou SC).

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{N \cdot M}{V} \quad \therefore \quad \rho = \frac{M \text{ (massa molar)}}{V \text{ (volume molar)}} \quad (7)$$

$$PV = NRT \rightarrow PV = \frac{m}{M} RT \rightarrow PM = \frac{m}{V} RT \rightarrow PM = \rho RT$$

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (8)$$

A densidade de um gás é a razão entre a massa específica do gás na T e P desejadas e a massa específica de um gás padrão ou de referência, normalmente o ar, definido a certas condições de T e P.

$$d_{P_1, T_1 / P_2, T_2} = \frac{\rho_{\text{gás}, P_1, T_1}}{\rho_{\text{ref}, P_2, T_2}} \quad (9)$$

Processos Unitários I

57

Quando as condições de T e P não são especificadas, considera-se a mesma para os 2 gases.

$$d = \frac{\rho_{\text{gás}}}{\rho_{\text{ar}}} = \frac{\frac{M_{\text{gás}}}{V_{m, \text{gás}}}}{\frac{M_{\text{ar}}}{V_{m, \text{ar}}}} \quad (10)$$

Se o gás e o ar são considerados gases ideais, $V_{m, \text{gás}} = V_{m, \text{ar}}$ e, portanto:

$$d = \frac{M_{\text{gás}}}{M_{\text{ar}}} \quad (11)$$

Processos Unitários I

58

4) Mistura de gases ideais:

Em uma mistura de gases ideais, as moléculas de cada gás componente se comportam independentemente, como elas estivessem sozinhas, presentes no recipiente.

A **pressão total** é igual à soma das **pressões parciais** exercidas pelas moléculas de cada gás componente e isto se aplica a todos os gases, independentemente se eles têm ou não comportamento ideal.

- **Pressão parcial:** pressão que seria exercida pelo gás componente se ele estivesse sozinho ocupando o volume da mistura, na mesma condição de T.
- **Volume de componente puro:** volume que seria ocupado pelo gás componente se ele estivesse sozinho, na mesma P de T da mistura.

4.1) Lei de Dalton:

A **pressão total** da mistura gasosa será a soma das pressões parciais de cada gás, ou seja:

$$P = P_a + P_b + P_c + \dots = \sum P_i \quad (12)$$

$$P_a = \frac{N_a RT}{V} \quad (13)$$

$$P_b = \frac{N_b RT}{V} \quad (14)$$

$$P = \sum N_i \frac{RT}{V} \quad (15)$$

Processos Unitários I

59

Dividindo (13) por (14), tem-se:

$$\frac{P_a}{P_b} = \frac{N_a}{N_b}$$

ou $\frac{P_a}{P} = \frac{N_a}{\sum N_i} = y_a \rightarrow \boxed{P_a = y_a \cdot P} \quad (16)$

Geralmente, pode-se escrever:

$$\boxed{\frac{P_i}{P} = \frac{N_i}{\sum N_i} = y_i} \quad (\text{fração em quantidade de matéria do componente } i) \quad (17)$$

4.2) Lei de Amagat:

A **volume total** da mistura gasosa ideal é igual a soma das volumes dos componentes puros, ou seja:

$$V = V_a + V_b + V_c + \dots = \sum V_i \quad (18)$$

$$V_i = \frac{N_i RT}{P} \rightarrow V = \frac{(\sum N_i) RT}{P} \quad \therefore \boxed{\sum V_i = \frac{(\sum N_i) RT}{P}} \quad (19)$$

$$\boxed{\frac{V_i}{\sum V_i} = \frac{N_i}{\sum N_i} = y_i} \quad (\text{fração em quantidade de matéria do componente } i \text{ ou } \phi_i = y_i) \quad (20)$$

ou seja: fração em volume = fração em quantidade de matéria

Processos Unitários I

60

4.3) Relações de composições:

Quando se conhece a massa molar individual dos componentes e as suas frações em quantidade de matéria (y_i) na mistura, a massa molar média de uma mistura gasosa (ou líquida) pode ser calculada por:

$$M_{\text{mist}} = M_1 \cdot y_1 + M_2 \cdot y_2 + \dots = \sum_{i=1}^k M_i \cdot Y_i \quad (k \text{ componentes}) \quad (21)$$

- VII. Materiais líquidos

1) Massa específica e densidade:

$\rho = \rho(T)$ (função apenas da temperatura)

T (°C)	$\rho_{\text{água}}$ (kg/m³)	T (°C)	$\rho_{\text{água}}$ (kg/m³)
0,0	999,840	25,0	997,049
4,0	999,972	30,0	995,650
10,0	999,700	35,0	994,033
15,5	999,022	40,0	992,222
20,0	998,206	45,0	990,222

$$d_{T_1/T_2} = \frac{\rho_{\text{liq}, T_1}}{\rho_{\text{água}, T_2}} \quad (22)$$

No Brasil, a **temperatura padrão** para medição de líquidos é de 20°C, portanto:

$$d_{20/4^\circ\text{C}} = \frac{\rho_{\text{liq}, 20^\circ\text{C}}}{\rho_{\text{água}, 4^\circ\text{C}}} \quad (23)$$

Obs.: o $\rho_{\text{água}}$ é medida à 4°C, pois nesta temperatura ela é considerada exatamente igual a 1,0kg/L ou 1,0g/mL.

Nos EUA, a **temperatura padrão** é de 60°F e nessa temperatura a $\rho_{\text{água}} = 999,02 \text{ kg/m}^3$, portanto tem-se $d_{60/60^\circ\text{F}}$.
Na indústria do petróleo, a densidade é expressa em °API (Americam Petroleum Institute), definida por:

$$^\circ\text{API} = \frac{141,5}{d_{60/60^\circ\text{F}}} - 131,5 \quad (24)$$

2) Mistura de líquidos ideais:

Uma mistura de líquidos é dita ideal, quando:

(não há contração nem expansão)

$$V_{\text{mistura}} = \sum V_{\text{componentes}} = \sum V_i \quad (25)$$

(não há aquecimento nem resfriamento)

$$\Delta H_{\text{mistura}} = 0 \quad (26)$$

3) Relações entre composições de misturas:

Adota-se o mesmo que foi adotado para mistura de gases ideais, utilizando uma base de cálculo.

Obs.: Conhecendo-se a fração mássica da mistura, calcula-se a massa específica de uma mistura de k componentes por:

$$\rho_{\text{mistura}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{f_i}{\rho_i}} \quad (27)$$

ou

$$\rho_{\text{mistura}} = \sum_{i=1}^k f_i \cdot \rho_i \quad (28)$$

Analogamente, a densidade de uma mistura de **k** componentes pode ser calculada por:

$$d_{\text{mistura}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{f_i}{d_i}} \quad (29)$$

ou

$$d_{\text{mistura}} = \sum_{i=1}^k f_i \cdot d_i \quad (30)$$

4) Misturas de soluções não ideais:

$$V_{\text{mistura}} \neq \sum V_{\text{componentes}} \neq \sum V_i \quad (31)$$

Obs.: Não se aplica, portanto, o procedimento usado para o cálculo da densidade média da mistura. A densidade da mistura deve ser determinada experimentalmente.