

APOSTILA DE MECÂNICA DOS FLUIDOS

Autora: Maria Helena Rodrigues Gomes
Professora do Dep. Eng. Sanitária e Ambiental
da Faculdade de Engenharia da UFJF

CAPÍTULO 1 – CONCEITOS FUNDAMENTAIS

1.1 – Mecânica dos Fluidos

A **mecânica dos fluidos** trata do comportamento dos fluidos em repouso ou em movimento e das leis que regem este comportamento. São áreas de atuação da mecânica dos fluidos:

- ✓ Ação de fluidos sobre superfícies submersas, ex.: barragens;
- ✓ Equilíbrio de corpos flutuantes, ex.: embarcações;
- ✓ Ação do vento sobre construções civis;
- ✓ Estudos de lubrificação;
- ✓ Transporte de sólidos por via pneumática ou hidráulica, ex.: elevadores hidráulicos;
- ✓ Cálculo de instalações hidráulicas, ex.: instalação de recalque;
- ✓ Cálculo de máquinas hidráulicas, ex.: bombas e turbinas;
- ✓ Instalações de vapor, ex.: caldeiras;
- ✓ Ação de fluidos sobre veículos – Aerodinâmica.

1.2 - Fluido

Pode-se definir **fluido** como uma substância que se deforma continuamente, isto é, escoar, sob ação de uma força tangencial por menor que ele seja.

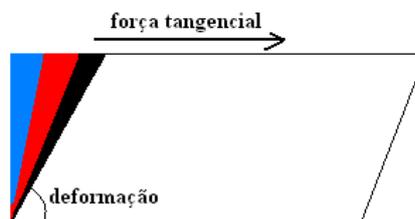


Figura 1.1: Força tangencial agindo sobre um fluido

O conceito de fluidos envolve líquidos e gases, logo, é necessário distinguir estas duas classes: “Líquidos é aquela substância que adquire a forma do recipiente que a contém possuindo volume definido e, é praticamente, incompressível. Já o gás é uma

substância que ao preencher o recipiente não formar superfície livre e não tem volume definido, além de serem compressíveis.

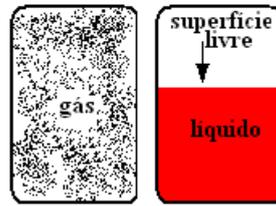


Figura 1.2: Fluido: gás e líquido

1.2.1 – Propriedade dos Fluidos

a) **massa específica ρ** : a massa de um fluido em uma unidade de volume é denominada densidade absoluta, também conhecida como massa específica (kg/m^3) (“density”)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{sendo} \begin{cases} m - \text{massa} \\ V - \text{volume} \end{cases} \quad (1.1)$$

b) **peso específico γ** : é o peso da unidade de volume desse fluido (N/m^3) (“unit weight”)

- para os líquidos
$$\gamma = \frac{G}{V} \quad \text{sendo} \begin{cases} G - \text{peso} \\ V - \text{volume} \end{cases} \quad (1.2)$$

- para os gases
$$\gamma = \frac{P}{RT} \quad \text{sendo} \begin{cases} P - \text{pressão absoluta (kgf}/\text{m}^2) \\ R - \text{constantel do gás} \\ T - \text{temperatura absoluta (}^\circ\text{C)} \end{cases} \quad (1.3)$$

O peso específico pode ser expresso nos diferentes sistemas de unidades, como segue:

Sistema MK*S: $[\gamma] = \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$

Sistema MKS: $[\gamma] = \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$ (S.I.)

Sistema C.G.S.: $[\gamma] = \frac{\text{d}}{\text{cm}^3}$

Como exemplo de valores de peso específico para alguns fluidos tem-se:

Água: $\gamma = 1000 \text{ kgf/m}^3 \approx 10000 \text{ N/m}^3$

Mercúrio: $\gamma = 13600 \text{ kgf/m}^3 \approx 136000 \text{ N/m}^3$

Ar: $\gamma = 1,2 \text{ kgf/m}^3 \approx 12 \text{ N/m}^3$

OBS: Relação entre ρ e γ

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{m}{V}g \Rightarrow \gamma = \rho g \quad (1.4)$$

c) peso específico relativo γ_r

$$\gamma_r = \frac{G}{G_{\text{H}_2\text{O}}} \quad \text{sendo} \quad \left\{ \begin{array}{l} \gamma = \frac{G}{V} \Rightarrow G = \gamma V \\ \gamma_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{G_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{H}_2\text{O}}} \Rightarrow G_{\text{H}_2\text{O}} = \gamma_{\text{H}_2\text{O}} V_{\text{H}_2\text{O}} \end{array} \right.$$

Substituindo

$$\gamma_r = \frac{\gamma V}{\gamma_{\text{H}_2\text{O}} V_{\text{H}_2\text{O}}} \Rightarrow \gamma_r = \frac{\gamma}{\gamma_{\text{H}_2\text{O}}} \quad \text{sendo} \quad \left\{ \begin{array}{l} \gamma = \rho g \\ \gamma_{\text{H}_2\text{O}} = \rho_{\text{H}_2\text{O}} g \end{array} \right.$$

$$\text{daí: } \gamma_r = \frac{\rho g}{\rho_{\text{H}_2\text{O}} g} \Rightarrow \gamma_r = \frac{\rho}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (1.5)$$

Exemplo de valores de peso específico relativo para alguns fluidos tem-se:

Água: $\gamma_r = 1$

Mercúrio: $\gamma_r = 13,6$

Ar: $\gamma_r = 0,0012$

d) volume específico V_s

$$V_s = \frac{V}{G} = \frac{1}{\gamma} \quad \text{sendo} \quad \left\{ \begin{array}{l} G - \text{peso} \\ V - \text{volume} \end{array} \right. \quad (1.6)$$

O volume específico pode ser expresso nos diferentes sistemas de unidades, como

$$\text{Sistema MK*S: } [\gamma] = \frac{\text{m}^3}{\text{kgf}}$$

segue:

$$\text{Sistema MKS: } [\gamma] = \frac{\text{m}^3}{\text{N}} \text{ (S.I.)}$$

$$\text{Sistema C.G.S.: } [\gamma] = \frac{\text{cm}^3}{\text{d}}$$

e) compressibilidade

A compressibilidade de um fluido depende do módulo de compressibilidade volumétrico ϵ_{vol} . Um fluido será mais ou menos compressível dependendo do valor de ϵ_{vol} , nunca incompressível. Pode-se também usar o conceito de escoamento incompressível, isto é, um escoamento de um fluido no qual a massa específica tem variação desprezível devido às pequenas variações na pressão atmosférica.

Sempre que se tratar de um **escoamento incompressível**, ou, idealmente, de um sistema com fluido incompressível, a **massa específica** será considerada **constante**.

A compressibilidade volumétrica de um fluido é definida pela relação entre o acréscimo de pressão dP e o decréscimo do volume $-dV$. Como a variação dV depende do volume V , o módulo de compressibilidade volumétrica é definido por:

$$\epsilon_{\text{vol}} = -V \frac{dP}{dV} \quad \text{Unidade: } \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \quad (1.7)$$

O módulo de compressibilidade varia muito pouco com a pressão, entretanto, varia apreciavelmente com a temperatura. Os gases têm ϵ_{vol} muito variável com a pressão e com a temperatura.

g) elasticidade

É a propriedade dos fluidos de aumentar o seu volume quando se diminui a pressão, Berthelot, em 1850, descobriu essa propriedade também para os líquidos pois para os gases, a propriedade já era bem conhecida:

$$dV = -\frac{1}{E} V dP \begin{cases} dP = P_{\text{final}} - P_{\text{inicial}} < 0 \\ dV > 0 \end{cases}; \quad \text{unidade: } \text{kgf/m}^2 \quad (1.8)$$

Onde: E é o módulo de elasticidade volumétrico (kgf/m^2) $\rightarrow R_{\text{gás}} = \frac{1}{E}$

1.3 - Equação Geral dos Gases Perfeitos

É a forma simplificada de relacionar o volume de um gás e a variáveis como temperatura e pressão. Por meio da hipótese de gás perfeito, a teoria cinética dos gases permite estabelecer uma constante universal dos gases **R**, que no SI, possui o seguinte valor:

$$R = 8,314510 \frac{\text{N.m}}{\text{mol.}^\circ\text{K}} \quad (1.9)$$

A equação dos gases perfeitos é uma relação entre a pressão absoluta, o volume específico molar e a constante universal dos gases:

$$PV = nRT \quad (1.10)$$

Onde: n é uma forma de quantificação da matéria em número de moles. O número de moles n pode ser obtido como:

$$n = \frac{m}{M} \quad (1.11)$$

Onde m é a massa total; M é a massa molecular do gás (kg/mol).

Substituindo a equação (1.11) em (1.10):

$$PV = mR_{\text{gás}}T \text{ sendo } R_{\text{gás}} = \frac{R}{M} \quad (1.12)$$

Sendo $R_{\text{gás}}$ a constante particular do gás, nas unidades $\frac{\text{N.m}}{\text{kg.}^\circ\text{K}}$

Para uma mesma massa de gás sujeita às condições diferentes:

$$\begin{aligned} \frac{P_1 V_1}{T_1} &= \frac{P_2 V_2}{T_2} = wR = \text{constante} \\ \frac{P_1 V_1}{w T_1} &= \frac{P_2 V_2}{w T_2} = R \rightarrow \frac{V}{w} = \frac{1}{\gamma} \\ \frac{P_1}{\gamma T_1} &= \frac{P_2}{\gamma T_2} = R = \text{constante} \end{aligned} \quad (1.13)$$

Para condições isotérmicas, ou seja, para uma mesma temperatura ($T_1=T_2$):

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \rightarrow P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (1.14)$$

Para condições adiabáticas, ou seja, não ocorre troca de calor:

$$\begin{aligned} P_1 V_1^{R_{\text{gas}}} &= P_2 V_2^{R_{\text{gas}}} \\ \frac{P_1}{P_2} &= \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{R_{\text{gas}}} \\ \frac{T_2}{T_1} &= \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{R_{\text{gas}}} \end{aligned} \quad (1.15)$$

1.4 - Atmosfera Padrão

A atmosfera terrestre é constituída de uma mistura de gases com alta predominância de nitrogênio e oxigênio que formam o que denominados de ar. Nas condições próximas ao nível do mar tem-se:

$$\text{ar} \begin{cases} 79\% \text{ de nitrogênio} \\ 21\% \text{ de oxigênio} \\ \text{demais gases porcentagem desprezível} \end{cases}$$

As condições físicas atmosféricas são variáveis em função da localização geográfica e do tempo. A pressão e a temperatura dependem da altura em relação ao nível do mar, além de apresentarem forte característica sazonal.

Para uniformizar os estudos que dependem das condições atmosféricas adota-se um valor-padrão para as condições normais e pressão e temperatura que se aproximam dos valores encontrados na atmosfera real e constituem a atmosfera-padrão. Os valores da atmosfera-padrão, no nível do mar (NM) são:

$$P_{\text{NM}} = 760 \text{ mmHg} = 102,325 \text{ KPa}$$

$$T_{\text{NM}} = 15^\circ\text{C} = 288^\circ\text{C}$$

$$\rho = 1,2232 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma = 11,99 \text{ N/m}^3$$

$$\mu = 1,777 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$$

A temperatura do ar, na atmosfera, decresce com a altura. A relação entre a temperatura (T) em graus Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) e a altura (z) em metros

$$T(^{\circ}\text{K}) = 288 - 0,006507z \quad (1.16)$$

1.5 - Pressão

A **pressão**, uma das grandezas mais importantes, é definida como a relação entre a força aplicada, perpendicularmente, sobre uma superfície e a área dessa superfície. Uma força tangencial agindo sobre uma superfície provoca uma tensão tangencial τ na superfície. Portanto, uma força normal agindo sobre uma superfície também provoca tensão normal denominada pressão e indicada pela letra

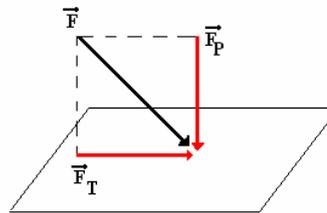


Figura 1.3: Esquema representativo da definição de pressão

Para melhor entendermos o conceito consideremos: Um cilindro no vácuo cheio de fluido, fechado em uma extremidade e munido de um pistão em outra, mantendo o fluido confinado no cilindro.

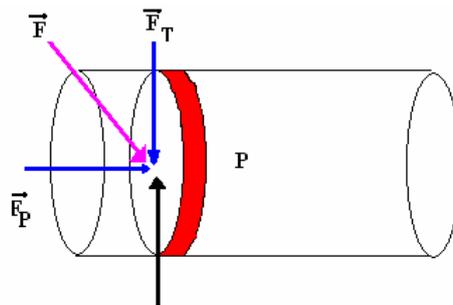


Figura 1.4: Esquema do cilindro para definição do conceito de pressão

O fluido age sobre toda a face do pistão, a reação é distribuída ao longo da face, gerando uma tensão normal que é uma medida da pressão do fluido sobre o pistão. A pressão é uma grandeza escalar não tendo direção e sentido associados. A força que a pressão causa no pistão é sempre de compressão e perpendicular à área onde age. A força de pressão é calculada por:

$$\vec{F}_p = \int_A \vec{P} dA \begin{cases} \vec{a} - \text{vetor associado à direção perpendicular à superfície considerada} \\ A - \text{área da superfície} \\ F_p - \text{força de pressão} \end{cases} \quad (1.17)$$

A unidade de pressão é definida pela relação entre as unidades de força e área e, no SI é dada por

$$[P] = \frac{[\vec{F}]}{[A]} = \frac{N}{m^2} = Pa \quad (1.18)$$

1.6 – Tensão Superficial e Capilaridade

Tensão superficial é a propriedade de a camada superficial exercer tensão e é a força necessária para manter o comprimento unitário do filme em equilíbrio. Logo, sua unidade é formada pela relação entre força e comprimento.

A tensão superficial também é importante no fenômeno da capilaridade, no qual intervém em conjunto com a capacidade de molhamento e adesão do líquido. Em um líquido que molha a superfície, a adesão é maior que a coesão e a ação da tensão superficial faz aparecer uma força que eleva o nível do líquido nas imediações de uma parede vertical. Se o líquido não molha a superfície, a tensão superficial é preponderante e força o nível a abaixar junto à parede vertical. Em tubos verticais de pequeno diâmetro imersos em água a superfície assume forma esférica e é denominada menisco. Para a água a forma do menisco é côncava e a tensão superficial força o líquido a se elevar no tubo, já para o mercúrio, que não molha a parede, o líquido é forçado a descer e essa variação do nível é denominada depressão ou elevação capilar e este fenômeno é denominado de **capilaridade**. (ROMA, 2003)

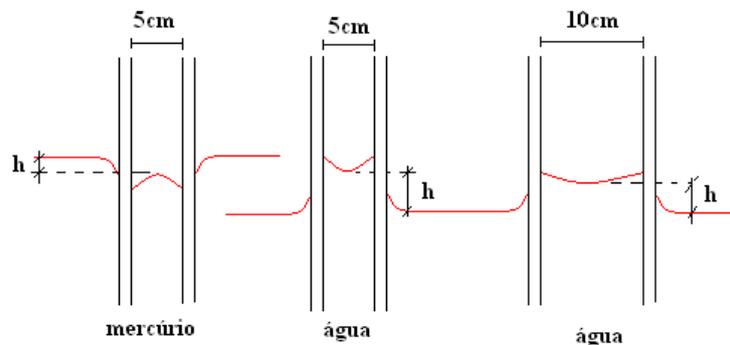


Figura 1.5: Capilaridade em tubos de diâmetros diferentes

1.7 – Escoamento de um Fluido em um Tubo

Existem várias camadas que se deslocam com velocidades diferentes, sendo a velocidade igual a zero junto à parede do tubo e máxima na parte central. Surgem, então, dois tipos de atrito:

- Atrito externo: resistência ao deslizamento do fluido ao longo de superfícies sólidas;
- Atrito interno ou viscosidade: resistência ao deslocamento mútuo das partículas do fluido.

1.8 – Viscosidade ou Atrito Interno

Durante o escoamento de um fluido observam-se um relativo movimento entre suas partículas, resultando um atrito entre as mesmas. Viscosidade ou Atrito Interno é a propriedade que determina o grau de resistência do fluido à força cisalhante, ou seja, resistir à deformação. Sejam duas placas largas e paralelas separadas por uma película de um fluido com espessura y .

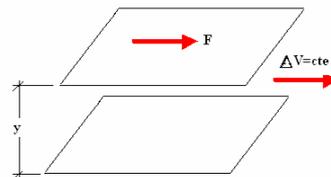


Figura 1.6: Esquema representativo da ação da viscosidade

$$\text{Lei de Newton} \rightarrow \text{força de atrito: } F = \mu \cdot A \cdot \frac{\Delta V}{y} \quad (1.19)$$

Onde: F é a força tangencial; A é a área; y é a espessura do fluido; ΔV é a velocidade e μ é o coeficiente de viscosidade dinâmica ou absoluta, característica de cada fluido. **DEPENDE DA TEMPERATURA.**

Mas a resistência à deformação, chamada de resistência viscosa, é dada por:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \mu \frac{\Delta V}{y} \quad (1.20)$$

1.9 – Viscosidade Específica

É a relação entre a viscosidade do fluido e da água a 20°C e 1 atm.

$$\mu_{\text{esp}} = \frac{\mu_{\text{fluido}}}{\mu_{\text{água}}^{20^\circ\text{C}, 1\text{atm}}} \quad (1.21)$$

1.10 – Viscosidade Cinética ou Cinemática

É a relação entre a viscosidade absoluta ou dinâmica e a massa específica do fluido.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{onde} \quad \begin{cases} \nu - \text{viscosidade cinemática} \\ \mu - \text{viscosidade absoluta} \\ \rho - \text{massa específica} \end{cases} \quad (1.22)$$

1.11 – Medidas de Viscosidade

a) **Viscosímetro de Michael (cilindros concêntricos):** mede a viscosidade absoluta ou dinâmica. Para os líquidos, quanto mais elevada for a temperatura, menor será a viscosidade e para os gases, temperaturas elevadas fornecem maiores valores para a viscosidade.

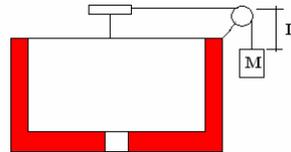
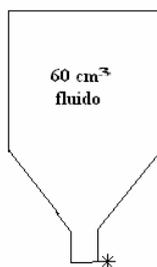


Figura 1.7 – Viscosímetro de Michael

$$\mu = \frac{kMt}{L} \quad \begin{cases} k - \text{constante do aparelho} \\ \mu - \text{viscosidade absoluta} \\ L - \text{comprimento da corda} \\ t - \text{tempo que a massa leva para percorrer um comprimento } L \end{cases} \quad (1.23)$$

b) **Viscosímetro de Saybott:** mede a viscosidade cinemática



$$\begin{aligned} \mu(\text{m}^2/\text{s}) &= 10^{-4} \left(0,002197t - \frac{1,798}{t} \right) \\ \mu(\text{cm}^2/\text{s}) &= 0,002197t - \frac{1,798}{t} \end{aligned} \quad (1.24)$$

t – é o tempo de escoamento, $t \geq 32\text{s}$

Figura 1.8: Viscosímetro de Saybott