GRANDEZAS DA QUÍMICA E ENGENHARIA QUÍMICA (Teoria)

I- *Quantidade de matéria (N)*

Esta grandeza, ***quantidade de matéria***, substitui o que era anteriormente conhecido como ***número de moles***, expressão obsoleta e que não deve ser mais usada. Ao se prescrever que o plural do nome da unidade ***mol*** é ***mols*** ao invés de ***moles***, como se usava até então, levou as pessoas a usarem número de mols como sinônimo de quantidade de matéria; ***número de mols*** é tão inadequado como ***número de moles***. Da mesma forma que não se usa a expressão ***número de quilogramas*** como equivalente à massa e nem ***número de metros cúbicos*** ou ***número de litros*** como equivalente a volume, não se deve usar ***número de mols*** como equivalente à quantidade de matéria.

Uma dada massa ou um dado volume de qualquer substância está sempre associada(o) a diferentes números extremamente grandes das entidades que compõem essas substâncias. Isto porque essas entidades, sejam moléculas ou átomos, têm massas diferentes e ocupam volumes diferentes. Como nos interessa trabalhar com números fixos de entidades, devemos usar a grandeza ***quantidade de matéria***, cuja unidade SI é o mol. Como esta grandeza não se refere apenas a moléculas, as entidades elementares devem ser especificadas se são moléculas, átomos, elétrons, outras partículas ou agrupamentos especificados de tais partículas. Assim, podemos nos referir a mol de moléculas, mol de átomos, mol de íons etc., independentemente da entidade elementar. Desta forma, o correto é dizer que um mol do átomo C se combina com quatro mols do átomo H para formar um mol de CH_4. No passado, para os átomos se usava a expressão obsoleta ***átomo-grama,*** da mesma forma que para os íons se usava a expressão obsoleta ***íon-grama***.

O mol, como definido no SI (ver tabela 2.3), é a quantidade de matéria de um sistema que contém tantas entidades elementares quantos são os átomos contidos em 0,012 quilograma de carbono 12. Este número de átomos mencionados na definição anterior é igual a 6,022 14×10^{23}, o famoso Número de Avogadro. Portanto, toda amostra de substância que contiver este número de entidades terá uma quantidade de matéria igual a 1mol.

Usando-se o SI, é mais adequado se trabalhar com o múltiplo do mol, o quilomol, cujo símbolo é kmol. Neste caso, o número de Avogadro correspondente a 1kmol é 6,022 14×10^{26}, pois o quilomol conterá 1000 vezes mais moléculas que o mol. Note que não é necessário e não deve ser usada a expressão ***quilogramamol*** e nem o símbolo correspondente ***kgmol***; se mol é a unidade e k é o prefixo equivalente a mil, o símbolo de quilomol é simplesmente kmol.

Os países de língua inglesa, ainda em fase de transição com o uso do SI, ainda adotam o libramol (símbolo lbmol) como unidade de quantidade de matéria. Por definição, o libramol contém tantas entidades elementares quantos são os átomos contidos em 12 lb de carbono 12. O número de Avogadro, neste caso, é igual a:

$$453{,}5924 \times 6{,}022\ 14 \times 10^{23} = 2{,}731\ 60 \times 10^{26},$$

ou seja, o libramol contém mais entidades elementares que o mol e, portanto, a massa correspondente é maior. Do exposto acima, se conclui que a relação entre o libramol e o quilomol é a mesma relação que existe entre a libra e o quilograma, ou seja:

$$1\ \text{lbmol} = 0{,}453\ 5924\ \text{kmol} \quad \text{ou} \quad 1\ \text{kmol} = 2{,}204\ 622\ \text{lbmol}$$
$$1\ \text{lb} = 0{,}453\ 5924\ \text{kg} \quad \text{ou} \quad 1\ \text{kg} = 2{,}204\ 622\ \text{lb}$$

II- Massa molar (M)

Como visto no item anterior, uma dada amostra de uma substância de massa ***m*** kg contém uma quantidade de matéria ***N*** mol. É dado o nome de ***massa molar*** (*M*) à relação entre essas grandezas — massa e quantidade de matéria. A massa molar de qualquer substância (ou qualquer elemento químico) corresponde à sua massa molecular (ou massa atômica) com as unidades respectivas de massa e quantidade de matéria, em consideração. Assim, por exemplo, a massa molar do carbono é 12,01 kg/kmol (ou 12,01 lb/lbmol) e a massa molar da água é 18,016 kg/kmol (ou 18,016 lb/lbmol). De uma forma geral, se a massa molecular de uma substância é M, então a sua massa molar será *M* kg/kmol, *M* g/mol ou *M* lb/lbmol. Analogamente, se a massa atômica de um elemento químico é M, a sua massa molar será *M* kg/kmol, *M* g/mol ou *M* lb/lbmol. Observação: Lembre-se que a massa molar vale para qualquer entidade elementar, seja molécula ou átomo.

De acordo com o recomendado pela ***União Internacional de Química Pura e Aplicada (UIQPA)***, essa grandeza ***massa molar*** deve ser usada em substituição aos termos obsoletos — ***átomo-grama***, ***molécula-grama*** (ou ***mol***), ***peso-fórmula*** ou ***fórmula-grama*** — usados para se referir à massa (em gramas) de um mol de entidades.

As grandezas massa atômica e massa molecular (os termos peso atômico e peso molecular devem ser evitados), como os próprios nomes dizem, se referem à massa de um átomo (de um dado elemento) e à massa de uma molécula (de uma dada substância). Como essas massas são muito pequenas, os químicos criaram as massas atômicas relativas, tomando como base o carbono, e introduziram a unidade (unificada) de massa atômica (símbolo u) como sendo a massa de 1/12 do átomo de carbono 12.

Nos cálculos da engenharia química, como é conveniente trabalhar constantemente com unidades de grandezas, a ***massa molar*** é a grandeza recomendada para relacionar a massa com a quantidade de matéria. O apêndice D traz as massas molares dos elementos químicos.

GRANDEZAS DA QUÍMICA E ENGENHARIA QUÍMICA (continuação)

III- *Massa específica*[6] *(ρ) e volume específico (v)*

Uma dada amostra de uma substância de massa ***m*** kg ocupa um volume ***V*** m^3. A relação massa por volume tem o nome de massa específica e a relação volume por massa tem o nome de volume específico e, obviamente, uma grandeza é a inversa da outra.

Grandeza	Definição	Unidades SI
Massa específica	ρ = massa / volume	kg/m^3
Volume específico	v= volume / massa	m^3/kg

A massa específica é mais usual na engenharia e tem como símbolo a letra grega ρ (pronúncia rô). Alguns autores ainda usam indevidamente o termo ***densidade*** para a relação massa por volume. Densidade é a relação entre as massas específicas de duas substâncias, uma delas tomada como padrão. No próximo capítulo, essa grandeza ***densidade*** será discutida em mais detalhe, para o caso de líquidos e de gases.

O volume específico (v) é mais usual na termodinâmica. Como o volume é dependente da temperatura e pressão, a massa específica e o volume específico também serão.

♦♦♦

Exemplo 2.4. Massa específica e volume específico

Sabendo-se que a 20°C e pressão atmosférica a massa de 998,234 kg de água ocupa o volume de 1 m^3, calcule a massa específica e o volume específico da água nestas condições.

Solução:

$$\rho_{20°C} = \left(\frac{998{,}234\ \text{kg}}{1\ \text{m}^3}\right) = 998{,}234\ \text{kg/m}^3$$

$$v_{20°C} = \left(\frac{1\ \text{m}^3}{998{,}234\ \text{kg}}\right)\left(\frac{1000\ \ell}{\text{m}^3}\right) = 1{,}001\,77\ \ell/\text{kg}$$

♦♦♦

IV- *Volume molar (V_m)*

Uma dada amostra de uma substância ocupa um volume ***V*** e possui uma certa quantidade de matéria ***N***. A relação entre o volume e a quantidade de matéria equivalente da substância tem o nome de volume molar (V_m).

Esta grandeza, embora possa ser aplicada para líquidos e gases, ela é mais usual e conhecida para os gases, onde condições padrão de temperatura e pressão são usadas para defini-lo. No capítulo 3, voltaremos a abordar esta grandeza com mais detalhes.

Exemplo 2.5. Uso do volume molar

Se o volume específico da água a 20°C e pressão atmosférica é 1,001 77 ℓ/kg, calcule o volume molar da água nestas mesmas condições.

Solução:

$$V_m = \left(\frac{1{,}001\,77\ \ell}{\text{kg}}\right)\left(\frac{18{,}016\ \text{kg}}{1\text{kmol}}\right) = 18{,}048\ \ell/\text{kmol}$$

[6] De acordo com a Norma ISO 31, o adjetivo "mássico" ou "específico" é adicionado ao nome de uma grandeza para indicar o quociente dessa grandeza pela massa. É recomendado usar massa volumétrica (massa por volume) ao invés de massa específica. No entanto, adotamos massa específica pois este é o termo adotado na Resolução CONMETRO nº 12/88.

V- *Vazão ou taxa*[7] *de escoamento*

Os processos contínuos envolvem o escoamento de material de um ponto para outro, entre unidades de processo ou entre um processo e tanques de armazenamento e vice-versa. A taxa na qual uma quantidade de material é transportada através de uma tubulação de processo é a taxa de escoamento ou vazão do material, ou seja, uma quantidade por unidade de tempo. A quantidade de uma corrente de processo que é transportada ou escoada através da tubulação pode ser expressa em volume, massa ou quantidade de matéria, dando origem à ***vazão volumétrica*** (volume por tempo), à ***vazão mássica*** (massa por tempo) ou à ***vazão de quantidade de matéria ou molar*** (quantidade de matéria por tempo). Embora, o termo taxa possa ser usado, o termo vazão é mais usual na engenharia química.

Na tabela do Quadro Geral de Unidades de Medida publicado pelo INMETRO, que relaciona as unidades derivadas compreendidas no SI, consta apenas a grandeza ***vazão***, que corresponde unicamente ao que chamamos de vazão volumétrica. Nenhuma referência é feita na referida tabela para a taxa ou vazão de quantidade de matéria, usual na engenharia química. Quanto à taxa de transporte de massa, com unidades de kg/s, a tabela denomina esta grandeza como fluxo de massa. No entanto, na engenharia química, é tradicional usar o termo taxa como definido no parágrafo acima e o termo fluxo, como veremos na seção seguinte, como a razão entre a taxa e a área da seção transversal ao escoamento do material. Neste livro, preferimos não adotar os termos constantes na mencionada tabela.

Considere um fluido (gás ou líquido) escoando em uma tubulação de seção transversal constante, como mostrada na figura 2.1, onde a área da elipse representa a seção perpendicular à direção do escoamento (seção transversal).

Se a vazão volumétrica do fluido na dada seção transversal é q m^3/s, haverá uma correspondente vazão mássica w kg/s e uma vazão molar n kmol/s escoando na tubulação. Estas vazões não são independentes, pois estão relacionadas entre si através das respectivas massa específica, ρ kg/m^3, massa molar, M kg/kmol ou o volume molar, V_m m^3/kmol, do fluido em consideração.

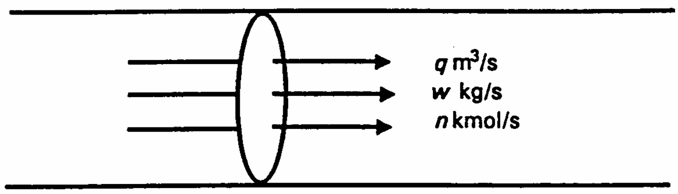


Figura 2.1. Conceito de vazão

As vazões mássica e molar das correntes de processo devem ser conhecidas para muitos cálculos de engenharia química, principalmente para se fazer balanço de massa e energia nos processos. De uma forma geral, estas vazões são calculadas a partir da medição da vazão volumétrica das correntes de processo e do uso da massa específica (para o cálculo da vazão mássica) e do volume molar ou da massa molar (para o cálculo da vazão molar) através das fórmulas:

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

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

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

[7] Por definição, taxa é a razão entre as variações de duas grandezas, das quais a primeira é dependente da segunda. Na engenharia, a grandeza independente é normalmente o tempo.

Exemplo 2.6. Relação entre vazões

Água a 20°C escoa em uma tubulação com a vazão volumétrica de 100,0 m^3/h, calcule as suas vazões mássica e molar.

Solução:

Do exemplo 2.4 temos que: $\rho_{20°C} = 998{,}234\ kg/m^3$

Logo:

$$w = q \times \rho_{20°C} = \left(\frac{100{,}0\ m^3}{h}\right)\left(\frac{998{,}234\ kg}{m^3}\right) = 99\ 823{,}4\ kg/h = 99{,}82\ Mg/h$$

$$n = w/M = (99\ 823{,}4\ kg/h)/(18{,}016\ kg/kmol) = 5\,540{,}8\ kmol/h = 5{,}541\ Mmol/h$$

VI- *Fluxo de material*

Na engenharia química, é comum expressar as vazões (ou taxas de escoamento) por unidade de área perpendicular ao escoamento. A essa razão se dá o nome de fluxo. Assim, teremos o ***fluxo volumétrico***, ***fluxo mássico*** e ***fluxo molar do fluido***.

Fluxo = Taxa ou vazão por área transversal

$$\text{Fluxo volumétrico} = \frac{\text{vazão volumétrica}}{\text{área transversal}} = \frac{q\ m^3/s}{A\ m^2} = u\ m/s$$

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

$$\text{Fluxo mássico} = \frac{\text{vazão mássica}}{\text{área transversal}} = \frac{w\ kg/s}{A\ m^2} = G\ kg/(s.m^2)$$

Por analogia ao fluxo volumétrico (velocidade), se usa também o nome de velocidade mássica do fluido (G).

$$\text{Fluxo molar} = \frac{\text{vazão molar}}{\text{área transversal}} = \frac{n\ kmol/s}{A\ m^2} = G_m\ kmol/(s.m^2)$$

Analogamente, poder-se-ia chamar o fluxo molar de velocidade molar (G_m), embora não seja usual.

Quando se estiver tratando de energia, teremos o fluxo de energia, que corresponde à taxa de energia dividida pela área de troca de energia, que terá as unidades de J/(s.m^2) ou W/ m^2 (ver tabela 2.5).

♦♦♦

Exemplo 2.7. Relação entre os fluxos de material

Se no exemplo 2.6 a área transversal da tubulação for 0,020 m^2, calcule os fluxos: volumétrico (velocidade média), mássico e molar da corrente de água.

Solução:

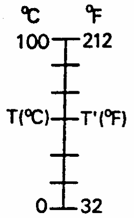
$$u = \frac{q}{A} = \frac{100\ m^3/h}{0{,}020\ m^2} = \frac{5\ 000\ m}{h}\left(\frac{h}{3600s}\right) = 1{,}4\ m/s$$

$$G = \frac{w}{A} = \left(\frac{99\ 823{,}4\ \text{kg}}{\text{h}}\right)\left(\frac{\text{h}}{3\ 600\,\text{s}}\right)\left(\frac{1}{0{,}020\ \text{m}^2}\right) = 1\ 386{,}4\ \text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2) = 1{,}4\,\text{Mg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$$

$$G_m = \frac{n}{A} = \left(\frac{5\ 540{,}8\ \text{kmol}}{\text{h}}\right)\left(\frac{\text{h}}{3\ 600\,\text{s}}\right)\left(\frac{1}{0{,}020\ \text{m}^2}\right) = 76{,}96\ \text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2) = 77\,\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$$

VII- Temperatura (T)

É uma medida quantitativa do grau de aquecimento de um ambiente, de uma substância etc. Esse grau de aquecimento é determinado indiretamente pela medição de alguma propriedade física de uma substância, cujo valor depende da temperatura de uma maneira conhecida. A forma mais conhecida usa o princípio da dilatação de um volume de uma massa fixa de um fluido, dito termométrico (normalmente o mercúrio), encapsulado em um bulbo de vidro. Entre outros tipos usados industrialmente, cita-se o termômetro de resistência (baseado na alteração da resistência elétrica de um condutor com a temperatura), o termopar (baseado na geração de uma diferença de tensão criada pela junção de dois metais diferentes em função da temperatura) e o pirômetro (baseado na emissão de energia radiante de um dado material quando exposto a alta temperatura). A temperatura usada no dia-a-dia é medida através de ***escalas relativas*** baseadas em pontos fixados arbitrariamente. Os pontos usuais são o ponto de fusão do gelo e o ponto de ebulição da água, na pressão de 1 atmosfera, aos quais são atribuídos determinados valores de acordo com a escala. A escala Celsius e a escala Fahrenheit são baseadas nos mesmos pontos, mas a eles são atribuídos valores diferentes.



- 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.

A conversão entre as escalas é facilmente realizada usando-se a regra das proporções relativas ao comprimento percorrido pelo fluido termométrico no bulbo de vidro:

$$\frac{T(^\circ C) - 0}{100 - 0} = \frac{T'(^\circ F) - 32}{212 - 32} \quad \therefore \quad \frac{T(^\circ C)}{100} = \frac{T'(^\circ F) - 32}{180} \quad \therefore \quad T(^\circ C) = \frac{T'(^\circ F) - 32}{1{,}8}$$

As unidades de temperatura termodinâmica baseadas nas escalas anteriores são a unidade kelvin (símbolo K — sem o símbolo de grau °) e a unidade rankine (símbolo R). Ambas as temperaturas são definidas em função do valor da temperatura zero absoluto. A temperatura kelvin é baseada na escala graus Celsius, ou seja, usa a mesma divisão centesimal, enquanto a temperatura rankine é baseada na escala graus Fahrenheit, ou seja, baseia-se na divisão em 180 intervalos iguais. Assim, a temperatura zero absoluto corresponde a:

$$0\,K = 0\,R = -273{,}15^\circ C = -459{,}67^\circ F$$

A relação entre estas diversas escalas de temperatura é dada pelas equações abaixo:

$$T'(^\circ F) = 1{,}8T(^\circ C) + 32 \qquad T'(R) = T(^\circ F) + 459{,}67$$

$$T'(^\circ F) = 1{,}8T(K) - 459{,}67 \qquad T'(R) = 1{,}8T(K)$$

$$T'(K) = T(^\circ C) + 273{,}15 \qquad T'(R) = 1{,}8T(^\circ C) + 491{,}67$$

No desenvolvimento das equações acima usou-se o fato de a variação de 100°C ser igual à variação de 180°F, ou seja: $\Delta 100°C = \Delta 180°F$, ou $\Delta°C = 1{,}8\ \Delta°F$. Identidades semelhantes podem ser obtidas entre as demais escalas de temperatura, como mostrado a seguir:

$$\Delta K = 1{,}8\Delta R\ ;\ \Delta\ °C = 1{,}8\Delta°F\ ;\ \Delta K = \Delta°C\ ;$$
$$\Delta R = \Delta°F\ \ ;\ \Delta K = 1{,}8\Delta°F\ ;\ \Delta°C = 1{,}8\Delta°F \qquad \text{Eq. 2.15}$$

Note que estas relações 2.15 não são equações e sim identidades ou fatores de conversão de diferença de temperaturas, onde o Δ representa a diferença e não o símbolo de nenhuma grandeza. Na engenharia química, as grandezas que envolvem a transferência de calor são baseadas na diferença de temperaturas. No entanto, ao se escreverem as unidades, o símbolo Δ não é escrito normalmente. Portanto, quando se fizer a conversão de unidades, deve-se levar isto em conta, pois está implícito no uso das unidades da grandeza que se está lidando com a diferença de temperaturas ao invés da temperatura.

♦♦♦

Exemplo 2.8. Relação entre temperaturas

A temperatura estimada na superfície do Sol é de 10 500 R. Calcule o valor em graus Celsius.

Solução:

$$T(R) = 1{,}8T(°C) + 491{,}67\ \therefore\ T(°C) = \frac{T(R) - 491{,}67}{1{,}8} = \frac{10\,500 - 491{,}67}{1{,}8} = 5\,560°C$$

Exemplo 2.9. Relação entre variações de temperatura

Em um determinado dia, a temperatura variou de 18°C a 33°C. De quanto foi esta variação na escala Fahrenheit?

Solução:

Variação da temperatura: 33 − 18 = 15°C $\quad \Delta°F = 15°C\left(\dfrac{1{,}8\Delta°F}{\Delta°C}\right) = 27°F$

♦♦♦

Note que no exemplo 2.9 foi usado o fator de conversão correspondente à variação de temperatura. No entanto, no exemplo 2.8 foi usada a equação de conversão de escalas de temperatura. A não observação desta diferença entre as aplicações é causa de erro ao se fazerem conversões de unidades. Na seção 2.6.2.1, mostramos através do exemplo 2.24 o uso dos fatores de conversão e da equação.

VIII- Pressão (p)

VIII- 1. Pressão de fluido e pressão hidrostática

A pressão é a razão entre a força e a área sobre a qual a força atua. Consequentemente, as unidades de pressão são as unidades de força divididas pelas unidades de área, ou seja:

$$p = \frac{F}{A} \therefore [p] = \frac{[F]}{[A]}$$

Se o sistema de unidades é o absoluto como o SI, vem:

$$p = \frac{F}{A} \therefore [p] = \frac{[F]}{[A]} = \frac{[ma]}{[A]} = \frac{\mathrm{MLT^{-2}}}{\mathrm{L^2}} = \mathrm{L^{-1}MT^{-2}}$$

$$\text{No SI}: [p] = \mathrm{kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}} = \mathrm{N \cdot m^{-2}} = \mathrm{Pa}$$

Se o sistema é o de engenharia, vem:

$$p = \frac{F}{A} \therefore [p] = \frac{[F]}{[A]} = \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{L^2}}$$

$$\text{No MKK}_f\text{S}: [p] = \mathrm{kgf/m^2} \quad \text{e no FPP}_f\text{S}: [p] = \mathrm{lbf/ft^2}$$

Usualmente, nestes sistemas de engenharia a unidade de área é o cm^2 (in^2 no sistema inglês) e, as unidades de pressão equivalentes são kgf/cm^2 e lbf/in^2 (normalmente grafada como psi).

Consideremos um fluido contido em um vaso fechado ou escoando através de uma tubulação e vamos supor que seja feito um furo de área *A* na parede do vaso obstruído por um tampão, como mostrado nas figuras 2.2a e 2.2b.

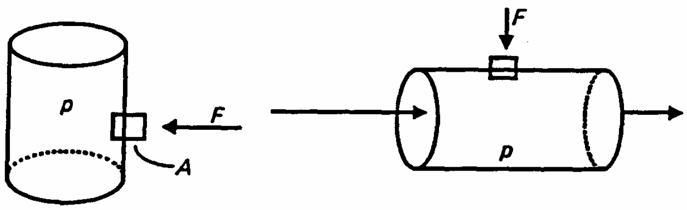


Figura 2.2a. e 2.2b. Pressão de fluido em um vaso ou em uma tubulação

A pressão do fluido pode ser definida como a razão *F/A*, onde *F* é a mínima força que deve ser exercida sobre o tampão no furo para evitar a fuga do fluido pelo furo. Tanto no vaso fechado como na tubulação, a pressão em consideração é a pressão real no interior dos equipamentos que vai governar a força *F*. Esta pressão é a que chamamos de pressão absoluta do fluido.

Vamos introduzir uma definição adicional de pressão de fluido para entendermos o conceito de pressão atmosférica e as formas de medir pressão de fluidos em vasos e em tubulações. Vamos supor uma coluna de fluido de h metros de altura e área da seção transversal igual a A m^2. Vamos considerar que o fluido tem a massa específica de ρ kg/m^3 e que a pressão p_0 pascals é exercida sobre a superfície superior da coluna.

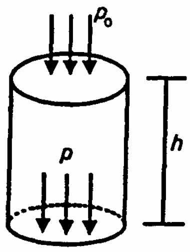


Figura 2.3. Pressão na base de uma coluna de fluido

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 da coluna de fluido na coluna. Logo:

$$F = F_0 + F_{peso} = F_0 + mg$$

Dividindo toda a equação pela área da seção transversal A da coluna, vem:

$$\frac{F}{A} = \frac{F_0}{A} + \frac{mg}{A} \quad \therefore \quad p = p_0 + \frac{mg}{A} = p_0 + \frac{mgh}{Ah}$$

Como o produto Ah corresponde ao volume do fluido na coluna, vem:

$$p = p_0 + \frac{mgh}{Ah} = p_0 + \frac{mgh}{V} = p_0 + \rho gh$$

Como a área A da seção transversal não aparece na equação, a fórmula se aplica tanto a uma coluna tão fina quanto a de uma proveta ou tão larga quanto um oceano, isto é, a pressão hidrostática do fluido não depende da forma do recipiente onde o fluido está contido. De acordo com a equação acima, 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, isto é:

$$p = \rho gh = \rho_{H_2O} g h_{H_2O} = \rho_{Hg} g h_{Hg} \quad \therefore \quad \frac{h}{h_{H_2O}} = \frac{\rho_{H_2O}}{\rho} \quad \text{ou} \quad \frac{h}{h_{Hg}} = \frac{\rho_{Hg}}{\rho}$$

♦♦♦

Exemplo 2.10. Cálculo de pressão como altura de coluna de mercúrio

Expresse a pressão de 101 325 Pa em termos de coluna de mercúrio a 0°C, em um local onde a aceleração da gravidade é o padrão, sabendo-se que a massa específica do mercúrio é 13 595 kg/m^3 a 0°C.

Solução:

$$h_{Hg} = \frac{p}{\rho_{Hg} g} = \frac{101325\ \text{N/m}^2}{(13\ 595\ \text{kg/m}^3)(9{,}806\ 65\ \text{m/s}^2)} = \frac{0{,}760\ \text{N}\cdot\text{m}}{\underbrace{\text{kg}\cdot\text{m/s}^2}_{\text{N}}} = 0{,}760\ \text{m de mercúrio}$$

$\therefore\ h_{Hg} = 760$ mmHg a 0°C[8]

Exemplo 2.11. Cálculo de pressão como altura de coluna de água

Expresse a mesma pressão do exemplo anterior em termos de coluna de água a 4°C, sabendo-se que a massa específica da água a 4°C é 1 000 kg/m³.

Solução:

$$h_{H_2O} = \frac{p}{\rho_{H_2O}\, g} = \frac{101\ 325\ \mathrm{N/m^2}}{\left(1\ 000\ \mathrm{kg/m^3}\right)\left(9{,}806\ 65\mathrm{m/s^2}\right)} = \frac{10{,}332\ \mathrm{N \cdot m}}{\underbrace{\mathrm{kg \cdot m/s^2}}_{\mathrm{N}}} = 10{,}332\ \mathrm{m\ de\ água}$$

$$\therefore \quad h_{H_2O} = 10{,}332\ \mathrm{mH_2O\ a\ 4°C}$$[8]

ou de acordo com a equação 2.23:

$$h_{H_2O} = h_{Hg}\frac{\rho_{Hg}}{\rho_{H_2O}} = 0{,}760\ \mathrm{m}\frac{13\ 595\ \mathrm{kg/m^3}}{1\ 000\ \mathrm{kg/m^3}} = 10{,}332\ \mathrm{mH_2O\ a\ 4°C}$$

♦♦♦

VIII- 2. Pressão atmosférica, pressão absoluta e pressão manométrica

A pressão exercida pela atmosfera pode ser imaginada como a pressão na base de uma coluna de fluido (o ar) localizada no ponto de medição. A pressão p_0 no topo da coluna é igual a zero e a massa específica ρ e a aceleração da gravidade g são os valores médios entre o topo da atmosfera e o ponto de medição.

Não se deve confundir atmosfera-padrão com pressão atmosférica. A atmosfera- padrão é definida como a pressão (em um campo gravitacional padrão) equivalente a 760 mmHg a 0°C ou outro valor equivalente, enquanto a pressão atmosférica é variável e deve ser medida pelo barômetro. A atmosfera-padrão pode realmente não existir em nenhum lugar do mundo, exceto ao nível do mar em certos dias; porém, é extremamente útil para conversão entre unidades de pressão.

A atmosfera-padrão expressa em várias unidades usuais é igual a:

Unidade	atm	Pa	mmHg	mH_2O	psi	inHg	kgf/cm²
Valor	1,000	101 325	760	10,332	14,696	29,92	1,033

A pressão atmosférica local depende da altura do ponto de medição, da temperatura ambiente e das condições climáticas. Por isto, mesmo em um dado local, ela varia ao longo do dia e com a época do ano. O instrumento usado para a medição da pressão atmosférica é o ***barômetro*** e a leitura desta medição é conhecida como pressão barométrica. Um barômetro pode ser um dispositivo como indicado na figura 2.4, onde um tubo fino de vidro graduado, completamente cheio de mercúrio, é emborcado no interior de uma cuba, também contendo mercúrio, com cuidado de não entrar ar no tubo. 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.

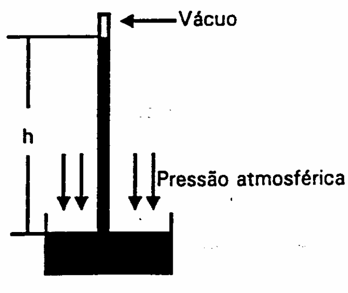


Figura 2.4. Barômetro

[8] Estas representações de unidades de pressão ferem as regras SI. No entanto, estamos mantendo neste texto porque elas ainda encontram-se disseminadas.

Se no Rio de Janeiro, em um determinado dia, ao nível do mar, a pressão barométrica se situa ao redor de 101 325 Pa (760 mmHg), em Belo Horizonte, que fica em local mais alto, a pressão barométrica deve oscilar ao redor de 91 000 Pa (690 mmHg).

A pressão, como a temperatura, pode ser expressa tanto por escala absoluta como relativa. A pressão é medida por um aparelho conhecido como manômetro. Por exemplo, pode ser utilizado um manômetro com extremidade aberta para a pressão atmosférica (figura 2.5a) ou por um manômetro com extremidade fechada, onde foi criado um vácuo total, ou sem contrapressão (figura 2.5b).

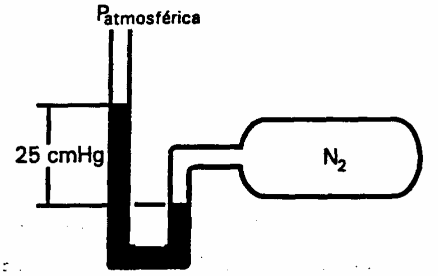


Figura 2.5a. Manômetro de pressão relativa

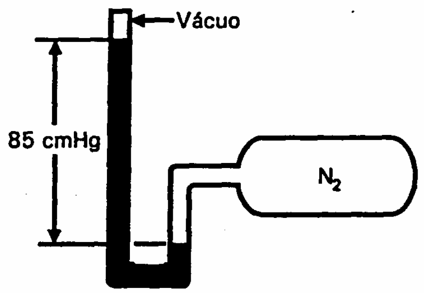


Figura 2.5b. Manômetro de pressão absoluta

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 absoluta corresponde ao vácuo perfeito, enquanto o ponto zero para uma escala de pressão relativa depende da pressão atmosférica local (pressão barométrica). A pressão relativa lida pelo manômetro é conhecida como pressão manométrica e é inferior ao valor da pressão absoluta; a diferença entre elas é a pressão barométrica.

Pressão absoluta = Pressão manométrica + Pressão barométrica

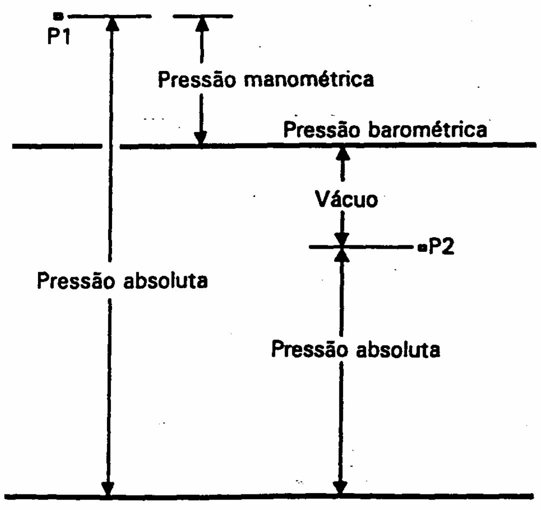


Figura 2.6. Relação entre as pressões

Ao se trabalhar com as unidades inglesas de pressão, libra-força por polegada quadrada, lbf/in^2(psi), para se diferenciar a pressão absoluta da manométrica se usa os sufixos ***a*** e ***g***. Assim, a unidade passa para ***psia*** (pressão absoluta) e ***psig*** (manométrica). Quando se usa o SI, isto não é permitido, pois de acordo com as regras para a grafia dos símbolos das unidades (ver 2.1.1.1c), os símbolos não podem ser alterados. Portanto, deve-se empregar pressão absoluta de x Pa ou pressão manométrica de y Pa, por exemplo.

Quando a pressão absoluta é inferior à pressão atmosférica, é comum usar a expressão ***vácuo***, que mede quanto a pressão absoluta é inferior à pressão barométrica (ponto P_2 na figura 2.6).

Exemplo 2.12. Pressão absoluta e pressão manométrica

Um manômetro calibrado para unidades inglesas acusa a pressão de 34,2 psig. Calcule a pressão absoluta em quilopascal em um local onde a pressão barométrica é 98,1 kPa.

Solução:

$$p_{man} = 34{,}2\ \text{psi}\left(\frac{101{,}325\ \text{kPa}}{14{,}696\ \text{psi}}\right) = 235\ \text{kPa}$$

$$p_{abs} = p_{man} + p_{barom} = 235 + 98{,}1 = 333\ \text{kPa}$$

♦♦♦

Exemplo 2.13. Pressão absoluta e vácuo

Em um dado equipamento, o manômetro acusa um vácuo de 608 mmHg em um local onde a pressão barométrica é 100,24 kPa. Calcule a pressão absoluta que opera o equipamento.

Solução:

$$\text{vácuo} = (608\ \text{mmHg})\left(\frac{101{,}325\ \text{kPa}}{760\ \text{mmHg}}\right) = 81{,}1\ \text{kPa}$$

$$p_{abs} = p_{barom} - \text{vácuo} = 100{,}24 - 81{,}1 = 19{,}1\ \text{kPa}$$

IX- *Viscosidade absoluta (μ) e viscosidade cinemática (ν)*

A viscosidade é a propriedade que determina o grau da 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 ou dutos. A lei da viscosidade de Newton diz que 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, pode-se escrever:

$$\tau = \frac{F}{A}\ \alpha\ \frac{du}{dy}$$

Os fluidos que seguem esta lei são chamados de fluidos newtonianos.

A introdução da constante de proporcionalidade na lei de Newton leva ao resultado:

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu\ \frac{du}{dy},$$

onde a constante de proporcionalidade tem como símbolo a letra grega μ (pronúncia *mi*) e é chamada de viscosidade absoluta (ou dinâmica). Esta viscosidade é dependente da temperatura do fluido e é praticamente independente da pressão.

Se o sistema de unidades é absoluto, como o SI, as unidades da viscosidade são:

$$[\mu] = \frac{[\tau]}{\left[\frac{du}{dy}\right]} = \frac{\left[\frac{F}{A}\right]}{\left[\frac{du}{dy}\right]} = \frac{\frac{ML}{T^2L^2}}{\frac{L}{TL}} = \frac{M}{LT} = L^{-1}MT^{-1}$$

$$\text{No SI: } [\mu] = \frac{kg}{m \cdot s} = Pa \cdot s$$

Se o sistema de unidades é o de engenharia, a lei de Newton deve incluir o fator g_c, para que as unidades da viscosidade dinâmica sejam as mesmas acima, ou seja, baseada na massa.

$$\tau g_c = \frac{F g_c}{A} = \mu \frac{du}{dy}$$

Podemos reescrever a equação anterior, passando o g_c para o segundo membro, onde μ aparecerá dividido por g_c, o que chamaremos de μ', e que representa a viscosidade do fluido em unidades baseada na unidade de força.

$$\tau = \frac{\mu}{g_c}\frac{du}{dy} = \mu'\frac{du}{dy} \qquad \text{Eq. 2.34}$$

As unidades de μ' serão:

$$[\mu'] = \frac{[\mu]}{[g_c]} = \frac{\dfrac{M}{LT}}{\dfrac{ML}{T^2F}} = \frac{FT}{L^2}\,;\ [\mu'] = \frac{kgf \cdot s}{m^2} \text{ ou } \frac{lbf \cdot s}{ft^2}$$

Podemos também encontrar as unidades de μ' através da equação 2.34, onde as unidades de μ' deverão ser tais que as dimensões e unidades de ambos os lados da equação sejam as mesmas, isto é:

$$[\mu'] = \frac{[\tau]}{\left[\dfrac{du}{dy}\right]} = \frac{\left[\dfrac{F}{A}\right]}{\left[\dfrac{du}{dy}\right]} = \frac{\dfrac{F}{L^2}}{\dfrac{L}{TL}} = \frac{FT}{L^2}\,;\ [\mu'] = \frac{kgf \cdot s}{m^2} \text{ ou } \frac{lbf \cdot s}{ft^2}$$

Ainda hoje a viscosidade absoluta é indevidamente expressa em unidades do antigo CGS, o poise, símbolo P, e o seu submúltiplo, centipoise, cujo símbolo é cP. Para esse sistema, as unidades equivalentes ao poise são:

$$[\mu] = \frac{g}{cm \cdot s} = P$$

A viscosidade cinemática tem como símbolo a letra grega ν (pronúncia ***ni***) e é definida como a relação entre a viscosidade absoluta (μ) e a massa específica do fluido (ρ), ambas à mesma temperatura e pressão. Ela foi criada para a determinação da viscosidade em viscosímetros-padrão industriais.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \ \therefore\ [\nu] = \frac{[\mu]}{[\rho]} = \frac{ML^{-1}T^{-1}}{ML^{-3}} = L^2T^{-1} = \frac{L^2}{T}$$

No SI, as unidades da viscosidade cinemática são: m^2/s. Da mesma forma que o poise, ainda se encontra a viscosidade cinemática expressa no sistema CGS, cuja unidade é o stokes, símbolo St (equivalente a cm^2/s), ou seu submúltiplo, o centistokes, símbolo cSt.

X- Energia térmica ou calor (Q)

A energia térmica é uma forma de energia que é transferida de um corpo para outro (ou de um sistema para a vizinhança) devido unicamente à diferença de temperaturas existente entre eles e, por ser uma forma de energia, é claro que a sua unidade será a unidade de energia do sistema de unidades, que no caso do SI é o joule (J).

No entanto, ainda hoje é usada a *caloria,* que é um vestígio das teorias antigas sobre o calor, teorias essas consideradas totalmente errôneas. A sua origem remonta à época em que ainda não se sabia que calor é energia, pensando-se que era uma espécie de fluido, desprovido de massa, e cuja quantidade era proporcional à temperatura do corpo no qual estava contido.

De acordo com as recomendações do SI, a caloria é uma unidade a ser evitada, bem como a sua equivalente nas unidades inglesas, a unidade térmica britânica, ou seja, a ***british thermal unit*** (btu). Existe mais de um tipo de ambas as unidades, caloria e btu, dependendo da definição usada. Por exemplo, o tipo de caloria encontrado nas tabelas de propriedades termodinâmicas das substâncias é a chamada caloria termoquímica (igual a 4,184 J), enquanto que na Tabela Internacional de Vapor de Água é usada a caloria T.I. (igual a 4,1868 J). Nós usaremos neste livro este segundo tipo de caloria, a da Tabela Internacional de Vapor de Água.

A caloria pode ser definida como a quantidade de calor (energia) necessária para elevar a temperatura de 1g de água pura, sob pressão normal (atmosfera-padrão), de 14,5 a 15,5°C. Nesta definição está embutida uma grandeza conhecida como capacidade calorífica que por definição é a quantidade de calor (Q) necessária para produzir uma certa diferença de temperatura (ΔT) em uma dada substância. Se o calor é transferido para a água sem variação da pressão, a capacidade calorífica é designada pelo símbolo C_p, em que o índice p é usado para indicar pressão constante. Analogamente, definindo-se que o calor é transferido para a água sem variação do volume, à capacidade calorífica seria atribuída o símbolo C_V, em que o índice V indica volume constante. No capítulo 5, voltaremos ao assunto.

$$C_p(\text{ou}\, C_V) = \frac{Q}{\Delta T} \quad \therefore \quad [C_p \,\text{ou}\, C_V] = \frac{[\text{energia}]}{[\Delta\text{temperatura}]} \qquad \text{Eq. 2.51a}$$

O termo capacidade calorífica específica (ou mássica)[10] é empregado para designar a capacidade calorífica dividida pela massa da substância, com o símbolo c_p ou c_V.

$$c_p = \frac{C_p}{m} \quad \text{ou} \quad c_V = \frac{C_V}{m} \qquad \text{Eq. 2.51b}$$

Muitas vezes, a capacidade calorífica é definida em função da quantidade de matéria ao invés da massa; nestes casos, ela é chamada de capacidade calorífica molar com os símbolos c_{pm} ou c_{Vm}:

$$c_{pm} = \frac{C_p}{N} \quad \text{ou} \quad c_{Vm} = \frac{C_V}{N} \qquad \text{Eq. 2.51c}$$

Como na definição de caloria, a água foi tomada como substância padrão, a capacidade calorífica específica da água possui o valor unitário, ou seja, a capacidade calorífica específica da água pura é igual a 1,0 cal/(g.°C) ou 1,0 kcal/(kg.°C). A temperaturas diferentes de 14,5°C, o calor específico da água será diferente, pois esta grandeza varia com a temperatura.

---

[10] O termo calor específico empregado para esta grandeza não deve ser mais usado.

Analogamente, a unidade térmica britânica pode ser definida como a energia necessária para elevar a temperatura de 1,0 lb de água pura, sob pressão normal, de 59 a 60°F. Da mesma forma que para a caloria, a capacidade calorífica específica da água relativa a estas unidades é igual a 1,0 btu/(lb.°F).

Pelas informações acima, a capacidade calorífica específica da água tem o valor 1,0 em ambos os conjuntos de unidades, logo:

$$\frac{1{,}0\ \text{kcal}}{\text{kg}\cdot{}^{\circ}\text{C}} = \frac{1{,}0\ \text{btu}}{\text{lb}\cdot{}^{\circ}\text{F}} = \frac{4{,}1868\ \text{kJ}}{\text{kg}\cdot{}^{\circ}\text{C}} \qquad \text{Eq. 2.52}$$

♦♦♦

Exemplo 2.19. Fator de conversão

Ache o fator de conversão de kcal/kg para btu/lb, a partir dos fatores de conversão da equação 2.52.

Solução:

$$\frac{1{,}0\ \text{kcal}}{\text{kg}\cdot{}^{\circ}\text{C}} = \frac{1{,}0\ \text{btu}}{\text{lb}\cdot{}^{\circ}\text{F}} \quad \therefore \quad \frac{1{,}0\ \text{kcal}}{\text{kg}} = \frac{1{,}0\ \text{btu}}{\text{lb}}\frac{{}^{\circ}\text{C}}{{}^{\circ}\text{F}} = \frac{1{,}0\ \text{btu}}{\text{lb}}\frac{{}^{\circ}\text{C}}{{}^{\circ}\text{F}}\left(\frac{1{,}8\ \Delta{}^{\circ}\text{F}}{\Delta{}^{\circ}\text{C}}\right) = \frac{1{,}8\ \text{btu}}{\text{lb}}$$