

UNIDADE I - PROPRIEDADES FÍSICAS DOS FLUIDOS

1.1 - Introdução

Fenômenos de Transporte estuda o transporte de quantidade de movimento (ou momentum), transporte de calor e transporte de massa e tem como objeto de estudo os mecanismos governantes básicos para a transferência de grandezas físicas entre dois pontos do espaço (leis fundamentais), por intermédio de modelos matemáticos adequados.

As leis básicas são relativas à: transferência de massa; transferência de energia; transferência de quantidade de movimento. Para tal, em Fenômenos de Transporte são estudados elementos de Termodinâmica e de Mecânica dos Fluidos.

A Termodinâmica é o ramo das ciências físicas que trata de diversos fenômenos da energia e das propriedades da matéria relacionadas à mesma, especialmente das leis de transferência do calor em outras formas de energia e vice-versa.

O conhecimento e entendimento dos princípios e conceitos básicos da Mecânica dos Fluidos são essenciais na análise e projeto de qualquer sistema no qual um fluido é o meio atuante.

Alguns exemplos que poderiam ser citados de principais aplicações dos Fenômenos de Transporte na Engenharia são: base ao estudo da hidráulica; esforços em obras hidráulicas; monitoramento hidrometeorológico; controle de poluentes nas águas continentais e marítimas; processos de tratamento de águas de abastecimento e residuárias; movimento dos fluidos; hidrodinâmica; máquinas térmicas; máquinas hidráulicas.

1.2 - Definição de Propriedades Termodinâmicas

Uma propriedade termodinâmica é definida como sendo qualquer grandeza que depende do estado do sistema e é independente da trajetória pela qual o sistema chegou naquele dado estado.

1.3 - Estado

A condição ou estado de uma substância de trabalho fica definida por duas propriedades termodinâmicas, marcando-se o chamado *ponto de estado*.

O estado pode ser identificado pelas propriedades termodinâmicas, como por exemplo, pressão, temperatura, volume.

Cada uma das propriedades de uma substância em um dado estado tem somente um valor bem definido e esta propriedade tem sempre o mesmo valor para um dado estado, independentemente da maneira pela qual a substância chegou àquele estado.

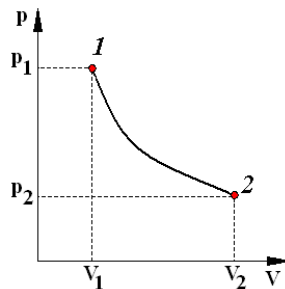


Figura 1.1 - Estados 1 e 2 de uma substância, definindo uma propriedade.

Uma massa de água pode existir na natureza sob várias formas. Se inicialmente ela está na forma líquida, por aquecimento poderá tornar-se vapor ou por resfriamento, sólida. Em cada uma das três fases a água pode existir em várias pressões e temperaturas, ou seja, vários estados.

Por exemplo: o chamado ponto tríplice da água é a situação quando coexistem as três fases.

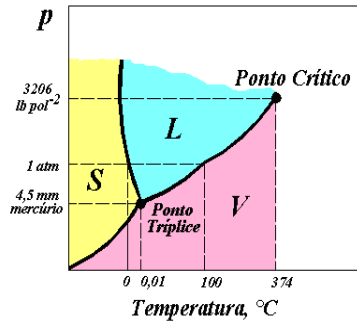


Figura 1.2 - Ponto tríplice da água

O ponto tríplice da água é um conhecimento útil na calibração de equipamentos, na indústria de alimentos para a liofilização (morangos, camarões, etc.); na indústria farmacêutica (penicilina, etc.), só para citar exemplos. A água contida no produto é congelada e passa diretamente ao estado gasoso por sublimação, em câmaras de alto vácuo (pressão < 4,7mm Hg e temperatura < 0°C).

As substâncias mudam de fases e estas mudanças recebem denominações especiais.

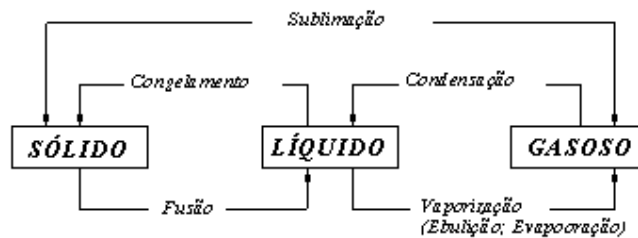


Figura 1.3 - Esquema das mudanças de estado físico (fases)

São bem conhecidos os três estados da matéria: sólido, líquido e gasoso. Porém, já são conhecidos o quarto e o quinto estados. O quarto estado já identificado pela ciência desde a década de 50 é o plasma, que é um gás ionizado, extraordinariamente quente, rarefeito e altamente energizado, cujos átomos se separam em partículas positivas e negativas. Esta mistura de partículas livres pode ser controlada por campos elétricos e magnéticos, diferentemente de um simples gás, que possui átomos inteiros e tem temperatura mais baixa. O termo plasma foi usado em 1928. Por exemplo, o Sol é uma bola de plasma, ou seja, está além do estado gasoso, assim como qualquer outra estrela que constituem mais de 90% da matéria que compõe o universo se encontra no estado plasmático. A energia que chega até nós na forma de luz é um resultado das reações de fusão entre as partículas atômicas que ocorrem continuamente. O estado plasmático de uma substância gasosa também pode existir em temperaturas relativamente baixas, dependendo da composição, estrutura e grau de rarefação. A chama de uma vela, a luminescência de uma lâmpada de néon ou sódio, o arco elétrico, a descarga elétrica, o jato de fogo que sai do escapamento de um foguete, o rastro que deixa um relâmpago são alguns exemplos de ocorrências em que se tem contato com o estado plasmático. A física do plasma tornou-se um dos ramos mais destacados do progresso científico, estudada principalmente em relação à reação termonuclear, obtida na forma de um clarão instantâneo de plasma, aquecido até temperaturas de várias centenas de milhões de graus, durante a explosão da bomba de hidrogênio.

O quinto estado, definido em teoria em 1925 pelo físico alemão Albert Einstein, usando cálculos estatísticos do físico indiano Satyendra Nath Bose, dizia que a matéria poderia atingir um estado, em que ela se comportaria como a luz, foi comprovado em 1995 pelos cientistas americanos Eric Cornell e Carl Wieman e pelo alemão Wolfgang Ketterle, que dividiram o prêmio Nobel de 2001. O quinto estado foi obtido, em 1995, pelos americanos, mantendo 2.000 átomos de rubídio, um metal prateado, sem uso comercial, a 170 bilionésimos de grau acima de zero Kelvin, ou seja, quase zero absoluto (-273°C). Assim, foi como se os átomos se desmanchassem, porque deixaram de agir como partículas e adotaram o comportamento de uma onda luminosa. Não é que o átomo “vire” luz, mas seu movimento ondulatório, desordenado em temperaturas mais altas, adquire um comportamento de onda, com o resfriamento intenso

e a conseqüente lentidão dos movimentos, como se todos os átomos fossem apenas um, então, a onda cresce e se junta, formando um vagalhão, dando origem ao quinto estado da matéria, que devido a este comportamento é referido como “átomo gigante”. O mesmo resultado foi verificado pelo alemão, usando gases de átomos de sódio, resfriados também a quase zero absoluto. O quinto estado foi batizado de Condensado Bose-Einstein, mas muita coisa ainda não se sabe sobre ele. O estudo do condensado pode auxiliar na compreensão da supercondutividade, por exemplo. A comprovação do quinto estado (chamado condensado de Bose-Einstein) abre portas na ciência que ainda não se pode imaginar.

Em janeiro de 2004, cientistas americanos anunciaram a possível descoberta do sexto estado, referido como gás fermiônico. Apesar de ser altamente comprimido, sólido e resfriado a quase zero Kelvin, comporta-se como um superfluido, ou seja, um fluido sem viscosidade. A diferença entre o quinto e o sexto estado está no fato de que no quinto, prótons e elétrons agem da mesma maneira e no sexto são os átomos inteiros. A utilização prática desta descoberta seria através da supercondutividade e para o funcionamento de computadores.

1.4 - Substância de Trabalho

É o fluido capaz de armazenar energia e do qual se pode retirar essa energia. Exemplo: mistura ar-combustível em um motor; vapor d’água em uma turbina a vapor; ar em um compressor.

1.5 - Fluido

É qualquer tipo de matéria com pouca resistência à deformação, podendo ser líquido, gás ou vapor. Muitas vezes o fluido é a própria substância de trabalho. Substância que se deforma continuamente sob a ação de uma força tangencial (cisalhante), por menor que seja esta força. O fluido tem a propriedade de escoar.

Fluidos podem se apresentar como líquidos (água, gasolina), gás (ar, oxigênio, hidrogênio) ou como uma combinação de líquido e gás (vapor úmido).

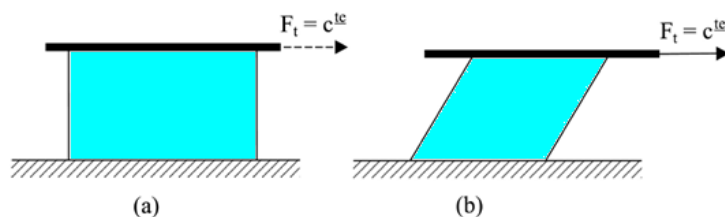


Figura 1.4 - Esquema simplificado do escoamento de um fluido em repouso e submetido a uma força tangencial

Os sólidos e os fluidos apresentam comportamentos diferentes quando submetidos a uma tensão cisalhante. Um sólido resiste à força externa sofrendo uma deformação definida de um ângulo Φ , característico, desde que não seja excedido o limite de elasticidade do material. Os fluidos se deformam contínua e indefinidamente enquanto existir essa tensão tangencial, pois o ângulo de deformação é função do tempo. Fluidos como a água, os óleos, o ar e outros são chamados de “Newtonianos” e são estudados pela Mecânica dos Fluidos Clássica. Fluidos tais como as pastas de dente, o alcatrão e outros, se comportam como sólidos quando submetidos a pequenas tensões de cisalhamento e como fluidos quando a tensão aplicada ultrapassa certo valor crítico. São estudados pela Reologia.

1.5.1 - Hipótese do Contínuo

Qualquer fluido é um aglomerado de moléculas cujo comportamento conjunto é decorrente de forças de atração, que dependem do estado do fluido. De um modo geral, essas forças são mais fracas nos gases e mais fortes nos líquidos. Existe uma dualidade nesse fato: o escoamento apresenta-se visualmente contínuo, mas na realidade, é descontínuo.

O conceito de meio contínuo é uma idealização da matéria, ou seja, é um modelo para o estudo de seu comportamento macroscópico, em que se considera uma distribuição contínua da massa.

A chamada “Hipótese do contínuo” é a suposição de que o fluido é contínuo. A conseqüência prática desta hipótese é a possibilidade de utilização das ferramentas do cálculo diferencial e integral na

modulação matemática dos escoamentos, porque permite generalizar as equações do movimento, podendo ser utilizadas indistintamente para gases e líquidos, uma vez que o meio é considerado contínuo.

O modelo do meio contínuo tem validade somente para um volume macroscópico no qual exista um número muito grande de partículas, de modo que as propriedades do fluido possam ser definidas em cada ponto do espaço, representando funções contínuas da posição e do tempo.

Em um volume com um número muito reduzido de moléculas produz uma descontinuidade no valor da propriedade, devido ao percurso médio das moléculas não poder ser representado por uma média estatística significativa, fazendo variar a propriedade em relação a cada ponto considerado. O comportamento das partículas dentro de um determinado volume é explicado pela Teoria Cinética dos Gases.

1.6 – Sistema

É uma porção do Universo que se deseja estudar. É uma região limitada por fronteiras especificadas, que podem ser imaginárias ou não, fixas ou móveis. O volume de controle delimita as fronteiras do sistema em estudo, normalmente apresenta-se como uma área pontilhada.

$$\text{Sistema} + \text{Vizinhança} = \text{Universo}$$

1.6.1 – Tipo de sistema

- fechado - é aquele que não apresenta troca de matéria com a vizinhança, ou seja, massa não cruza suas fronteiras;
- aberto - apresenta fluxo de massa através de suas fronteiras.

1.6.2 – Tipo de fronteira

- real - associada a uma superfície material (recipiente);
- imaginária - não associada.

1.6.3 – Fronteira quanto à mobilidade

- fronteira fixa
- fronteira móvel

Exemplo:

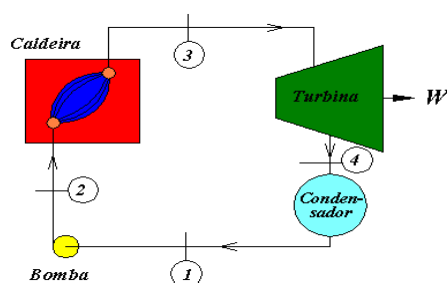


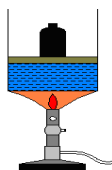
Figura 1.5 - Esquema simplificado de uma usina termelétrica

Considerando-se como um todo o sistema da Figura 1.5 é fechado; considerando-se um trecho da tubulação, por exemplo, 2-3, antes e depois da caldeira, o sistema é aberto.

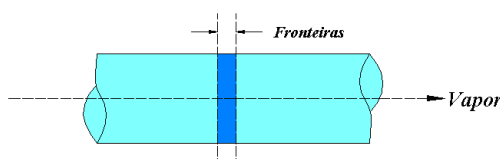
Exemplos de sistemas são apresentados na Figura 1.6.



a) êmbolo fixo \Rightarrow sistema fechado com fronteiras fixas



b) êmbolo móvel \Rightarrow sistema fechado com fronteiras móveis, sem troca de massa



c) tubulação \Rightarrow o vapor cruza as fronteiras do sistema, que é aberto com fronteiras imaginárias.

Figuras 1.6 - Exemplos de sistemas: a) êmbolo fixo; b) êmbolo móvel e c) tubulação

1.7 - Substância Pura

É uma substância única, de estrutura molecular invariável ou uma solução de substâncias homogêneas, cada uma das quais de estrutura molecular invariável.

Por exemplo: o O_2 é uma substância pura, bem como o ar seco, que é uma mistura em proporções fixas de oxigênio, nitrogênio e outros gases. Uma mistura de água, gelo e vapor d'água também é substância pura, porque tem a mesma estrutura molecular. Já água e óleo não se misturam, não entram em solução, ar seco liquefeito e seu vapor têm diferentes temperaturas de condensação do oxigênio e do nitrogênio, variando as proporções.

Uma substância pura quando em repouso é caracterizada por duas propriedades termodinâmicas.

1.8 - Propriedades Termodinâmicas

As propriedades termodinâmicas são características descritivas do comportamento do sistema, para cálculo das variações de energia que tenham ocorrido num determinado sistema. Para tanto devemos saber exprimir o comportamento do sistema em termos de características descritivas.

As propriedades termodinâmicas classificam-se em:

1.8.1 - Propriedades extensivas - as quais dependem da massa e constituem valores totais como volume total, energia interna total, etc.;

1.8.2 - Propriedades intensivas - as que independem da massa, como por exemplo, pressão, temperatura, etc.

O que quer que aconteça a certa massa de uma substância pura (comprimida, aquecida, dilatada ou esfriada) se a fizermos voltar à pressão e à temperatura estipuladas como iniciais, as outras propriedades termodinâmicas também voltarão aos valores originais.

As propriedades termodinâmicas da substância pura podem ser representadas através de coordenadas cartesianas (x e y) como um ponto num plano xy , cujo ponto define um estado e para construir o plano qualquer propriedade pode ser usada como coordenada, porém algumas são mais usadas

como plano pV (pressão-volume), plano TS (temperatura-entropia). Por localizarem um ponto num plano e definirem um estado, tais propriedades são chamadas de função de ponto.

1.9 - Massa específica

A massa específica (ρ) de qualquer substância é sua massa dividida pelo seu volume, ou seja, é a massa de substância contida numa unidade de volume.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Unidades:

Sistema Internacional (SI) \rightarrow kg/m³

Sistema Técnico (ST) \rightarrow u.t.m./m³ (u.t.m.= unidade técnica de massa)

Sistema Inglês (SIg) \rightarrow lb/ft³ (libra por pé cúbico = lb/pé³ ou lb_m/pé³)

Outras unidades usuais: g/cm³; kg/L.

Por exemplo: a massa específica da água muda com a temperatura.

4°C \rightarrow $\rho = 1.000$ kg/m³

45°C \rightarrow $\rho = 990$ kg/m³

65°C \rightarrow $\rho = 980$ kg/m³

Obs.: É comum serem utilizadas as notações " e ', por exemplo, 1/2" para referir-se a meia polegada e 3', por exemplo, para expressar três pés. Então: " = polegada; ' = pé.

As unidades do sistema internacional (SI) são utilizadas em todo o mundo como medidas de padronização. Os sistemas técnico (ST) e inglês (SIg) ainda são utilizados na engenharia devido à necessidade de converter unidades da literatura técnica (e equipamentos) norte-americanos e ingleses, principalmente.

1.10 – Densidade

A densidade é a razão entre a massa específica do fluido em questão e a massa específica padrão. Esta razão também pode ser entre o peso específico do fluido e o padrão.

$$d = \frac{\rho}{\rho_{\text{padrão}}} = \frac{\gamma}{\gamma_{\text{padrão}}}$$

Unidades: Adimensional

Para os líquidos a referência adotada é a água a 4°C, que no Sistema SI corresponde a $\rho_0 = 1.000$ kg/m³ e para os gases a referência é o ar atmosférico a 0°C, que no Sistema SI corresponde a $\rho_0 = 1,29$ kg/m³.

1.11 - Volume específico

O volume específico (v) é o volume de uma massa unitária; é também o inverso da massa específica.

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$$

Unidades: Sistema Internacional (SI) \rightarrow m³/kg

Sistema Técnico (ST) → m³/u.t.m

Sistema Inglês (SIg) → ft³/lb

1.12 - Peso específico

O peso específico (γ) de qualquer substância é a força da gravidade exercida sobre sua massa (peso) sobre uma unidade de volume, ou seja, é o peso da massa de substância contida numa unidade de volume. Considerando a aceleração da gravidade padrão ($g = 9,807 \text{ m/s}^2$), o $\gamma_{\text{água}} = 9.800 \text{ N/m}^3$.

$$\gamma = \frac{\bar{P}}{V}$$

$$\gamma = \frac{m \cdot g}{V} = \rho \cdot g$$

ou

$$\gamma = \rho \cdot g$$

Unidades: Sistema Internacional (SI) → N/m³

Sistema Técnico (ST) → kgf/m³

Sistema Inglês (SIg) → lbf/ft³

1.13 - Pressão

Pressão é a força exercida sobre uma unidade de área.

$$p = \frac{F}{A}$$

Unidades: Sistema Internacional (SI) → N/m² = Pa (Pascal)

Sistema Técnico (ST) → kgf/cm²

Sistema Inglês (SIg) → lbf/in² = psi (do inglês *pound per square inch*), chamada de “libra” usualmente

Outras unidades: atm; mmHg; bar; lbf/ft²

A pressão do ar em um pneu, por exemplo, é a pressão efetiva, que é facilmente medida através de um manômetro, ou seja, a diferença entre a pressão do fluido dentro do recipiente e a pressão externa (atmosférica). Para determinar a pressão absoluta é necessário somar a pressão atmosférica.

$$\text{pressão absoluta} = \text{pressão efetiva} + \text{pressão atmosférica}$$

Os barômetros medem a pressão atmosférica e os vacuômetros a pressão abaixo da atmosférica (vácuo), geralmente em mmHg; metros de coluna d’água ou outro. A pressão atmosférica é obviamente a pressão que a atmosfera exerce sobre a superfície terrestre. A pressão nas tabelas e problemas é sempre considerada absoluta, a menos que seja indicado que trata-se de pressão efetiva.

O experimento realizado por Evangelista Torricelli (1608-1647), em 1643, utilizando um tubo graduado, com vácuo, que foi emborcado em um recipiente cheio de mercúrio, demonstrou que 1 atm = 760 mmHg. A pressão (de uma atmosfera) que atua na superfície do líquido (em B) faz com que o mercúrio suba pelo tubo até atingir a medida de 76cm. Outro fluido que não o mercúrio, logicamente, irá alterar esta medida.

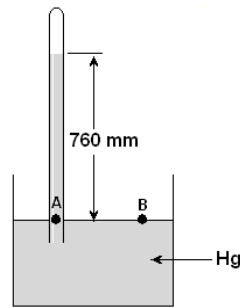


Figura 1.7 - Experiência de Torricelli.

Para converter uma unidade em outra podem ser usados os seguintes valores:
 $1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \cong 1 \text{ kgf/cm}^2 = 10,33272 \text{ m.c.a.}$ (metros de coluna d'água).

A pressão exercida por um fluido sobre um corpo tende a comprimir o corpo. A razão entre a variação de pressão (Δp) e a diminuição relativa de volume ($-\Delta V/V$) é o módulo de compressibilidade **B**.

$$B = - \frac{\Delta p}{\left(\frac{\Delta V}{V}\right)}$$

Os líquidos e os sólidos são relativamente incompressíveis e tem valores elevados de B, que pouco dependem da temperatura e da pressão. Por outro lado, os gases são facilmente comprimidos e os valores de B dependem muito da pressão e da temperatura.

1.14 - Pressão dos fluidos ou pressão hidrostática

A pressão (p) de um fluido num ponto é a mesma em todas as direções e pode ser afetada sensivelmente pela força da gravidade sobre o fluido.

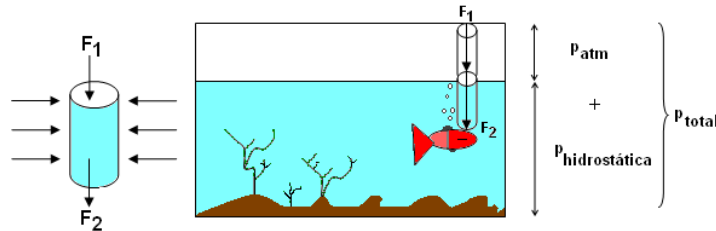


Figura 1.8 - Um recipiente cheio de líquido, mostrando as pressões atmosférica e hidrostática

Conforme o item 1.13, se $p = \frac{F}{A}$, sendo F a força peso da coluna, $\bar{P} = m_{\text{col}} \cdot g$ e A sendo a área da base do cilindro, então:

$$\rho_{\text{líqu}} = \frac{m_{\text{col}}}{V_{\text{col}}} \Rightarrow m_{\text{col}} = \rho_{\text{líqu}} \cdot V_{\text{col}}$$

Considerando o cilindro isolado da Figura 1.8, as forças laterais se anulam e somente F_1 e F_2 atuam. Sobre a cabeça do peixinho tem-se a F_1 devida à pressão atmosférica e a F_2 devida à pressão hidrostática da superfície da água até o peixinho. Então:

$$F_2 = F_1 + \bar{P}$$

$$F_2 = F_1 + m_{\text{col}} \cdot g$$

$$F_2 = F_1 + \rho_{\text{líqu}} \cdot V_{\text{col}} \cdot g \quad , \text{ mas } V = A \cdot z, \text{ que } z \text{ é a altura da coluna e } A \text{ a área.}$$

$$F_2 = F_1 + \rho_{\text{líqu}} \cdot A_{\text{base}} \cdot z_{\text{col}} \cdot g \quad (\text{dividindo por } A_{\text{base}})$$

$$\frac{F_2}{A_{\text{base}}} = \frac{F_1}{A_{\text{base}}} + \frac{\rho_{\text{liq}} \cdot A_{\text{base}} \cdot z_{\text{col}} \cdot g}{A_{\text{base}}}$$

$$p_2 = p_1 + \rho_{\text{liq}} \cdot z_{\text{col}} \cdot g \quad \text{se} \quad \gamma = \rho \cdot g$$

$$p_2 = p_1 + \gamma_{\text{liq}} \cdot z_{\text{col}}$$

$$\boxed{p_2 = p_1 + \gamma (z_2 - z_1)} \quad \text{ou} \quad \boxed{p = p_o + \gamma (z_o - z)}$$

onde: p_o = pressão atmosférica (Pa), sabendo que $\text{Pa} = \text{N/m}^2$

γ = peso específico (N/m^3)

$z_o - z$ = diferença de cotas (m)

Considerando que: pressão absoluta = pressão efetiva + pressão atmosférica e

se: $p = p_o + \gamma (z_o - z)$, então:

$$p - p_o = \gamma (z_o - z) \rightarrow p_{\text{efetiva}} = \gamma (z_o - z)$$

Esta é outra forma de calcular a pressão efetiva, conhecendo-se o peso específico do fluido e a diferença de cotas.

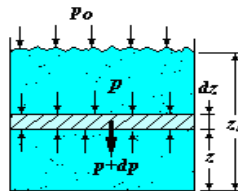


Figura 1.9 - Um recipiente cheio de líquido, mostrando as pressões nos pontos de cotas z e z_o

Em geral, a cota z é notada como h (altura de uma coluna d'água ou de outro líquido). Sabendo-se que $\gamma = \rho \cdot g$, então a pressão efetiva pode ser escrita:

$$p_{\text{efetiva}} = \rho g h$$

1.15 - Processos Termodinâmicos

Diz-se que um corpo sofreu um processo termodinâmico, quando varia uma ou mais propriedades do sistema, no qual esse corpo está inserido, havendo variação de seu estado. Ex.: processos: isobárico, isométrico, isotérmico.

1.16 - Ciclos Termodinâmicos

Diz-se que houve um ciclo termodinâmico, quando a substância em um determinado estado inicial sofre processos e retorna a esse estado inicial.

1.17 - Escalas de Temperatura

A temperatura é o estado térmico de um corpo em relação à sua capacidade de transferir calor a outros corpos. Para medir a temperatura são usadas escalas, que dependem dos pontos de referência escolhidos. Os pontos de referência universais (fixos) são o ponto do gelo e o ponto do vapor d'água em 1 atm. Se o zero da escala é o ponto do gelo e os 100 graus o do vapor, obtém-se uma escala centígrada de Celsius. Se o ponto do gelo for 32 e o do vapor for 212 graus teremos a escala Fahrenheit. No entanto, a termodinâmica requer o uso de uma temperatura absoluta, independente das propriedades do fluido, medida em relação ao zero absoluto, que seria o ponto, teoricamente, da temperatura mais baixa possível

de ser atingida. A escala Kelvin é uma escala absoluta, onde o zero Kelvin corresponde a -273°C . Da mesma forma a escala absoluta de Rankine (R) está relacionada à Fahrenheit.

A temperatura pode ser medida por variação de volume (Hg, álcool), variação de pressão, variação de resistividade elétrica, variação do potencial elétrico (pela força eletro-motriz - par termelétrico), por método ótico (pirômetro ótico).

$$\frac{^{\circ}\text{C}}{5} = \frac{^{\circ}\text{F}-32}{9} \quad \text{conversão de graus Celsius para graus}$$

Fahrenheit ou vice-versa

$$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273 \quad \text{conversão de graus Celsius para Kelvin (escala absoluta)}$$

$$\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 460 \quad \text{conversão de graus Fahrenheit para Rankine (escala absoluta)}$$

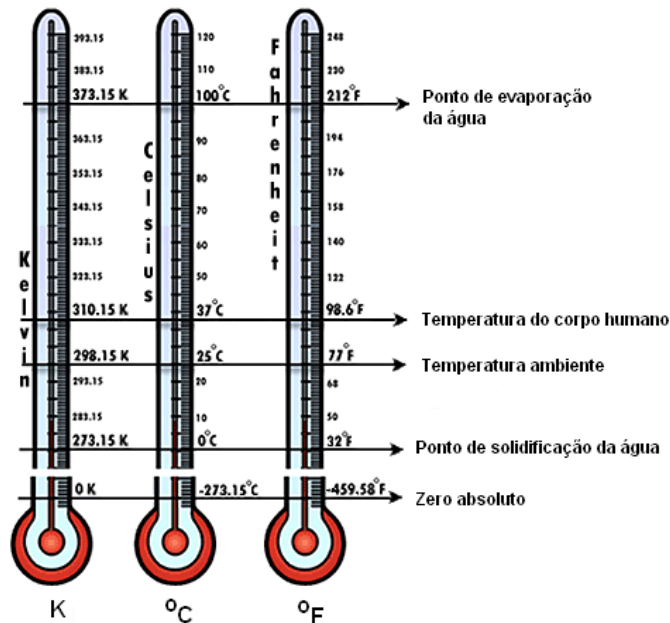


Figura 1.10 - Escalas de temperatura

1.18 - Zeroésimo Princípio da Termodinâmica

Também chamado de Ante Primeira Lei ou Princípio Zero da Termodinâmica e diz que se um corpo quente é colocado em contato com um corpo frio, ambos isolados de sua vizinhança, suas propriedades irão variar durante certo tempo. Quando a variação cessar, os corpos estarão em equilíbrio térmico. O Zeroésimo Princípio afirma que: “Se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro, eles estão em equilíbrio térmico entre si, sendo que o calor flui do corpo mais quente para o mais frio”.

1.19 - Conservação da Massa

O princípio da conservação da massa nos diz que a massa é indestrutível. Então, para um sistema aberto, a massa que entra no sistema é igual à variação de massa no sistema mais a massa que sai do sistema.

$$m_1 = \Delta m + m_2$$

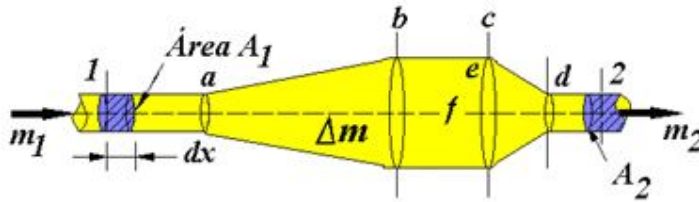


Figura 1.11 - Tubulação com fluxo de massa através das áreas 1 e 2

Sabe-se que: $V = A \cdot l$; ou seja, volume é igual a área multiplicada pela distância, para obter a massa, basta multiplicar o volume dV_1 pela massa específica no ponto 1.

Então: $dm_1 = \rho_1 A_1 dx$, mas como a massa está escoando em um intervalo de tempo dt .

Uma massa que escoar em um determinado intervalo de tempo é chamada de descarga (G) ou fluxo de massa.

Então:

$$G_1 = \rho_1 A_1 v_1 \quad \text{e, analogamente,}$$

$$G_2 = \rho_2 A_2 v_2$$

onde:

G = fluxo de massa ou descarga de massa (kg/s; kg/h; lb/s; etc.)

ρ = massa específica do fluido (kg/m³; u.t.m./m³; lb/m³; etc.)

A = área da seção transversal de escoamento (m²; in²; ft²; etc.)

v = velocidade do fluido que escoar (m/s; ft/s; etc.)

Como o sistema é com escoamento estacionário (permanente ou contínuo), teremos que:

$$\Delta m = 0 \Rightarrow m_1 = m_2 = m$$

$$\boxed{\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 = G} \quad \text{Equação da Continuidade}$$

Considerando $\gamma = \rho g$, sendo γ o peso,

$m_1 g = m_2 g = m g$, sabendo-se que _____

$$\rho_1 V g A_1 v_1 = \rho_2 V g A_2 v_2 = m g$$

se o volume é constante, é cancelado

$$\rho_1 g A_1 v_1 = \rho_2 g A_2 v_2 = m g$$

Se _____ e se $\rho V = m$, então:

$$\boxed{\gamma_1 A_1 v_1 = \gamma_2 A_2 v_2 = P}$$

portanto:

$$\boxed{\gamma_1 A_1 v_1 = \gamma_2 A_2 v_2 = P}$$

onde:

P = descarga de peso ou fluxo de peso (N/s; kgf/s; lbf/s; etc.)

Unidades: $\rho = m/V \rightarrow$ SI - kg/m^3
 \rightarrow ST - $\text{u.t.m.}/\text{m}^3$
 $\gamma = \bar{P}/V \rightarrow$ SI - N/m^3
 \rightarrow ST - kgf/m^3

Trabalhando-se com as unidades nos Sistemas Internacional e Técnico e sabendo-se que:

$F = m a \rightarrow$ SI - $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2 = \text{N}$
 $u(F) = u(m) \cdot u(a) \rightarrow$ ST - $\text{utm} \cdot \text{m}/\text{s}^2 = \text{kgf}$

Sendo: $1 \text{ kgf} = 9,8 \text{ N}$ SI - $m = 1 \text{ kg} \rightarrow \bar{P} = 9,8 \text{ N}$
 ST - $m = 1/9,8 \text{ utm} \rightarrow \bar{P} = 1 \text{ kgf}$

Exemplo:

$\gamma = \rho g$; então: $\rho = \gamma/g$

Se $\gamma = 3600 \text{ kgf}/\text{m}^3$ ST então $\gamma = (3600 \times 9,8) \text{ N}/\text{m}^3$ SI porque $1 \text{ kgf} = 9,8 \text{ N}$

$1 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \Rightarrow 9,8 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} = \frac{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$ e

$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{(3.600 \times 9,8) \text{ N}/\text{m}^3}{9,8 \text{ m}/\text{s}^2} = 3.600 \text{ kg}/\text{m}^3$

Observe que houve duas transformações: passou-se peso específico para massa específica ($\gamma = \rho \cdot g$) e as unidades passaram do sistema técnico para o sistema internacional.

1.20 – Conceitos Úteis

1.20.1 - Reservatório Térmico

É um sistema termodinâmico que serve de fonte térmica ou de sorvedouro de calor para outro sistema. É infinitamente grande comparado ao outro sistema e a sua temperatura não varia quando sujeito à troca térmica. Ex.: rios, mares, oceanos, atmosfera.

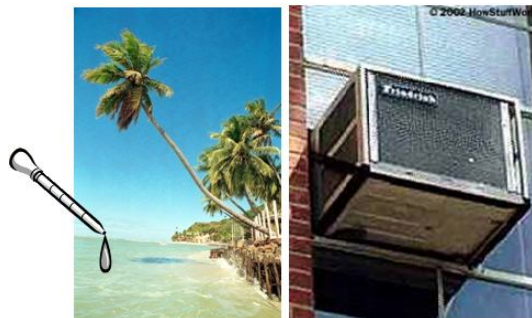


Figura 1.12 – Exemplos ilustrativos de reservatórios térmicos com suas contribuições de calor.

1.20.2 - Máquina Térmica

É um sistema termodinâmico que opera continuamente, enquanto através de suas fronteiras só há fluxo de energia (Q ou W); não há fluxo de massa pelas fronteiras (impermeáveis). Ex.: refrigerador.

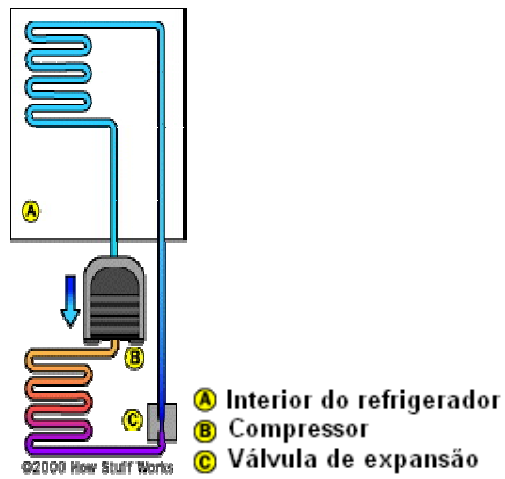


Figura 1.13 – Esquema de funcionamento de um refrigerador

1.20.3 - Fronteira Adiabática

É aquela impermeável ao calor, ou seja, faz haver completo isolamento térmico. Ex.: garrafa térmica; caixa de isopor.



Figura 1.14 – Exemplos de materiais que podem ser considerados adiabáticos em um intervalo de tempo infinitesimal

Tabela 1.1 – Valores de algumas constantes para diversos gases

Gás	Símbolo	Massa molecular (kg/kmol)	Peso Específ. * γ (kgf/m ³)	Constante do gás R (kgfm/kg.K)	Calor específico*		$\kappa = c_p/c_v$
					c_p (kcal/kg.K)	c_v	
Hélio	He	4,000	0,1785	212,00	1,251	0,755	1,660
Argônio	Ar	39,940	1,7820	21,26	0,127	0,077	1,660
Ar	-	28,960	1,2928	29,27	0,241	0,172	1,400
Oxigênio	O ₂	32,000	1,4289	26,50	0,218	0,156	1,400
Nitrogênio	N ₂	28,016	1,2505	30,26	0,250	0,178	1,400
Hidrogênio	H ₂	2,0160	0,0899	420,60	3,408	2,420	1,407
Óxido nítrico	NO	30,008	1,3420	28,26	0,241	0,175	1,380
Óxido de carbono	CO	28,000	1,2502	30,29	0,250	0,180	1,400
Ácido clorídrico	HCl	36,468	1,6391	23,25	0,191	0,136	1,400
Gás carbônico	CO ₂	44,000	1,9768	19,27	0,202	0,156	1,300
Óxido nítrico	N ₂ O	44,016	1,9775	19,26	0,210	0,164	1,280
Anidrido sulfuroso	SO ₂	64,070	2,9276	13,24	0,151	0,120	1,250
Amoníaco	NH ₃	17,032	0,7709	49,79	0,530	0,410	1,290
Acetilênio	C ₂ H ₂	26,016	1,1709	32,59	0,402	0,323	1,240
Cloreto de metila	CH ₃ Cl	50,484	2,3084	16,80	0,180	0,140	1,280
Metano	CH ₄	16,032	0,7168	52,90	0,531	0,406	1,310
Etileno	C ₂ H ₄	28,032	1,2604	30,25	0,365	0,292	1,250
Etano	C ₂ H ₆	30,048	1,3560	28,21	0,413	0,345	1,200

Fonte: Adaptado de Ennio Cruz da Costa – Física Aplicada à Construção
(*) a 0°C e 760 mm Hg

UNIDADE II - CONSERVAÇÃO DA ENERGIA

2.1 - Introdução

Toda a matéria tem energia em diversas formas.

A energia é inerente a toda matéria. Por energia entendemos algo que aparece em muitas formas diferentes, formas essas mutuamente relacionadas pela possibilidade de conversão de uma forma de energia em outra.

Energia é o potencial de um corpo produzir uma ação na forma de trabalho. A energia pode também ser definida através de suas várias formas.

2.2 – Trabalho

Para que se possa efetuar o trabalho é necessário que uma força atue sobre um corpo, ocasionando um deslocamento. Este é chamado de trabalho mecânico.

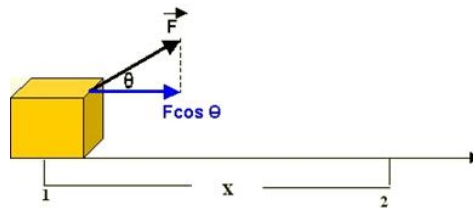


Figura 2.1 – Uma força F atuando sobre um corpo, realizando um trabalho

Tal trabalho é medido pela seguinte expressão:

$dW = F \cdot dx$, e por integração, obtém-se:

$$W = F (x_2 - x_1)$$

Unidades: SI \rightarrow J; ST \rightarrow kgfm; SIg \rightarrow lbf-ft; outros \rightarrow kcal; etc.

$$W = F \cdot dx$$

SI: $J = N \cdot m$

ST: $kgfm = kgf \cdot m$

SIg: $lbf-ft = lbf \cdot ft$

} Equacionamento de Unidades

Convenção de sinal:

Trabalho realizado pelo sistema é positivo

Trabalho realizado sobre o sistema é negativo

2.3 - Energia Cinética

Um corpo de massa “m”, movendo-se a uma velocidade “v”, está dotado de uma forma de energia chamada energia cinética, que é expressa da seguinte forma:

$$K = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

Para calcular a variação da energia cinética utiliza-se a seguinte fórmula:

$$\Delta K = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2)$$

Unidades:

S I $m = \text{kg}$
 $v = \text{m/s}$, então: $\Delta K = \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$
 $\Delta K = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2 \cdot \text{m}$ e sabendo-se que $\text{N} = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2 =$
 $= \text{N} \cdot \text{m} = \text{J}$

S T $m = \text{u.t.m.}$
 $v = \text{m/s}$, então: $\Delta K = \text{utm} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$
 $\Delta K = \text{utm} \cdot \text{m}/\text{s}^2 \cdot \text{m}$ e sabendo-se que $\text{kgf} = \text{utm} \cdot \text{m}/\text{s}^2 =$
 $= \text{kgf} \cdot \text{m} = \text{kgfm}$

S Ig $m = \text{lb}$
 $v = \text{ft/s}$, então: $\Delta K = \text{lb} \cdot \text{ft}^2/\text{s}^2 = \text{lb} \cdot \text{ft}/\text{s}^2 \cdot \text{ft}$ e sabendo-se que $\text{lbf} = \text{lb} \cdot \text{ft}/\text{s}^2 = \text{lbf} \cdot \text{ft}$ (1 Btu = 778,16 lbf-ft)

2.4 - Energia Potencial

Seja um corpo, em relação a certo nível de referência, ao elevar-se acima desse nível realiza um trabalho que é chamado de energia potencial, que é expressa pela seguinte fórmula:

$$P = m \cdot g \cdot z$$

onde: m = massa do corpo
 g = aceleração da gravidade
 z = cota

Para calcular a variação de energia potencial, tem-se:

$$\Delta P = m g (z_2 - z_1)$$

Unidades:

S I $m = \text{kg}$
 $g = \text{m}/\text{s}^2$
 $z = \text{m}$, então: $\Delta P = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2 \cdot \text{m} = \text{N} \cdot \text{m} = \text{J}$

S T $m = \text{u.t.m.}$
 $g = \text{m}/\text{s}^2$
 $z = \text{m}$, então: $\Delta P = \text{utm} \cdot \text{m}/\text{s}^2 \cdot \text{m} = \text{kgf} \cdot \text{m} = \text{kgfm}$

SIg $m = \text{lb}$
 $g = \text{ft}/\text{s}^2$
 $z = \text{ft}$, então: $\Delta P = \text{lb} \cdot \text{ft}/\text{s}^2 \cdot \text{ft} = \text{lbf} \cdot \text{ft}$

Porém, a unidade de energia mais usada no sistema inglês é o Btu, que relaciona-se à lbf-ft, sendo 1 Btu aproximadamente igual a 778,16lbf-ft. Embora seja usado um hífen para separar as unidades lbf de ft (ou pé), esta unidade advém de uma multiplicação da lb pelo ft/s^2 .

É interessante ainda considerar a unidade de massa denominada *slug* no sistema inglês, pois 1 slug = 32,17lb. Um slug é a massa na qual a força de intensidade de 1 lbf imprime aceleração de $1 \text{ ft}/\text{s}^2$, portanto:

$$1 \text{ lbf} = 1 \text{ slug} \cdot 1 \text{ pé}/\text{s}^2, \text{ ou seja,}$$
$$1 \text{ lbf} = 1 \text{ lb} \cdot 32,17 \text{ pés}/\text{s}^2$$

2.5 - Energia Interna

A matéria é constituída por agregados de moléculas, que se movimentam continuamente e ao acaso. As moléculas têm massa e, portanto, energia cinética, a que damos o nome de energia cinética

interna. A energia cinética interna surge devido aos movimentos de rotação e de translação das moléculas e do movimento vibratório dos átomos, que constituem as moléculas. Como essas moléculas, ao deslocarem-se, estão mudando constantemente de posição, umas em relação às outras, possuem energia potencial, a que é chamada de energia potencial interna.

A soma dessas duas variações de energia tem como resultante a variação da energia interna da substância. A variação da energia interna em um sistema fechado é nula.

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

Unidades: SI \rightarrow J; ST \rightarrow kgfm; SIg \rightarrow lbf-ft; outros \rightarrow kcal; etc.

2.6 - Trabalho em um sistema sem escoamento (fechado)

Seja um fluido qualquer, num sistema fechado, que se expande do ponto 1 ao ponto 2. Esse fluido ao se expandir realizou um trabalho, a saber:

mas, $F = p \cdot a$, então:

mas, $A \cdot dx = dV$, então:



Unidades: SI \rightarrow J; ST \rightarrow kgfm; SIg \rightarrow lbf-ft; outros \rightarrow kcal; etc.

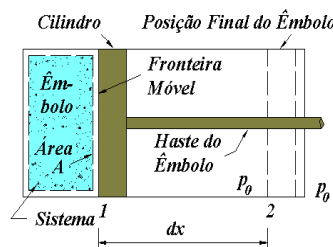


Figura 2.2 - Um êmbolo que se move entre os pontos 1 e 2 em um cilindro

Qualquer que seja o processo termodinâmico sem escoamento ou fechado o trabalho mecânico realizado pelo sistema (se houver) será calculado pela integral de $p \cdot dV$.

2.7 - Trabalho de Fluxo

Se uma substância flui para dentro ou para fora de um sistema, há uma certa quantidade de energia em jogo, à medida que a substância cruza os limites do sistema. A esta energia dá-se o nome de trabalho de fluxo (W_f) ou trabalho de escoamento. Para existir trabalho de fluxo o sistema tem que ser aberto.

Imagine-se um fluido que esteja escoando em uma tubulação, como a da Figura 2.3.

Imagine-se ainda um pequeno volume (V_1) a ponto de cruzar a fronteira 1 para entrar no sistema. Da mesma forma, um volume (V_2) está saindo do sistema pela fronteira 2. Para que o volume V_1 entre no sistema, é preciso fornecer-lhe trabalho, em quantidade suficiente para movê-lo contra a resistência do sistema.

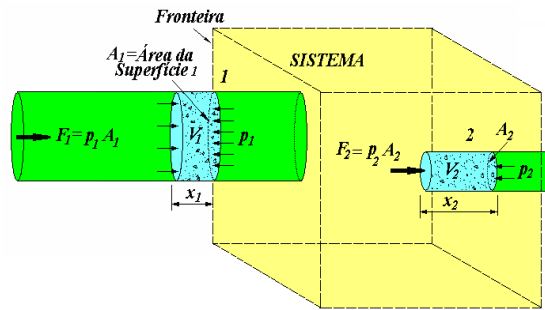


Figura 2.3 - Um fluido que escoa em uma tubulação

Então, a força resistente (F_1) deverá ser igual a $p_1 A_1$. Logo:

$$F_1 = p_1 A_1, \text{ então:}$$

$$Wf_1 = F_1 \cdot x_1$$

Substituindo o valor da força resistente na equação do trabalho:

$$Wf_1 = p_1 A_1 x_1, \text{ mas } A_1 x_1 = V_1, \text{ de onde:}$$

$$Wf_1 = p_1 V_1$$

Analogamente para o ponto 2, tem-se:

$$Wf_2 = p_2 V_2$$

Logo, o trabalho de fluxo resultante (Wf) será:

$$Wf = Wf_2 - Wf_1 \text{ ou}$$

$$Wf = p_2 V_2 - p_1 V_1$$

Unidades: SI \rightarrow J; ST \rightarrow kgfm; SIg \rightarrow lbf-ft; outros \rightarrow kcal; etc.

Unidades:

S I $p = \text{N/m}^2$
 $V = \text{m}^3$, então: $Wf = \text{N/m}^2 \cdot \text{m}^3 = \text{N} \cdot \text{m} = \text{J}$

S T $p = \text{kgf/m}^2$
 $V = \text{m}^3$, então: $Wf = \text{kgf/m}^2 \cdot \text{m}^3 = \text{kgf} \cdot \text{m} = \text{kgfm}$

S Ig $p = \text{lbf/ft}^2$
 $V = \text{ft}^3$, então: $Wf = \text{lbf/ft}^2 \cdot \text{ft}^3 = \text{lbf-ft}$

2.8 - Calor

Calor é a energia em trânsito de um corpo ou sistema a outro, unicamente em virtude de uma diferença de temperatura entre os corpos ou sistema.

O calor (Q) pode ser transferido de três maneiras, que são:

- por condução – devido a dois mecanismos. O primeiro mecanismo é devido às moléculas ou aos átomos que se encontram na parte mais quente do corpo e transferem parte de sua energia através de choques com as moléculas adjacentes. O segundo mecanismo é devido ao fato que dos elétrons livres provém um fluxo de energia na direção da temperatura decrescente;
- por convecção – ocorre porque um fluido em movimento extrai energia calorífica de um corpo quente e entrega essa energia a um corpo mais frio;

- por radiação – dá-se devido à propagação de ondas eletromagnéticas. Esta teoria é chamada de Teoria Ondulatória ou Eletromagnética.

Estas formas de transmissão de calor serão estudadas em maiores detalhes nas Unidades IX a XII. Por enquanto, o calor será referido de uma maneira geral e serão usadas as unidades de energia, como J; kgfm; lbf-ft; kcal; etc.

A convenção de sinal, ilustrada pela Figura 2.4, significa que:

Convenção de sinal:

Calor que entra no sistema é positivo

Calor que sai do sistema é negativo

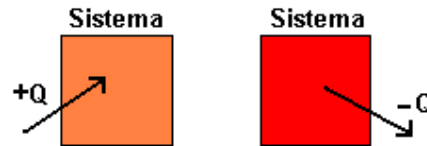


Figura 2.4 – Ilustração da convenção de sinal para o calor

2.9 – Entalpia

É a forma de energia que é expressa pela seguinte equação:

$$H = U + pV$$

A entalpia é uma propriedade termodinâmica extensiva, uma vez que ela é o somatório de duas propriedades termodinâmicas (U e pV), que significam energia interna e a expressão do trabalho de fluxo. A variação da entalpia entre dois estados é dada por:

$$\Delta H = \Delta U + (p_2 V_2 - p_1 V_1)$$

$$\Delta H = \Delta U + Wf$$

Unidades: SI → J; ST → kgfm; SIg → lbf-ft; outros → kcal; etc.

Deve-se notar que o $Wf \neq 0$ para sistemas abertos.

Como a entalpia é uma forma de energia difícil de ser entendida na forma de equações, é dado um exemplo para facilitar o entendimento. O ar numa sala tem “U” (energia interna) e pV (pressão e volume). Embora pV tenha as unidades de energia, não é considerado uma forma de energia. Somente quando o ar atravessa uma superfície de controle, o produto pV representa energia na forma de trabalho de fluxo.

Entalpia, portanto, não representa energia de uma substância em repouso, somente quando há movimento, idéia essa ligada ao conceito de trabalho de fluxo.

2.10 - Primeiro Princípio da Termodinâmica

2.10.1 - Histórico

A lei da conservação da energia, que diz que a energia não pode ser criada e nem destruída, apenas transformada, não é uma idéia que surgiu repentinamente.

Benjamin Thompson (Conde Rumford), que viveu entre 1753 e 1814, descobriu a equivalência do trabalho e do calor durante a fabricação de canhões em 1797, ao furar o metal sólido submerso em água. Ele ficou intrigado pela ebulição da água devida ao trabalho mecânico da perfuração, ainda que nenhum calor tivesse sido adicionado à água. Convenceu-se (mas não aos outros) da invalidade da teoria do calórico, que na época, supunha ser o calor uma substância sem massa.

Uns 50 anos após, Joule (1818-1889), auxiliado pelo Lorde Kelvin, demonstrou conclusivamente que o trabalho mecânico e o calor são equivalentes.

2.10.2 - O Primeiro Princípio

Para um sistema fechado pode-se dizer que a energia que entra no sistema é igual ao acréscimo ou decréscimo de energia armazenada mais a energia que sai do sistema, ou seja, a energia não pode ser criada nem destruída.

As energias em geral são avaliadas durante certo tempo. Sabe-se também que num ciclo o sistema retorna ao seu estado original, logo, a quantidade de energia armazenada não varia ao ser completado um ciclo, isto é, a sua variação é igual a zero. Por isto, pode-se dizer que a energia que entra no sistema é igual à energia que sai do sistema.

Como a massa de um sistema sem escoamento é constante por definição, as muitas formas de energia que cruzam as fronteiras do sistema são calor e trabalho, logo:

Q_e = calor que entra no sistema

Q_s = calor que sai do sistema

W_e = trabalho que entra no sistema

W_s = trabalho que sai do sistema

$$Q_e + W_e = Q_s + W_s$$

daí : $Q_e - Q_s = W_s - W_e$

$$\Sigma Q = Q_e - Q_s = \oint dQ \quad e$$

$$\Sigma W = W_s - W_e = \oint dW \quad ,$$

onde a integral \oint representa que a integração se faz sobre o ciclo completo.

$$\boxed{\oint dW - \oint dQ = 0}$$

Equação do Primeiro Princípio da Termodinâmica

O enunciado do Primeiro Princípio da Termodinâmica é: “Calor e Trabalho são formas de energia mutuamente conversíveis”.

Isto quer dizer que calor e trabalho são duas faces de uma mesma moeda, que é a energia, e que a quantidade total de energia num sistema fechado permanece constante.

O Primeiro Princípio é quantitativo; refere-se à conservação da energia e da massa, uma vez que “a energia do Universo é constante”.

Obs.: Calor e trabalho não estão contidos no sistema; são formas de energia que só se manifestam em um determinado estado, enquanto que ΔP , ΔK e ΔU estão contidas e podem variar com o movimento e a posição das moléculas.

2.11 - Energia em sistemas fechados (sem escoamento)

Pelo princípio da conservação da energia:

$E_e = \Delta E + E_s$, sendo ΔE = variação da energia no sistema;

E_e = a energia que entra no sistema;

E_s = a energia que sai do sistema.

A Equação da energia para sistemas sem escoamento é:

$$E_e = \Delta E + E_s$$

$$\boxed{Q = \Delta U + W} \quad \text{sabendo-se que } W = \int p dV$$

O esquema que exemplifica esta equação é mostrado na Figura 2.5, que mostra que uma determinada quantidade de calor entra no sistema, aumentando a energia interna do mesmo e realizando um trabalho sobre o êmbolo. Sobre o êmbolo há um peso, ligado a uma mola.

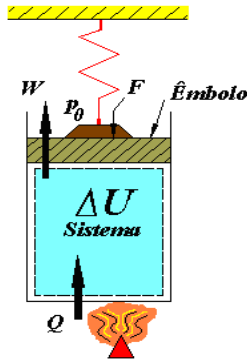


Figura 2.5 - Cilindro com um peso sobre o êmbolo

2.12 - Energia em sistemas com escoamento

Quando há escoamento no sistema, outras formas de energia são envolvidas no equacionamento, como mostra a Figura 2.6, que ilustra um fluido entrando no sistema pela fronteira 1, em uma cota $z_1 > z_2$. Há entrada de calor no sistema e aumento da energia interna. O movimento do fluido realiza um trabalho mecânico de mover a hélice e o fluido sai pela fronteira 2.

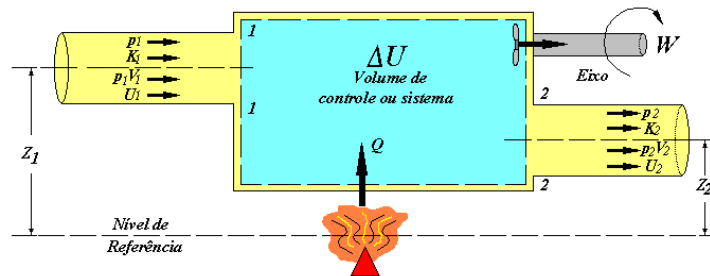


Figura 2.6 - Escoamento de um fluido pela tubulação de 1 para 2, fazendo mover a hélice.

Pelo princípio da conservação da energia:

$$E_e = \Delta E + E_s$$

$$Q + P_1 + K_1 + W_{f1} = \Delta U + P_2 + K_2 + W_{f2} + W$$

onde:

Q = calor

P = energia potencial

K = energia cinética

Wf = trabalho de fluxo

U = energia interna

W = trabalho mecânico

Então:

$$Q = \Delta U + (P_2 - P_1) + (K_2 - K_1) + (W_{f2} - W_{f1}) + W$$

$$Q = \Delta U + \Delta P + \Delta K + Wf + W$$

Esta é a equação da energia para sistemas com escoamento.

2.13 - Potência

É a medida da rapidez que uma forma de energia se transforma em outra. Ex.: ao ligar um motor elétrico, a energia elétrica é consumida para gerar energia mecânica, que é utilizada para mover o eixo do motor elétrico. Neste processo normalmente ocorrem perdas de calor, como mostra a Figura 2.7.

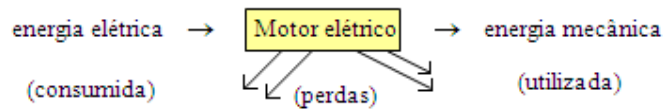


Figura 2.7 – Esquema das energias envolvidas para produção de energia mecânica

Por analogia, pode-se dizer que:

$$\text{velocidade} = \frac{\text{espaço}}{\text{tempo}} \quad \text{ou} \quad v = \frac{dx}{dt}$$

e que a aceleração mede a rapidez com que a velocidade varia.

$$\text{aceleração} = \frac{\text{velocidade}}{\text{tempo}} \quad \text{ou} \quad a = \frac{dv}{dt}$$

Potência é a taxa de transformação de energia em trabalho na unidade de tempo.

$$\bar{W} = \frac{W}{t}$$

e se

$$\bar{W} = \frac{745,6 \text{ J}}{1 \text{ s}} = 745,6 \text{ W}$$

$$\bar{W} = \frac{\text{energia que consumiu}}{\text{tempo gasto para a transformação}} = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W (Watt)}$$

$$\text{Unidades: } \frac{\text{kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{\text{s}} = \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{s}} = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W} \quad \text{ou ainda}$$

$$1 \text{ HP} = 0,746 \text{ kW}$$

Unidades: SI → Watt; kW
 ST → kgfm/s
 SIg → Btu/s
 Outros → cv; HP; etc.

Isto foi demonstrado experimentalmente por James Watt, em 1768, pela perfuração de um poço, graduado em metros, no qual era colocada uma corda e nela ficava preso um balde, de massa de 1kg, de maneira tal que, ao ser puxado verticalmente para a superfície exigia uma força igual a um quilograma-força ($F = 1\text{kgf}$). No nível do solo ele instalou uma roldana, para que a direção da corda mudasse de plano, sendo, então, atrelada aos arreios de sucessivos cavalos – usados como cobaias. A cada metro perfurado, ele procedia, pacientemente, a medição do tempo que o balde levava para atingir a superfície. Sabendo-se que a unidade de tempo era o segundo, foi necessária uma profundidade de 76m, para “n” cavalos realizarem esse trabalho.

O trabalho realizado pelos cavalos, foi: $W = F \cdot dx \cos \phi$. Como o ângulo formado entre a direção do deslocamento e a direção aplicada da força é 0, portanto, $\cos 0 = 1$.

Logo: $W = 1 \text{ kgf} \times 76,00 \text{ m} \times 1 = 76,00 \text{ kgfm}$ e como

$\bar{P} = m \cdot g = 1,0 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 9,81 \text{ N}$, então

$W = 76,00 \text{ kgfm} \times 9,81 = 745,6 \text{ Joules}$

porque $1 \text{ kgf} = 9,81 \text{ N}$

Os quadros 1 e 2 mostram a operação de algumas unidades usuais. O quadro 1 mostra as unidades resultantes de força para os três sistemas de unidades (internacional, técnico e inglês). O quadro 2 utiliza como exemplo a fórmula da energia potencial, mas a operação das unidades serve para qualquer forma de energia.