



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

ENGENHARIA DE MATERIAIS

Mecânica dos Fluidos e Reologia

Prof. Dr. Sérgio R. Montoro

sergio.montoro@usp.br

srmontoro@dequi.eel.usp.br



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

MECÂNICA DOS FLUIDOS

ENGENHARIA DE MATERIAIS

AULA 2

...CONTINUAÇÃO...

**CONCEITOS E PROPRIEDADES FUNDAMENTAIS +
EXERCÍCIOS**



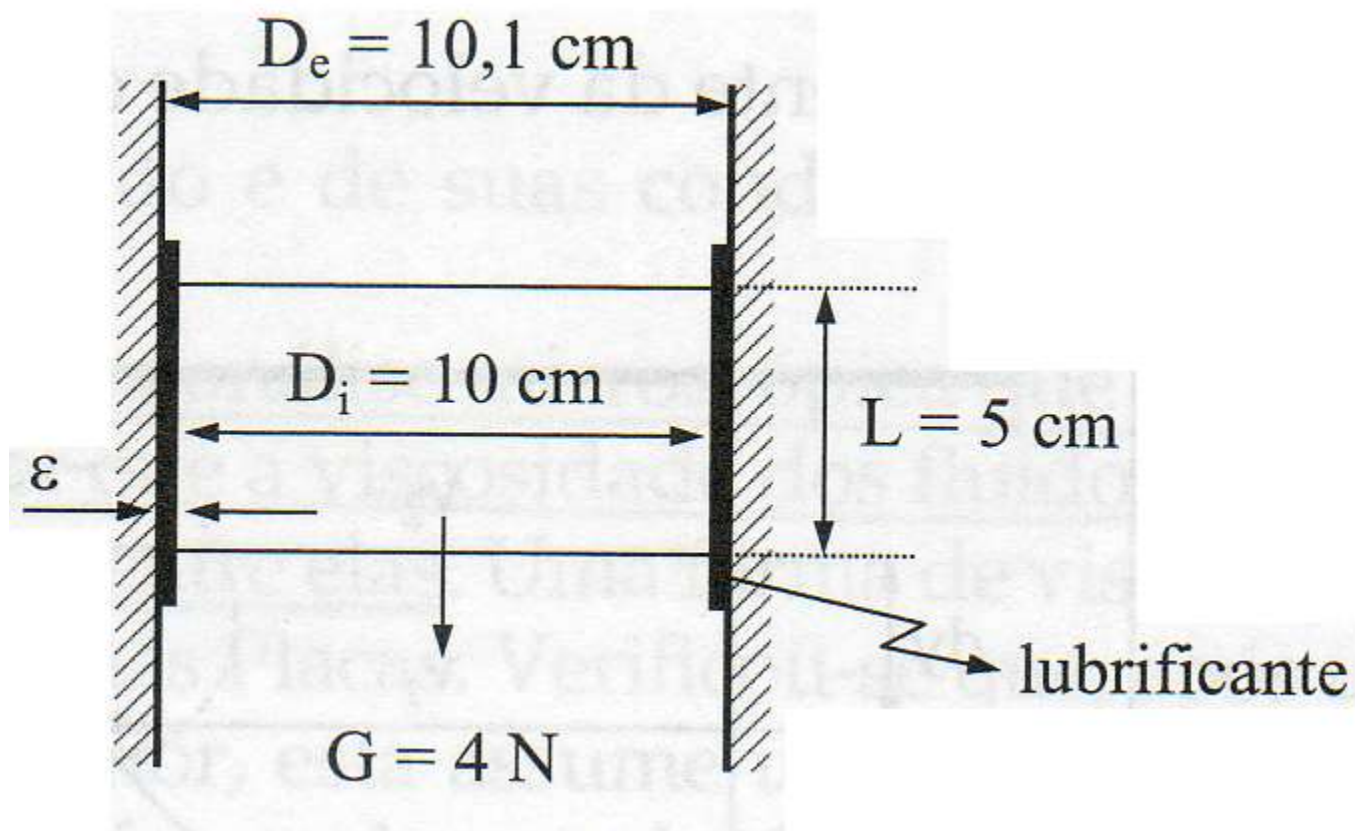
EXEMPLO 1 – Determinação da viscosidade dinâmica

Um pistão de peso $G = 4 \text{ N}$ cai dentro de um cilindro com uma velocidade constante de 2 m/s . O diâmetro do cilindro é $10,1 \text{ cm}$ e o do pistão é $10,0 \text{ cm}$. Determinar a viscosidade do lubrificante colocado na folga entre o pistão e o cilindro:

- a) Adotando um diagrama linear de velocidades;*
- b) Considerando um diagrama não linear de velocidades.*



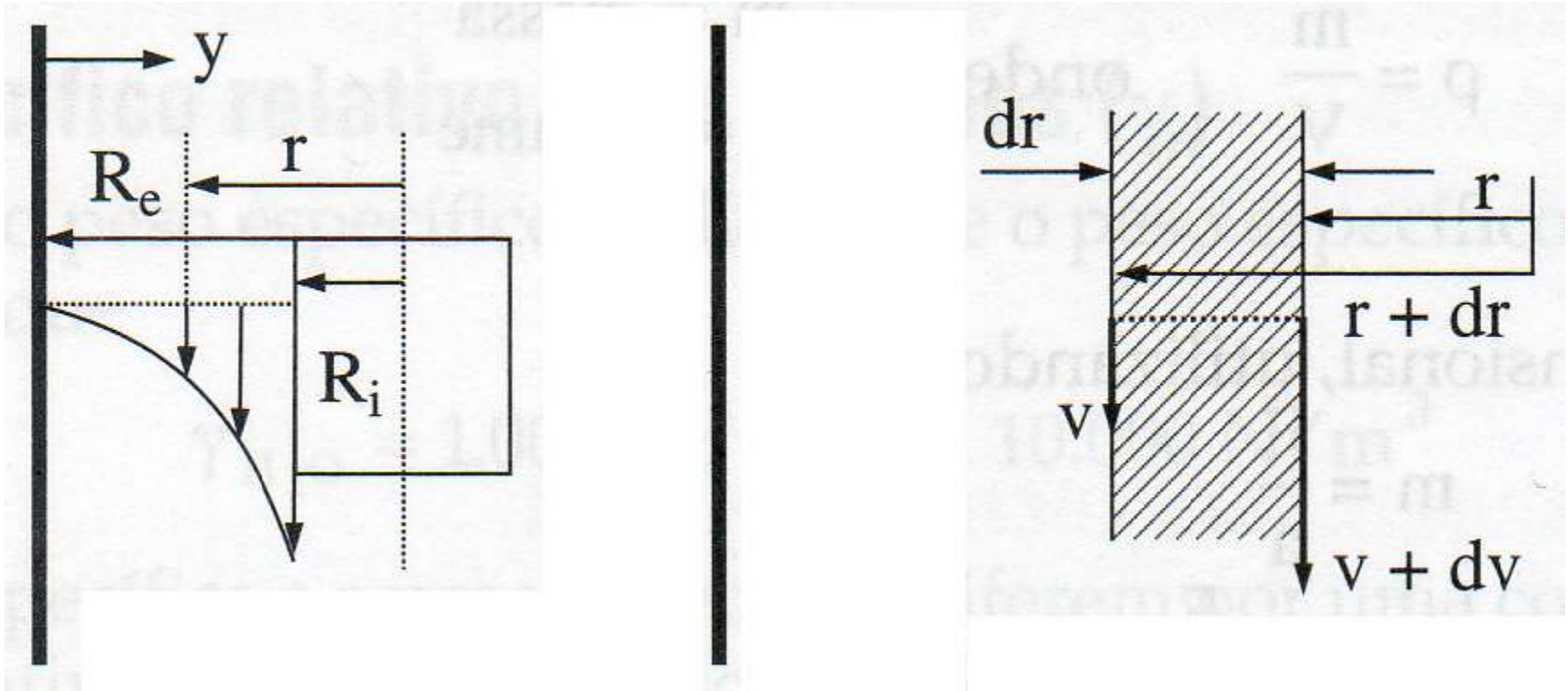
EXEMPLO – Determinação da viscosidade dinâmica





EXEMPLO – Determinação da viscosidade dinâmica

A seguir, o problema será resolvido também para o caso em que o diagrama não é linear.





EXEMPLO – Determinação da viscosidade dinâmica

Adotando-se uma coordenada polar $R_i \leq r \leq R_e$, para uma camada de espessura dr , a velocidade varia de $v + dv$ para v , criando o escorregamento que gera as tensões de cisalhamento.

Logo, $\tau = -\mu \frac{dv}{dr}$, pois para um dr positivo o v varia de um dv negativo.

Como cada camada se desloca com $v = \text{cte}$, isso significa que o peso, transmitido no contato com a primeira camada, equilibra-se com as tensões de cisalhamento um dr adiante.



EXEMPLO – Determinação da viscosidade dinâmica

Assim, para uma camada genérica:

$$\tau A = G \quad \text{ou} \quad -\mu \frac{dv}{dr} 2\pi r L = G$$

Ou, separando as variáveis:

$$2\pi L \mu dv = -\frac{G dr}{r}$$



EXEMPLO – Determinação da viscosidade dinâmica

Integrando de R_i a R_e , quando v varia de v a 0:

$$\int_v^0 2\pi L \mu dv = - \int_{R_i}^{R_e} G \frac{dr}{r}$$

$$-2\pi L \mu v = -G \ln \frac{R_e}{R_i}$$

$$\mu = \frac{G}{2\pi L v} \ln \frac{R_e}{R_i}$$



EXEMPLO – Determinação da viscosidade dinâmica

ou

$$\mu = \frac{G}{2\pi L_v} \ln \frac{D_e}{D_i}$$

$$\mu = \frac{4}{2\pi \times 0,05 \times 2} \ln \frac{10,1}{10} = 6,33 \times 10^{-2} \text{ N.s/m}^2$$

Note-se que esse seria o resultado correto. Então, o erro ao considerar o diagrama linear seria:

$$\text{Erro} = \frac{\mu_{\text{linear}} - \mu_{\text{real}}}{\mu_{\text{real}}} \times 100$$



EXEMPLO – Determinação da viscosidade dinâmica

$$\text{Erro} = \frac{6,37 \times 10^{-2} - 6,33 \times 10^{-2}}{6,33 \times 10^{-2}} \times 100 = 0,63\%$$

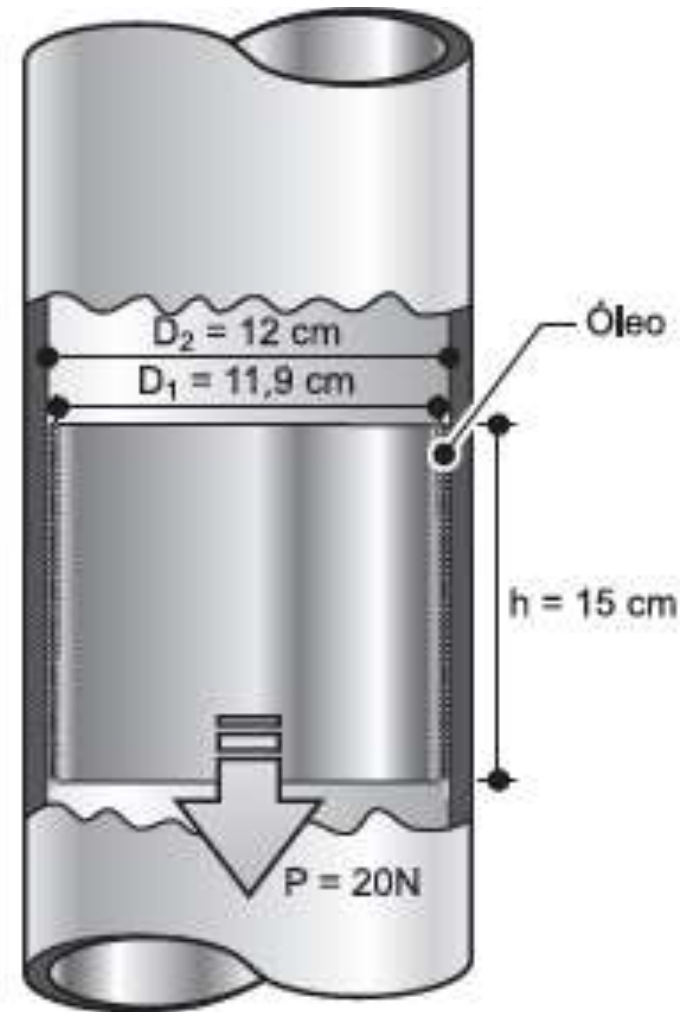
Que é um erro desprezível, comprovando que, quando a espessura do fluido é pequena, pode-se utilizar um diagrama linear.



EXEMPLO 2 – Determinação da velocidade

Um pistão de peso $P = 20 \text{ N}$, é liberado no topo de um tubo cilíndrico e começa a cair dentro deste sob a ação da gravidade. A parede interna do tubo foi besuntada com óleo com viscosidade dinâmica $\mu = 0,065 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$. O tubo é suficientemente longo para que a velocidade estacionária do pistão seja atingida. As dimensões do pistão e do tubo estão indicadas na figura ao lado.

Determine a velocidade estacionária do pistão V_0 .





UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

DEFINIÇÃO DE CONTÍNUO

Na nossa definição de fluido, nenhuma menção foi feita à estrutura molecular da matéria. Todos os fluidos são compostos de moléculas em constante movimento. Contudo, na maioria das aplicações de engenharia, estamos interessados nos efeitos médios ou macroscópicos de muitas moléculas. São esses efeitos macroscópicos que comumente percebemos e medimos. Tratamos, assim, um fluido como substância infinitamente divisível, um contínuo (ou *continuum*), e deixamos de lado o comportamento das moléculas individuais.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

O conceito de contínuo é a base da mecânica dos fluidos clássica.

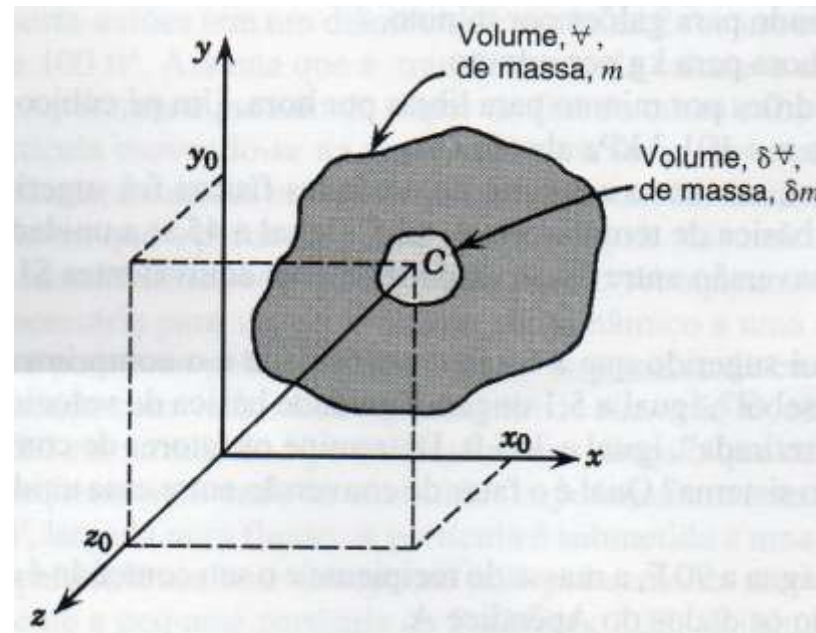
A hipótese é válida no tratamento do comportamento dos fluidos sob condições normais. Em consequência da hipótese do contínuo, cada propriedade do fluido é considerada como tendo um valor definido em cada ponto do espaço.

Dessa forma, propriedades dos fluidos, como massa específica, temperatura, velocidade, etc., são consideradas funções contínuas da posição e do tempo.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO Escola de Engenharia de Lorena – EEL

No estudo realizado será considerado, salvo menção contrária, que os fluidos são um meio contínuo e homogêneo, de forma que as propriedades médias definidas coincidam com as propriedades nos pontos.

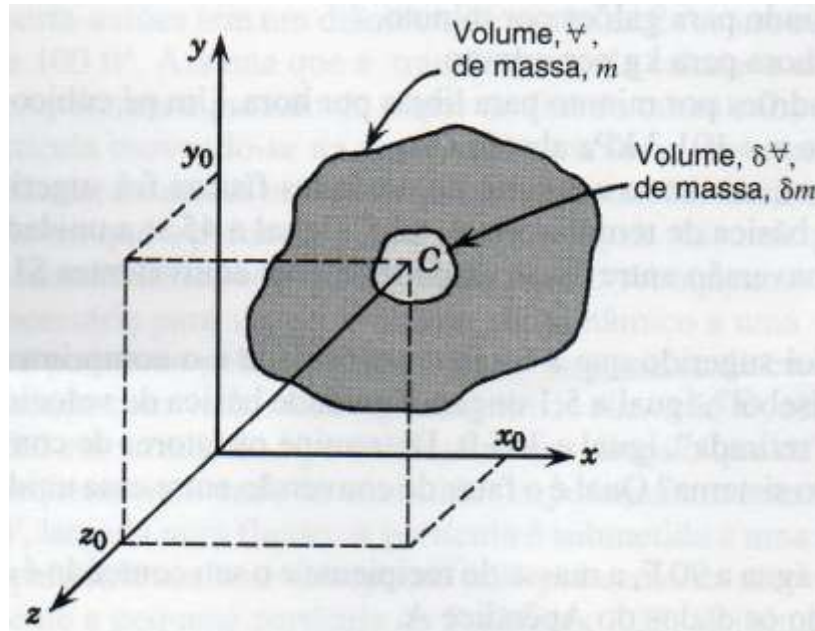


Tal hipótese facilita o estudo e permite introduzir definições simples para todas as propriedades dos fluidos.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de Lorena – EEL



Em resumo: região “grande” se comparada com a distância média entre as partículas. Por exemplo, uma região esférica.

OBSERVAÇÃO: as grandezas massa específica, pressão, velocidade, etc, variam continuamente dentro do fluido (ou são constantes).



MASSA ESPECÍFICA (ρ)

Massa específica é a massa de fluido por unidade de volume.

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

Onde:

m = massa

V = volume

Unidades

Por análise dimensional, utilizando FLT:

Sistema MK*S $\rightarrow$ kgf . s² / m⁴

Sistema SI $\rightarrow$ N . s² / m⁴ = kg/m³

Sistema CGS $\rightarrow$ dina . s² / cm⁴ = g/cm³



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

Para uma substância $\Rightarrow$ massa específica = densidade

Densidade de um objeto, de um corpo $\Rightarrow d = m / V$

Substância $\rightarrow$ densidade “relativa”

$$d_{rel} = \frac{d_{subst}}{d_{ref}}$$

Geralmente:

$$d_{rel} = \frac{d_{subst}}{d_{\text{água}; 4^{\circ}C}}$$



EXEMPLOS:

- 1-** *Um objeto feito em ouro maciço tem 500 g de massa e 25 cm^3 de volume. Determine a densidade do objeto e a massa específica do ouro.*

- 2-** *Um cubo de aresta 8 cm é homogêneo, exceto na sua parte central, onde existe uma região oca, na forma cilíndrica, de altura 4 cm e área da base 5 cm^2 . Sendo 1280 g a massa do cubo, determine a densidade do cubo e a massa específica da substância que o constitui.*



PESO ESPECÍFICO (γ)

Peso específico é o peso do fluido por unidade de volume.

$$\gamma = \frac{G}{V}$$

Onde:

G = peso

V = volume

Unidades

Por análise dimensional, tem-se:

Sistema MK*S $\rightarrow$ kgf/m³

Sistema SI $\rightarrow$ N . s² / m⁴ = N/m³

Sistema CGS $\rightarrow$ dina/cm³



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

Pode-se deduzir uma relação simples entre peso específico e massa específica:

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad \text{mas} \quad G = mg$$

$$\gamma = \frac{mg}{V} \quad \text{e} \quad \boxed{\gamma = \rho g}$$



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

PESO ESPECÍFICO RELATIVO PARA LÍQUIDOS(γ_r)

É a relação entre o peso específico do líquido e o peso específico da água em condições padrão.

Será adotado que:

$$\gamma_{H_2O} = 1.000 \text{ kgf} / \text{m}^3 \cong 10.000 \text{ N} / \text{m}^3$$

Como a massa específica e o peso específico diferem por uma constante, conclui-se que a massa específica relativa e o peso específico relativo coincidem.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

EXEMPLO

O peso específico relativo de uma substância é 0,8.

Qual será seu peso específico?



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

VISCOSIDADE CINEMÁTICA (ν)

Viscosidade cinemática é o quociente entre a viscosidade dinâmica e a massa específica.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Onde:

μ = viscosidade dinâmica

ρ = massa específica



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

Unidades

Por análise dimensional, utilizando FLT, teremos:

Sistema MK*S $\rightarrow$ m²/s

Sistema SI $\rightarrow$ m²/s

Sistema CGS $\rightarrow$ cm²/s = stoke (St)

Utiliza-se ainda o centistoke: 1 cSt = 0,01 St.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

OBSERVAÇÃO:

Das unidades, verifica-se que o nome – viscosidade cinemática – deve-se ao fato de essa grandeza não envolver força, mas somente comprimento e tempo, que são as grandezas fundamentais da Cinemática.



VOLUME ESPECÍFICO (v)

Volume específico é o volume ocupado pela unidade de massa de fluido.

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



PRESSÃO (p)

Pressão é o quociente entre a força normal aplicada e a área onde a força está sendo aplicada.

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

Unidades

Sistema MK*S → kgf/m²

Sistema SI → kg/m.s² = N/m² = pascal (Pa)



EXERCÍCIOS:

- 1-** *Um tijolo de 200 g e de dimensões 5 x 10 x 20 cm é apoiado sobre uma superfície horizontal. Determine as pressões que ele pode exercer.*

- 2-** *Uma banqueta de três pernas pesa 50 N e cada perna tem seção reta uniforme de área 5 cm². Subindo nela uma pessoa de 700 N, qual será a pressão que cada perna exercerá no solo horizontal?*



FLUIDO IDEAL

Fluido ideal é aquele cuja viscosidade é nula. Por essa definição conclui-se que é um fluido que escoa sem perdas de energia por atrito.

É claro que nenhum fluido possui essa propriedade; no entanto, será visto no decorrer do estudo que algumas vezes será interessante admitir essa hipótese, ou por razões didáticas ou pelo fato de a viscosidade ser um efeito secundário do fenômeno.



FLUIDO OU ESCOAMENTO INCOMPRESSÍVEL

Diz-se que um fluido é incompressível se o seu volume não varia ao modificar a pressão.

Isso implica o fato de que, se o fluido for incompressível, a sua massa específica não variará com a pressão.

É claro que na prática não existem fluidos nessas condições. Os líquidos, porém, têm um comportamento muito próximo a esse e na prática, normalmente, são considerados como tais.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de Lorena – EEL

Mesmo os gases em certas condições, em que não são submetidos a variações de pressão muito grandes, podem ser considerados incompressíveis. Um dos exemplos práticos é o estudo de ventilação, em que, em geral, essa hipótese é aceitável.

É importante compreender que nenhum fluido deve ser julgado de antemão. Sempre que ao longo do escoamento a variação da massa específica ρ for desprezível, o estudo do fluido será efetuado pelas leis estabelecidas para fluidos incompressíveis.



EQUAÇÃO DE ESTADO DOS GASES

Quando um fluido não puder ser considerado incompressível e, ao mesmo tempo, houver efeitos térmicos, haverá necessidade de determinar as variações da massa específica ρ em função da pressão e da temperatura.

De uma maneira geral, essas variações obedecem, para os gases, a lei do tipo

$$f(\rho, p, T) = 0$$

denominadas equações de estado.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

Para as finalidades desse desenvolvimento, sempre que for necessário, o gás envolvido será suposto como “gás perfeito”, obedecendo à equação de estado:

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad \text{ou} \quad \rho = \frac{p}{RT}$$

Onde:

p = pressão absoluta

R = constante cujo valor depende do gás

T = temperatura absoluta (K)



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

Para o ar, por exemplo, $R \cong 287 \text{ m}^2 / \text{s}^2 \text{ K}$.

Numa mudança do estado de um gás:

$$\frac{p_1}{p_2} \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{T_1}{T_2}$$

►► O processo é dito isotérmico quando na transformação não há variação de temperatura. Nesse caso:

$$\frac{p_1}{\rho_1} = \frac{p_2}{\rho_2} = cte$$



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

►► O processo é dito isobárico quando na transformação não há variação de pressão. Nesse caso:

$$\rho_1 T_1 = \rho_2 T_2 = cte$$

►► O processo é dito isocórico ou isométrico quando na transformação não há variação de volume. Nesse caso:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = cte$$



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

►► O processo é dito *adiabático* quando na transformação não há troca de calor. Nesse caso:

$$\frac{p_1}{\rho_1^k} = \frac{p_2}{\rho_2^k} = cte$$

Onde k é a chamada *constante adiabática* cujo valor depende do gás.

No caso do ar, $k = 1,4$.



EXEMPLO 1:

Numa tubulação escoia hidrogênio ($k = 1,4$; $R = 4.122 \text{ m}^2 / \text{s}^2 \text{ K}$).

Numa seção (1), $p_1 = 3 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ (abs) e $T_1 = 30^\circ\text{C}$. Ao longo da tubulação, a temperatura mantém-se constante.

Qual é a massa específica do gás numa seção (2), em que $p_2 = 1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ (abs)?



EXEMPLO 2:

Um volume de 10 m^3 de dióxido de carbono ($k = 1,28$) a 27°C e $133,3 \text{ kPa}$ (abs) é comprimido até se obter 2 m^3 .

Se a compressão for isotérmica, qual será a pressão final?

Qual seria a pressão final se o processo fosse adiabático?