

MECÂNICA DOS FLUIDOS

Noções e Aplicações

2ª edição revista e ampliada

SYLVIO R. BISTAFÁ

Blucher

Sylvio R. Bistafa
Ph.D. Penn State University
Professor Aposentado na Escola Politécnica da USP

MECÂNICA DOS FLUIDOS

Noções e Aplicações

2ª edição revista e ampliada

Mecânica dos fluidos – noções e aplicações

© 2016 Sylvio R. Bistafa

Editora Edgard Blücher Ltda.

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar

04531-934 – São Paulo – SP – Brasil

Tel.: 55 11 3078-5366

contato@blucher.com.br

www.blucher.com.br

Segundo o Novo Acordo Ortográfico, conforme 5. ed.
do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*,
Academia Brasileira de Letras, março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer
meios, sem autorização escrita da Editora.

Todos os direitos reservados pela Editora
Edgard Blücher Ltda.

Dados Internacionais de Catalogação
na Publicação (CIP)
Angélica Ilaqua CRB-8/7057

Bistafa, Sylvio R.

Mecânica dos fluidos: noções e aplicações / Sylvio
R. Bistafa. 2ª edição revista e ampliada – São Paulo:
Blucher, 2016.

Bibliografia

ISBN 978-85-212-1032-0

1. Mecânica dos fluidos 2. Engenharia mecânica
I. Título

16-0139

CDD-620.106

Índices para catálogo sistemático:

1. Mecânica dos fluidos

CONTEÚDO

INTRODUÇÃO	17
CAPÍTULO 1 – CONCEITOS FUNDAMENTAIS	21
1.1 NOÇÃO DE TENSÃO	21
1.2 DEFINIÇÃO DE FLUIDO	22
1.3 PARTÍCULA FLUIDA E CONTINUIDADE DO MEIO FLUIDO	25
1.4 ALGUMAS PROPRIEDADES DOS FLUIDOS	26
1.4.1 Massa específica	26
1.4.2 Peso específico	28
1.4.3 Viscosidade	28
1.5 EXERCÍCIOS	33
CAPÍTULO 2 – FLUIDOS EM REPOUSO	39
2.1 LEI DE STEVIN.....	39
2.2 PRESSÃO ABSOLUTA E PRESSÃO RELATIVA.....	40
2.2.1 Pressão atmosférica	41
2.2.2 O barômetro de mercúrio.....	42
2.3 MANÔMETROS	44
2.3.1 Piezômetro.....	44
2.3.2 Manômetro de tubo em “U”.....	45
2.3.3 Manômetro de tubo em “U” com líquido manométrico	46
2.3.4 Manômetro metálico ou de Bourdon	49
2.4 LEI DE PASCAL	51
2.5 EMPUXO SOBRE SUPERFÍCIES PLANAS.....	52
2.6 EMPUXO SOBRE SUPERFÍCIES CURVAS.....	56
2.7 PRINCÍPIO DE ARQUIMEDES	61
2.8 EXERCÍCIOS	63

CAPÍTULO 3 – FLUIDOS EM MOVIMENTO	75
3.1 EXPERIÊNCIA DE REYNOLDS.....	75
3.1.1 Tensão de cisalhamento turbulenta.....	78
3.2 LINHA DE CORRENTE E TUBO DE CORRENTE.....	81
3.2.1 Seção de escoamento.....	83
3.2.2 Regime permanente	83
3.3 VAZÃO EM VOLUME	84
3.3.1 Velocidade média na seção de escoamento.....	84
3.3.2 Método da coleta para determinação da vazão em volume	85
3.4 INTEGRAL GENERALIZADA DE FLUXO.....	86
3.4.1 Vazão em massa.....	87
3.4.2 Vazão em peso	87
3.4.3 Vazão de energia potencial	88
3.4.4 Vazão de energia cinética.....	88
3.4.5 Vazão de energia de pressão	89
3.4.6 Vazão de quantidade de movimento	90
3.4.7 Quadro sumário das vazões na seção de escoamento.....	92
3.5 EXERCÍCIOS.....	96
CAPÍTULO 4 – EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO PARA TUBO DE CORRENTE .	101
4.1 EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE.....	101
4.2 EQUAÇÃO DA ENERGIA.....	103
4.2.1 Equação de Bernoulli generalizada.....	111
4.3 EQUAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO	116
4.4 EQUAÇÃO DO MOMENTO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO.....	122
4.5 APLICABILIDADE DAS EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO INCOMPRESSÍVEIS NO ESCOAMENTO DE GASES	125
4.6 EXERCÍCIOS	131
CAPÍTULO 5 – ANÁLISE DIMENSIONAL E MODELOS FÍSICOS.....	145
5.1 MOTIVAÇÃO DO ESTUDO	145
5.2 PROCEDIMENTO PARA OBTENÇÃO DE MONÔMIOS ADIMENSIONAIS	152
5.3 PRINCIPAIS ADIMENSIONAIS DA MECÂNICA DOS FLUIDOS	159
5.4 MODELOS FÍSICOS	163
5.5 EXERCÍCIOS.....	171

CAPÍTULO 6 – ESCOAMENTO EM DUTOS	181
6.1 INTRODUÇÃO	181
6.2 PERDA DE CARGA EM DUTOS	182
6.2.1 Cálculo da perda de carga distribuída em dutos	182
6.2.2 Cálculo da perda de carga localizada.....	194
6.3 EXERCÍCIOS	202
CAPÍTULO 7 – EQUIPAMENTOS, MÁQUINAS E INSTALAÇÕES FLUIDOMECÂNICAS	209
7.1 MEDIDORES DE VAZÃO	209
7.2 VÁLVULAS DE CONTROLE	215
7.3 MÁQUINAS FLUIDOMECÂNICAS	219
7.3.1 Bombas	221
7.3.2 Ventiladores	229
7.3.3 Turbinas hidráulicas	241
7.4 INSTALAÇÕES FLUIDOMECÂNICAS	247
7.4.1 Exemplo de instalação elevatória	250
7.4.2 Exemplo de instalação com ventilador.....	260
7.4.3 Exemplo de instalação com turbina hidráulica	263
7.5 EXERCÍCIOS	266
CAPÍTULO 8 – ARRASTO E SUSTENTAÇÃO	277
8.1 INTRODUÇÃO	277
8.2 ARRASTO	278
8.2.1 Arrasto de pressão	279
8.2.2 Arrasto de atrito	292
8.2.3 Arrasto total	295
8.3 SUSTENTAÇÃO	300
8.3.1 Origem da sustentação.....	300
8.3.2 Determinação da sustentação.....	309
8.4 NOÇÕES DE AERODINÂMICA AUTOMOBILÍSTICA.....	322
8.4.1 Análise de desempenho do veículo, do ponto de vista do arrasto	323
8.4.2 Redução do arrasto	325
8.4.3 Redução da sustentação.....	331
8.4.4 Técnicas de projeto em aerodinâmica automobilística	333
8.5 EXERCÍCIOS	337

CONCEITOS FUNDAMENTAIS

1.1 NOÇÃO DE TENSÃO

O fluido é um meio material que não resiste à aplicação de forças pontuais. Conforme ilustra a Figura 1.1, tente exercer uma força pontual na superfície livre da água em um recipiente com o próprio dedo indicador. Não será surpresa verificar que a superfície livre da água se abre e o dedo afunda, sem resistência. No entanto, se colocarmos uma placa sólida sobre a superfície livre da água, que se ajuste às paredes do recipiente, sem folgas, e aplicarmos a força pontual sobre a placa, veremos que a água começa a resistir ao esforço pontual que é aplicado sobre a placa.

O que ocorreu nessa última situação, é que a força pontual distribuiu-se na superfície da placa e, através dela, sobre a superfície livre da água no recipiente, passando a água a resistir ao esforço pontual aplicado por meio da placa. Quando se deseja aplicar uma força a um fluido, ou dele receber uma força, deve haver sempre uma superfície interveniente. Força aplicada sobre uma superfície é a base do conceito de *tensão*.

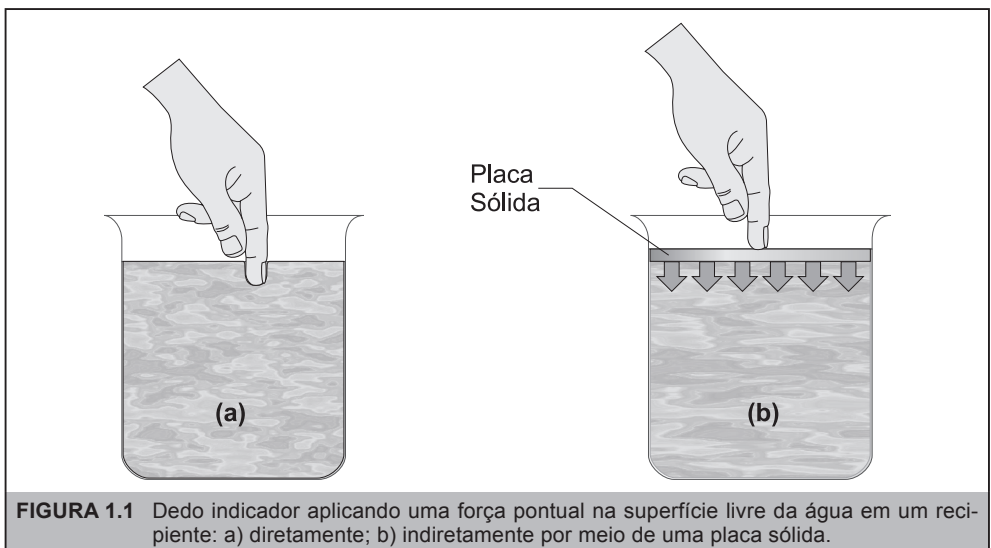


FIGURA 1.1 Dedo indicador aplicando uma força pontual na superfície livre da água em um recipiente: a) diretamente; b) indiretamente por meio de uma placa sólida.

A Figura 1.2 mostra um ponto P na superfície S de um meio material qualquer, e a superfície elementar dS , orientada segundo a normal \vec{n} e pertencente a S . Em P , temos aplicada uma força elementar $d\vec{F}$, que apresenta componentes normal e tangencial $d\vec{F}_n$ e $d\vec{F}_t$, respectivamente.

Define-se *tensão normal* por $\sigma = \frac{dF_n}{dS}$ e *tensão tangencial* (ou de *cisalhamento*) por $\tau = \frac{dF_t}{dS}$. Tensão é, portanto, uma força específica – força por unidade de área.

As unidades de tensão são $[\sigma, \tau] = \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$, $\text{kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$ (newton por metro quadrado, quilograma-força¹ por centímetro quadrado) etc.

Como será visto no item 1.4.3, nos fluidos, a tensão de cisalhamento τ é de origem viscosa. Por sua vez, a tensão normal poderá ser de tração, quando $d\vec{F}_n$ está orientado segundo \vec{n} , ou de compressão, quando $d\vec{F}_n$ está orientado segundo $-\vec{n}$. A tensão normal de compressão é o que chamamos de *pressão* p ; assim, de agora em diante, σ será substituído por p .

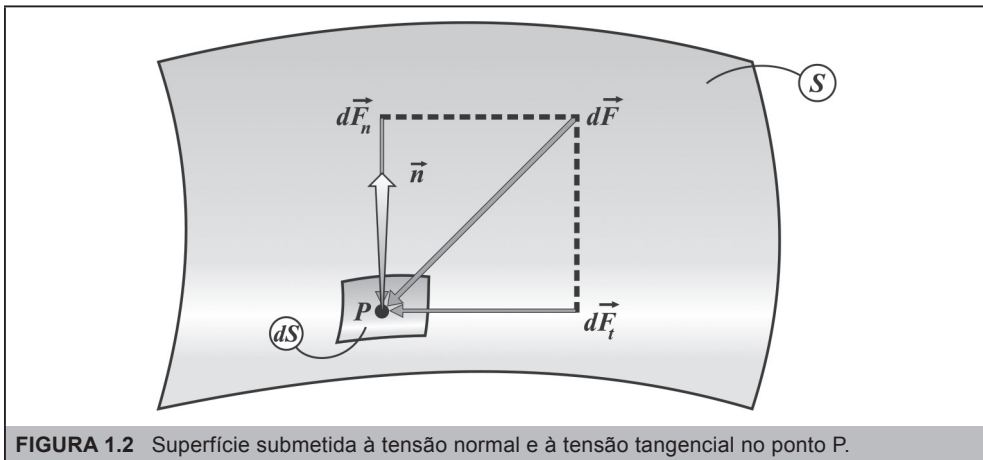


FIGURA 1.2 Superfície submetida à tensão normal e à tensão tangencial no ponto P.

1.2 DEFINIÇÃO DE FLUIDO

A maioria dos meios materiais apresentam os chamados *estados* (ou *fases*) da matéria. Os meios materiais podem ser encontrados na natureza em três estados físicos: sólido, líquido e gasoso. No estado sólido, os átomos ou moléculas que constituem a matéria encontram-se bem unidos em virtude da existência de forças intermoleculares intensas agindo sobre eles. Além disso,

¹O quilograma-força é uma unidade do antigo sistema técnico métrico (MKfS), de utilização formalmente desaconselhada, mas que, na engenharia, é algumas vezes mais prático. O seu valor em unidades SI é igual a 9,80665 N.

os sólidos possuem uma estrutura cristalina bastante regular, e essa estrutura repete-se. A energia das moléculas é baixa e elas mantêm-se praticamente em repouso. Os líquidos, por sua vez, apresentam forças de ligação menos intensas do que os sólidos, o que faz com que as moléculas fiquem mais afastadas umas das outras e movimentem-se mais livremente. Isso explica por que a matéria no estado líquido pode escoar e ocupar o volume do recipiente que a contém. No estado gasoso, praticamente inexistente força de ligação entre os átomos, que ficam separados uns dos outros por distâncias bem superiores às dos sólidos e líquidos, podendo ser facilmente comprimidos. Além disso, assumem a forma e o volume do recipiente em que são colocados.

A mudança do estado de uma matéria poderá ocorrer com a variação da temperatura. A Figura 1.3 mostra os diversos estados da água e as respectivas faixas de temperatura em que estes ocorrem. Verifica-se que a mudança de pressão exercida sobre a água implica a mudança da temperatura de fusão e ebulição. As temperaturas de fusão e de ebulição indicadas na figura são para a pressão atmosférica que existe no nível do mar.

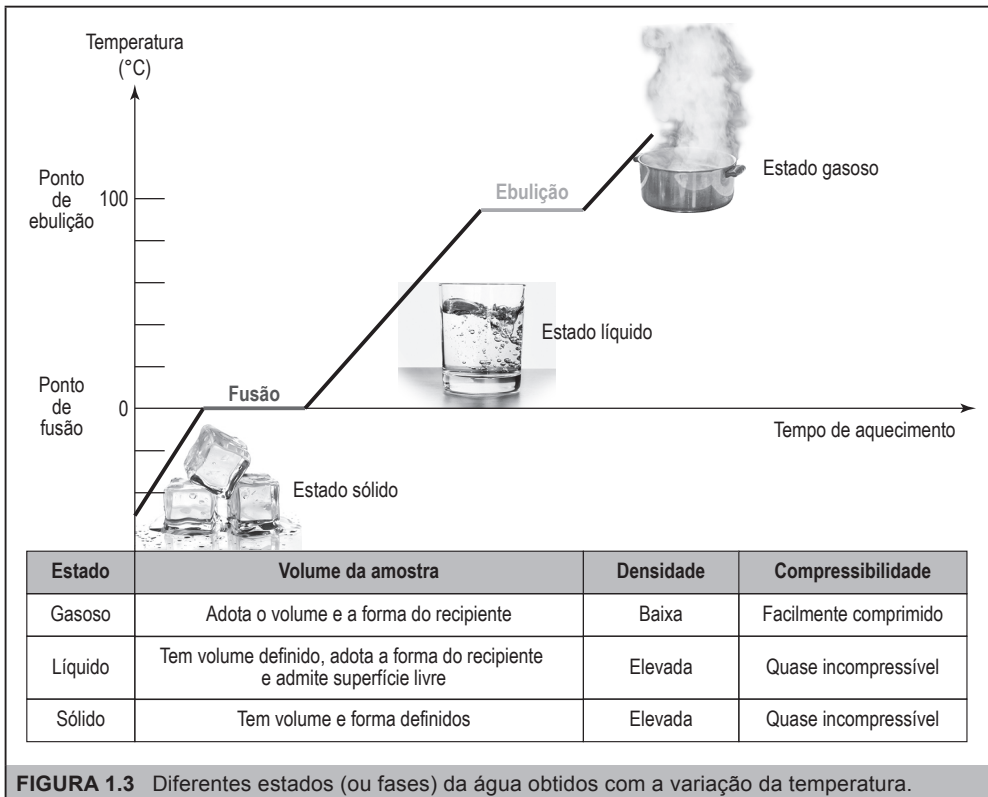


FIGURA 1.3 Diferentes estados (ou fases) da água obtidos com a variação da temperatura.

O quadro abaixo da Figura 1.3, associa os diversos estados da água com a noção intuitiva que temos de densidade e compressibilidade. Obviamente, na Mecânica dos Fluidos a água só é considerada nos estados líquido e gasoso.

Apesar de termos agora uma boa noção do que sejam os meios materiais fluidos, ainda carecemos de uma definição técnico-científica desses meios materiais. A Figura 1.4 mostra dois meios materiais, um sólido (um pedaço de borracha) e outro fluido (uma pequena porção de óleo), colocados entre o dedo indicador e o polegar. Nessa situação, aplica-se uma tensão tangencial em cada um desses dois meios materiais, fazendo com que o dedo indicador mova-se horizontalmente, enquanto mantém-se o polegar imóvel.

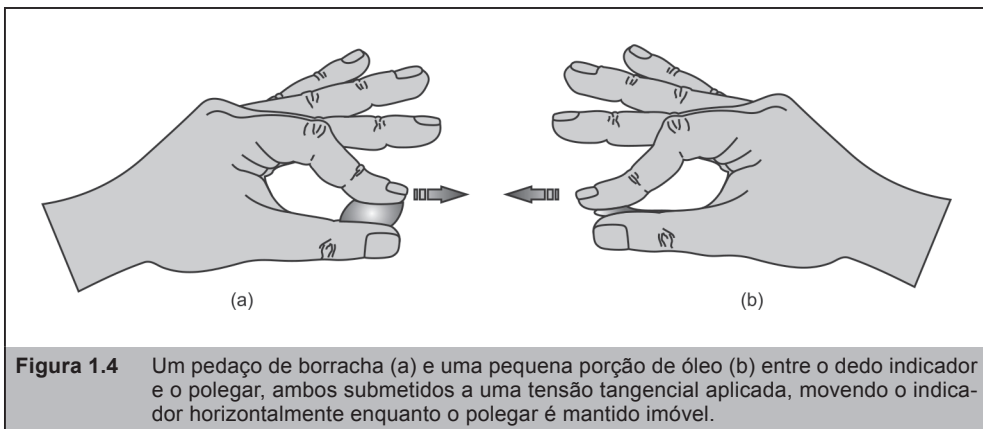


Figura 1.4 Um pedaço de borracha (a) e uma pequena porção de óleo (b) entre o dedo indicador e o polegar, ambos submetidos a uma tensão tangencial aplicada, movendo o indicador horizontalmente enquanto o polegar é mantido imóvel.

Uma vez aplicada a tensão tangencial na borracha, constata-se que ela deforma-se limitadamente, atingindo o equilíbrio estático, enquanto a película de óleo deforma-se continuamente, com o dedo indicador deslizando-se sobre o polegar. O que ocorre no caso da borracha, é que foram geradas reações internas que equilibraram a solicitação externa; enquanto, no óleo, isso não ocorreu. Porém, como será visto mais adiante, isso não significa que não são geradas reações internas no óleo; apenas que tais reações não conseguem equilibrar estaticamente a tensão tangencial externa aplicada.

Nessa experiência, a comparação do comportamento de um meio material sólido com um meio material fluido, permite definir esse último meio material da seguinte forma: *fluido é um meio material que, quando submetido a tensões tangenciais, por pequenas que sejam, deforma-se continuamente*.

Importante é ressaltar, nessa definição, a necessidade de que para um meio material ser considerado fluido, ele não deve resistir a tensões tangenciais “por pequenas que sejam”. De fato, há meios materiais, como o mel, que, a temperaturas elevadas, comporta-se como fluido; porém, quando o mel está a temperaturas suficientemente baixas (em dias frios, por exemplo), ele passa a re-

sistir a tensões tangenciais, deformando-se limitadamente, atingindo equilíbrio estático como se fosse sólido. Só a partir de certo valor de tensão tangencial aplicada é que ele passa a se deformar continuamente, escoando como fluido. A rigor, nessa última condição, o mel não pode ser considerado como fluido, pois resistiu, até certo ponto, a tensões tangenciais, como se fosse sólido.

1.3 PARTÍCULA FLUIDA E CONTINUIDADE DO MEIO FLUIDO

Como sabemos, todo meio material, sólido ou fluido, é constituído de partículas elementares denominadas átomos e moléculas. Essas partículas não são o que chamamos de partículas fluidas, porque não podemos caracterizar as propriedades do fluido por meio de um único átomo ou molécula, tampouco falar em continuidade do meio fluido, pois sabemos que essas partículas estão espaçadas entre si por uma distância média denominada livre percurso médio, não se podendo, portanto, falar, a rigor, em continuidade.

O que chamamos de *partícula fluida* é um volume, composto por um agregado de moléculas, que deve atender a duas condições. A primeira condição coloca um limite inferior a esse volume, requerendo que ele contenha um número representativo de moléculas. A segunda condição coloca um limite superior a esse volume, requerendo que ele tenha dimensões suficientemente pequenas quando comparadas com as menores dimensões da estrutura com a qual o fluido interage.

Um agregado de moléculas com volume da ordem de 10^{-9} mm³ satisfaz às duas condições supraenunciadas. Pode-se mostrar que esse volume contém, aproximadamente, 3×10^7 moléculas de ar em condições normais de temperatura e pressão (mais ainda de água no estado líquido) e, salvo casos extremos, uma medida de determinada grandeza feita com esse agregado de moléculas é, com uma grande margem de segurança, suficientemente representativa para que uma medida feita com um volume ainda maior não modifique o resultado anterior. Ainda, esse volume corresponde ao de um cubo com 10^{-3} mm de lado, sendo essa dimensão suficientemente pequena, uma vez que a dimensão característica, da maioria das estruturas de engenharia, é muito maior.

A partícula fluida com essas dimensões poderá ser, então, considerada como um ponto material, ou seja, um ponto de dimensões desprezíveis em face das dimensões da prática.

O fluido, por sua vez, poderá ser então considerado como sendo constituído por partículas fluidas, as quais formam um meio contínuo e homogêneo, em que tais partículas podem se deslocar livremente umas em relação às outras. Suas propriedades serão, então, funções de ponto, podendo essas propriedades variar suave e continuamente, de tal forma que o cálculo diferencial poderá ser utilizado na modelagem matemática do movimento do fluido. Não significa que o cálculo diferencial seja o foco dos desenvolvimentos

que faremos, apenas que a continuidade do meio fluido, com suas propriedades funções de ponto, são requisitos necessários para que ele possa ser aplicado quando necessário.

1.4 ALGUMAS PROPRIEDADES DOS FLUIDOS

Apresentaremos, a seguir, algumas propriedades dos fluidos que serão de uso frequente neste livro. Em certos capítulos, à medida da necessidade, definiremos outras propriedades. É interessante observar que a definição de apenas duas propriedades, *massa específica* e *viscosidade dinâmica*, nos capacita na maioria dos desenvolvimentos que faremos neste livro.

1.4.1 Massa específica

É a massa m de uma amostra do fluido dividida pelo seu volume V : $\rho = \frac{m}{V}$.

As unidades de massa específica são $[\rho] = \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $\text{kg} \cdot \text{l}^{-1}$ etc.

A Tabela 1.1 apresenta a massa específica de alguns fluidos, onde (ref.) é o valor de referência adotado na definição de *densidade*. A densidade δ é a relação entre a massa específica de uma substância e a de outra, tomada como referência $\delta = \rho/\rho_{\text{ref}}$. Para os líquidos, a referência adotada é a da água a 4 °C $\rho_{\text{ref}} = 1.000 \text{ kg/m}^3$; para os gases, a referência adotada é a do ar atmosférico a 0 °C $\rho_{\text{ref}} = 1,29 \text{ kg/m}^3$. Assim: $\delta_{\text{mercúrio}} = 13,6$, já que $\rho_{\text{mercúrio}} = 13.600 \text{ kg/m}^3$; $\delta_{\text{CO}_2} = 1,43$, já que $\rho_{\text{CO}_2} = 1,84 \text{ kg/m}^3$.

TABELA 1.1 Massas específicas de alguns fluidos².

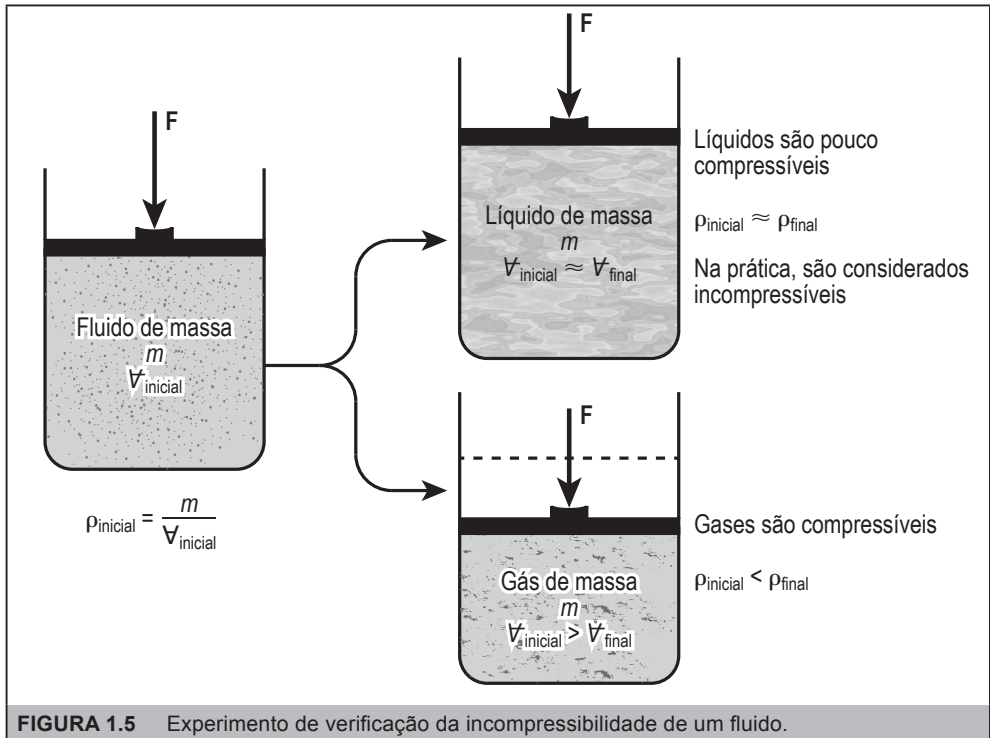
Fluido	ρ (kg/m ³)
Água destilada a 4 °C	1.000 (ref.)
Água do mar a 15 °C	1.030
Ar atmosférico à pressão atmosférica e 0 °C	1,29 (ref.)
Ar atmosférico à pressão atmosférica e 15,6 °C	1,22
Mercúrio	13.600
Petróleo	880

²Neste livro, será utilizado o ponto (.) como separador de milhares, e a vírgula (,) como separador decimal.

Fluido Incompressível

É aquele cujo volume não varia com a pressão. Os líquidos têm um comportamento muito próximo a esse; isto é, o volume \forall de uma amostra de líquido de massa m é praticamente independente da pressão. Isso implica o fato de que a massa específica $\rho = m/\forall = \text{cte}$. Os líquidos por serem pouco compressíveis, são, na prática, considerados como incompressíveis. Já os gases são fortemente compressíveis; sendo sua massa específica dependente da pressão. Para um *gás ideal*³, como o ar, submetido a um processo isotérmico, a relação entre a pressão e a massa específica é dada por $p/\rho = \text{cte}$.

A Figura 1.5 mostra um experimento que poderá ser realizado para demonstrar se um fluido é incompressível ou não. Nesse experimento, encerra-se uma determinada massa m de fluido em um cilindro, aplicando-se uma pressão crescente, por meio de um pistão. Como $\rho = m/\forall$, e como a massa no interior do cilindro não se altera, ao se submeter um líquido a pressões crescentes, o seu volume fica praticamente inalterado e, assim, $\forall_{\text{inicial}} \approx \forall_{\text{final}}$, o que implica $\rho_{\text{inicial}} \approx \rho_{\text{final}}$. Contrariamente nos gases, onde $\forall_{\text{inicial}} > \forall_{\text{final}}$, será $\rho_{\text{inicial}} < \rho_{\text{final}}$.



³Gás ideal é aquele que obedece à seguinte equação de estado: $p/\rho = RT$, em que p é a pressão, ρ é a massa específica, T é a temperatura e R é a constante do gás ($R_{\text{ar}} = 287 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$). Para $T = \text{cte}$ (processo isotérmico), $p_1/\rho_1 = p_2/\rho_2 = \text{cte}$.

Escoamento Incompressível

Embora os gases sejam compressíveis, tais fluidos escoando a “baixas” velocidades se comportam como fluidos incompressíveis — como veremos, este é frequentemente o caso em que o número de Mach do fluxo (a razão entre a velocidade do fluxo para a velocidade do som) é inferior a 0,3. A incompressibilidade é uma hipótese simplificadora, o que significa que podemos utilizar, nesses casos, as equações mais simples que governam os escoamentos dos fluidos incompressíveis. Por exemplo, escoamentos em sistemas de ventilação e ar-condicionado e sistemas de distribuição de gás domiciliar são, muitas vezes, tratados como incompressíveis.

1.4.2 Peso específico

É o peso G de uma amostra do fluido dividido pelo seu volume V : $\gamma = \frac{G}{V}$.

Como $G = m \cdot g$, em que g é a gravidade⁴, temos $\gamma = \rho \cdot g$.

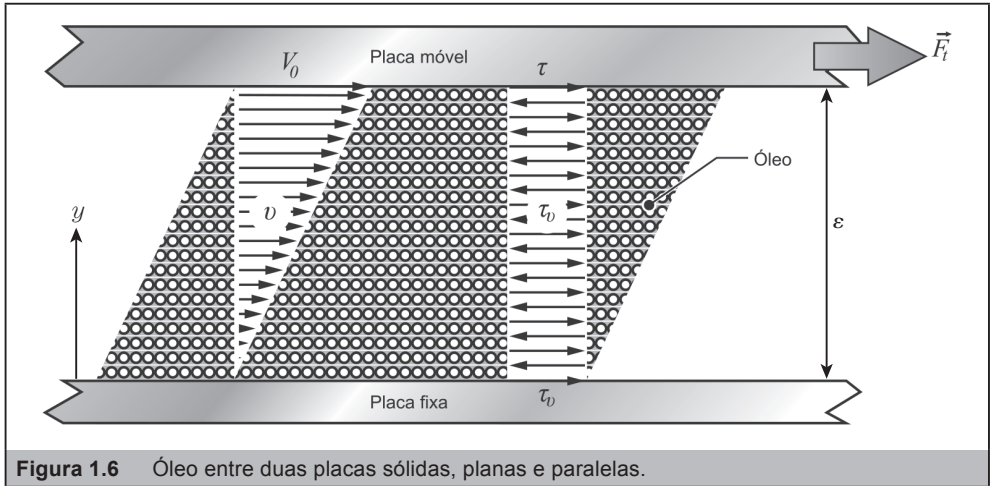
As unidades de peso específico são: $[\gamma] = \text{N} \cdot \text{m}^{-3}$, $\text{kgf} \cdot \text{m}^{-3}$ etc. Consequentemente, pode-se considerar o peso específico da água como sendo de 9.810 N/m^3 , e o do ar 12 N/m^3 , para oscilações normais da temperatura ambiente.

1.4.3 Viscosidade

Princípio da Aderência Completa: partículas fluidas em contato com superfícies sólidas adquirem a mesma velocidade dos pontos da superfície sólida com as quais estabelecem contato.

A Figura 1.6 pode ser interpretada como uma amplificação da porção de óleo entre o dedo indicador e o polegar da Figura 1.4, em que estes são agora representados por duas placas sólidas, planas e paralelas (a superior móvel e a inferior fixa), e o filme de óleo é representado por lâminas paralelas e justapostas, em que cada lâmina é formada por partículas fluidas. Uma força tangencial externa \vec{F}_t é aplicada à placa superior a qual transmite ao fluido a tensão tangencial τ . A placa superior acelera e, eventualmente, uma velocidade estacionária V_0 é atingida. Pelo princípio da aderência completa, a lâmina fluida, em contato com a placa superior, adquire a mesma velocidade V_0 dessa placa.

⁴O valor da *gravidade normal* g_n é $9,80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Nas aplicações, utilizaremos o valor aproximado para g de $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.



Por sua vez, a lâmina fluida, em contato com a placa inferior, tem velocidade zero, pois essa placa está fixa.

Conforme indicado na Figura 1.6, como as lâminas fluidas podem se movimentar umas em relação às outras, como cartas de um baralho, cada lâmina adquire uma velocidade própria v , compreendida entre zero e V_0 – as lâminas mais próximas da placa inferior com velocidades mais próximas de zero e aquelas mais próximas da placa superior com velocidades mais próximas de V_0 .

Para velocidades não muito elevadas⁵, a variação de velocidades para as lâminas fluidas entre as placas é linear, conforme mostra a tomada fotográfica da Figura 1.7.

Sendo as placas suficientemente longas, a velocidade estacionária da placa superior é finalmente atingida quando uma tensão tangencial de mesma magnitude e direção, porém em sentido contrário, é aplicada a essa placa. O único elemento externo capaz de exercer tal tensão é a lâmina fluida que ocupa posição imediatamente abaixo daquela em contato com a placa. Como as lâminas fluidas apresentam movimento relativo e como a variação de velocidade das lâminas é linear, a magnitude da tensão tangencial que se manifesta entre as diversas lâminas do fluido é igual àquela que o fluido aplica na placa (tanto na superior quanto na inferior). Essa tensão tem origem na viscosidade do fluido e, como tal, é chamada de *tensão viscosa* τ_v . Conforme indicado na Figura 1.6, quando a variação de velocidades é linear, a tensão viscosa é constante no filme de óleo.

O movimento estacionário da placa superior com velocidade constante é o resultado direto da aplicação da 2ª lei de Newton. Para a placa superior de

⁵ Esta condição requer que o movimento do fluido entre as placas seja *laminar*, movimento esse que será apresentado no Capítulo 3.

massa m , esta lei escreve-se: $\Sigma \vec{F}_{\text{externas}} = m \cdot \vec{a}$. Para V_0 constante, $\vec{a} = 0$, o que implica $\Sigma \vec{F}_{\text{externas}} = 0$. As forças externas que agem na placa superior são: a força que movimenta a placa \vec{F}_t e força viscosa \vec{F}_v que o fluido aplica na placa.

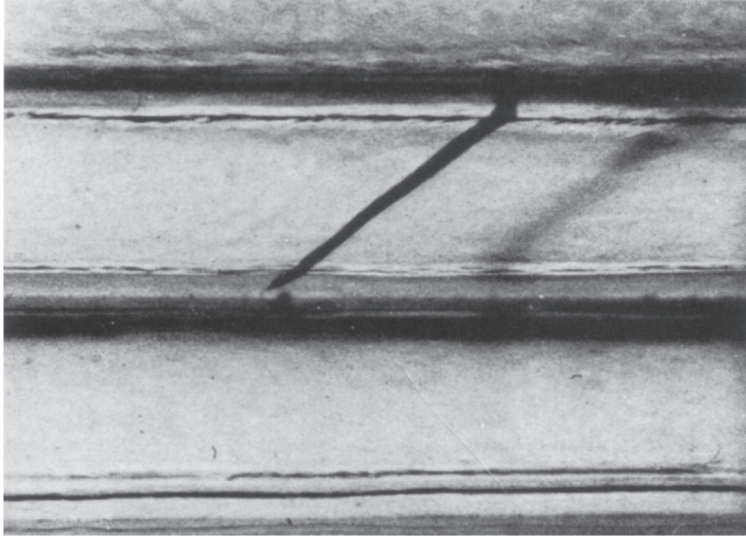


Figura 1.7 Tomada fotográfica* da variação linear de velocidades do escoamento de glicerina entre duas placas paralelas distanciadas de 20 mm, com a placa superior movendo-se com uma velocidade de 2 mm/s. Fonte: *Visualized Flow – Fluid motion in basic and engineering situations revealed by flow visualization*. Pergamon Press – The Japan Society of Mechanical Engineers, 1988.

Como o somatório das forças externas na placa superior deve ser zero para V_0 constante, isso implica que $\vec{F}_t = \vec{F}_v$. Como

$$\tau = \frac{F_t}{S_{\text{placa}}} \text{ e como } \tau_v = \frac{F_v}{S_{\text{placa}}},$$

em que S_{placa} é a área da placa em contato com o fluido, resulta em $\tau = \tau_v$, no equilíbrio.

A tensão viscosa pode ser calculada por meio de

$$\tau_v = \mu \frac{dv}{dy}, \quad (1.1)$$

* Estando as duas placas paradas, o espaço entre elas foi preenchido com glicerina, sendo que uma seringa foi usada para injetar uma pequena quantidade de corante, de tal forma a gerar uma linha reta perpendicular às placas. A placa superior foi então movimentada com uma velocidade constante, enquanto a placa inferior permaneceu parada. A deformação resultante da linha marcada com corante foi então fotografada. Esse escoamento é conhecido como *escoamento de Couette*.

em que $\frac{dv}{dy}$ é o gradiente de velocidades no filme de óleo e μ é a *viscosidade dinâmica* do fluido. Esse resultado é conhecido como *lei de Newton da viscosidade*, pois Newton foi pioneiro em postulá-la em 1687.

Essa lei indica que, quando a distribuição de velocidades no filme de óleo é linear, o gradiente de velocidades é uma constante: $\frac{dv}{dy} = \frac{\Delta V}{\Delta y} = \frac{V_0 - 0}{\varepsilon} = \frac{V_0}{\varepsilon} = cte.$, onde ε é a espessura do filme de óleo entre as placas. Este resultado mostra que a tensão viscosa tem um valor fixo não só entre as lâminas, como também nas placas inferior e superior.

Os fluidos que seguem a lei de Newton da viscosidade são chamados de *fluidos newtonianos*, tais como o ar, a água e a gasolina, entre outros. Exemplos de fluidos *não newtonianos* são: tintas, soluções poliméricas, produtos alimentícios, como sucos e molhos; suspensões de corpúsculos sólidos como sangue, pastas de argila, cimento e carvão.

Isolando-se a viscosidade dinâmica no primeiro da Eq. (1.1), obtêm-se suas unidades por meio de

$$[\mu] = \left[\tau_v \left(\frac{dv}{dy} \right)^{-1} \right] = \text{N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s} = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}.$$

A viscosidade dinâmica é uma propriedade do fluido, com valor dependente da temperatura, sendo praticamente independente da pressão.

A origem da viscosidade ocorre em nível molecular, sendo determinada pela força de coesão das moléculas e pelo choque entre elas. Nos líquidos, as forças de coesão predominam sobre os choques. Nesses fluidos, o aumento da temperatura reduz as forças de coesão, com conseqüente redução da viscosidade. Nos gases, os choques predominam sobre as forças de coesão. Nesses fluidos, o aumento da temperatura aumenta os choques, com conseqüente aumento da viscosidade.

À temperatura ambiente, a viscosidade dinâmica da água é da ordem de $10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$, e a do ar é da ordem de $1,8 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$. À temperatura ambiente, o óleo automotivo SAE 10W tem viscosidade de $10^{-1} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$, que é cem vezes maior que a da água; enquanto a viscosidade desta é 56 vezes maior que a do ar.

A *viscosidade cinemática* ν é definida por $\nu = \frac{\mu}{\rho}$, em que ρ é a massa específica do fluido.

As unidades de viscosidade cinemática são $[\nu] = \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, que contêm somente unidades cinemáticas, daí o seu nome.

À temperatura ambiente, a viscosidade cinemática da água é da ordem de $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, e a do ar é da ordem de $1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Exemplo de aplicação da lei de Newton da viscosidade

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 $\mu = 0,065 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

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 1.8. Determine a velocidade estacionária do pistão V_0 .

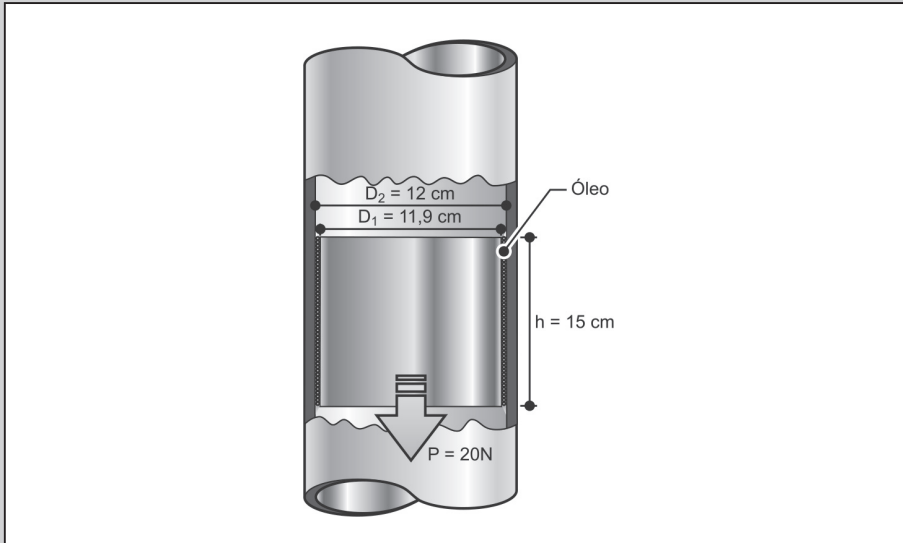


Figura 1.8 Pistão caindo sob a ação da gravidade dentro de um tubo cilíndrico com a parede interna besuntada de óleo.

Solução

A Figura 1.9 apresenta uma amplificação do filme de óleo entre o pistão e o tubo cilíndrico, com indicação da variação linear de velocidades no filme. Nessa figura, ε é a folga entre o pistão e o tubo.

No equilíbrio ($V_0 = \text{cte.}$), a força viscosa equilibra o peso do pistão $F_v = P$. Mas $F_v = \tau_v \cdot S_L$, em que S_L é a área lateral do pistão dada por $S_L = \pi \cdot D_1 \cdot h$. Por sua vez, a tensão viscosa τ_v na parede do pistão é constante e dada por

$$\tau_v = \mu \frac{dv}{dy} \quad (\text{lei de Newton da viscosidade}).$$

Daí,

$$P = \mu \frac{dv}{dy} \cdot \pi \cdot D_1 \cdot h. \quad (\text{A})$$

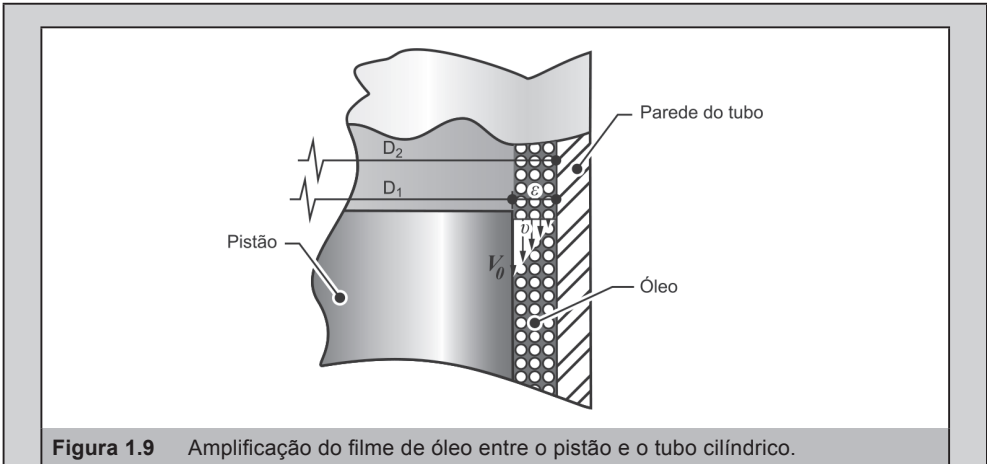


Figura 1.9 Amplificação do filme de óleo entre o pistão e o tubo cilíndrico.

Para variação linear de velocidades no filme de óleo, o gradiente de velocidades é constante e dado por

$$\frac{dv}{dy} = \frac{\Delta v}{\Delta y} = \frac{V_0 - 0}{\varepsilon} = \frac{V_0}{\varepsilon} \quad (B)$$

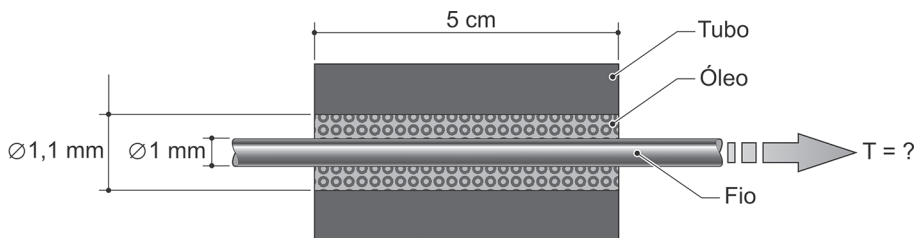
Substituindo a Eq. (B) na Eq. (A) e isolando V_0 no primeiro membro, obtém-se

$$V_0 = \frac{P \cdot \varepsilon}{\mu \cdot \pi \cdot D_1 \cdot h}, \text{ com } \varepsilon = \frac{D_2 - D_1}{2} = 0,05 \text{ cm.}$$

$$V_0 = \frac{20 \cdot 0,05 \times 10^{-2}}{0,065 \cdot \pi \cdot 11,9 \times 10^{-2} \cdot 15 \times 10^{-2}} = 2,74 \text{ m/s.}$$

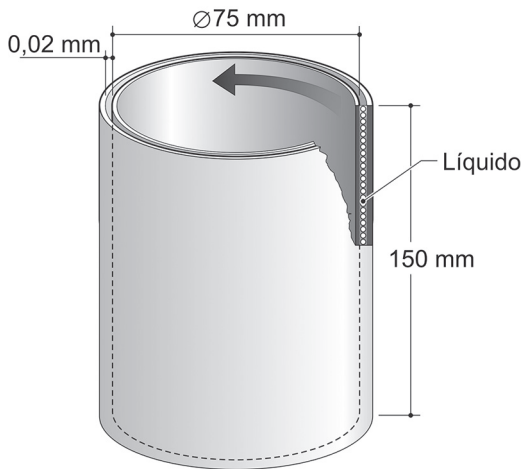
1.5 EXERCÍCIOS

- Um fio metálico de 1,0 mm de diâmetro é tracionado com velocidade constante de 1 m/s, através de um tubo fixo com diâmetro interno de 1,1 mm e comprimento de 5 cm. O fio pode ser considerado centrado no tubo pela presença de óleo lubrificante com viscosidade dinâmica $m = 0,4 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$. Determine a força de tração T necessária no fio. Resposta: $T = 1,26 \text{ N}$.

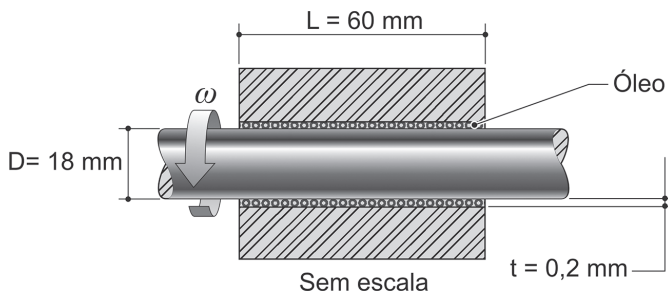


Sem escala

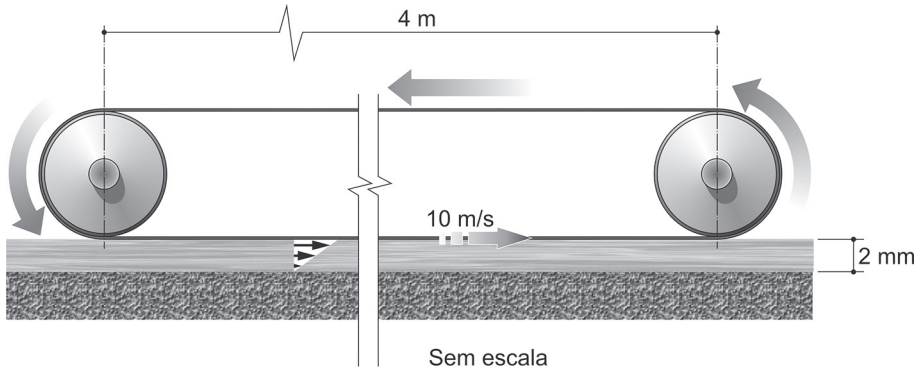
- 2 Um viscosímetro é formado por dois cilindros concêntricos, conforme indica a figura. Para pequenas folgas, pode-se supor um perfil de velocidades linear no líquido que preenche o espaço anular. O cilindro interno tem 75 mm de diâmetro e 150 mm de altura, sendo a folga para o cilindro externo de 0,02 mm. Um torque de $0,021 \text{ N} \cdot \text{m}$ é necessário para girar o cilindro interno a 100 rpm. Determine a viscosidade dinâmica do líquido na folga do viscosímetro. Resposta: $\mu = 8,07 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$.



- 3 Um eixo com diâmetro de 18 mm gira a 20 rotações por segundo dentro de um mancal de sustentação estacionário de 60 mm de comprimento, conforme indica a figura. Uma película de óleo de 0,2 mm preenche a folga anular entre o eixo e o mancal. O torque necessário para girar o eixo é de $0,0036 \text{ N} \cdot \text{m}$. Estime a viscosidade dinâmica do óleo que se encontra na folga. Supor um perfil de velocidades linear no óleo que preenche a folga. Resposta: $\mu = 0,0208 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$.



- 4 Uma correia com largura de 60 cm se move, como mostra a figura. Calcule a potência (HP) necessária para acionar a correia na água. Dados: $\mu_{\text{água}} = 1,31 \times 10^{-3}\text{ Kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; $746\text{ watts} = 1\text{ HP}$. Resposta: $0,210\text{ HP}$.



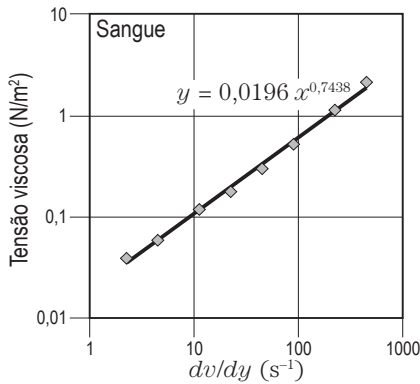
- 5 Quando um veículo é freado bruscamente em uma pista molhada, poderá ocorrer o bloqueio das rodas, provocando a chamada *hidroplanagem*. Nessas circunstâncias, uma película de água é criada entre os pneus e a pista. Teoricamente, um veículo poderia deslizar por um caminho muito longo nessas condições, embora na prática, o filme seja destruído antes de tais distâncias serem alcançadas (na verdade, faixas de rodagem são projetadas para evitar a criação de tais filmes).



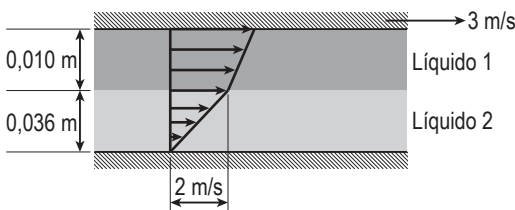
Para analisar essa situação, considere um veículo de massa M , deslizando sobre um plano horizontal, coberto com uma película de água com viscosidade μ . Sendo A a área dos quatro pneus em contato com o filme e h a espessura do filme (considerada uniforme), pedem-se: a) se a velocidade do veículo em algum instante é $V(t)$, encontrar a força de desaceleração F_d do veículo, nesse instante, em termos de A , $V(t)$, h , e μ .

Resposta: $F_d = \mu \frac{V(t)}{h} = A$. b) Encontre a distância L que o veículo percorreria até o repouso, supondo que A e h permaneçam constantes (isto não é, naturalmente, muito realista. Resposta: $L = V_0 \frac{Mh}{\mu A}$. c) Qual é essa distância L para um veículo de 1.000 kg, se $A = 0,1 \text{ m}^2$, $h = 0,1 \text{ mm}$, $V = 10 \text{ m/s}$, e a viscosidade da água é $10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$. Resposta: 10 km.

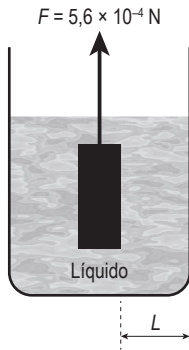
- 6 A viscosidade de uma pequena amostra de sangue foi determinada a partir de medições de tensão de cisalhamento (tensão viscosa) e taxa de deformação (dv/dy) em um viscosímetro adequado. O gráfico abaixo apresenta a curva que foi ajustada aos dados experimentais obtidos. Determine se o sangue é um fluido newtoniano ou um fluido não newtoniano. Resposta: Não newtoniano (explique).



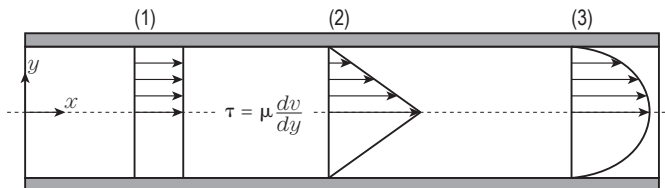
- 7 Duas camadas imiscíveis de líquidos newtonianos são arrastadas pelo movimento da placa superior, como mostrado na figura. A placa inferior é fixa e o perfil de velocidades em cada líquido é linear. O líquido da camada superior (líquido 1), com densidade de 0,8 e viscosidade cinemática de $1 \text{ mm}^2/\text{s}$, aplica uma tensão de cisalhamento na placa superior. O líquido da camada inferior (líquido 2), com densidade de 1,1 e viscosidade cinemática de $1,3 \text{ mm}^2/\text{s}$, aplica uma tensão de cisalhamento na placa inferior. Determine a relação entre a tensão de cisalhamento na placa superior e a tensão de cisalhamento na placa inferior. Resposta: $\frac{\tau_{\text{sup.}}}{\tau_{\text{inf.}}} = 1,0$.



- 8 Uma placa quadrada de 8,367 cm de lado, de peso e espessura desprezíveis, imersa em um líquido de viscosidade μ , é puxada verticalmente para cima com uma força $F = 5,6 \times 10^{-4}$ N, conforme mostra a figura. Determine a viscosidade μ do líquido, sabendo-se que a velocidade estacionária de deslocamento da placa $V_0 = 1$ cm/s e que a distância entre a face da placa e a parede do recipiente $L = 5$ mm. Resposta: $\mu = 0,02$ Ns/m².

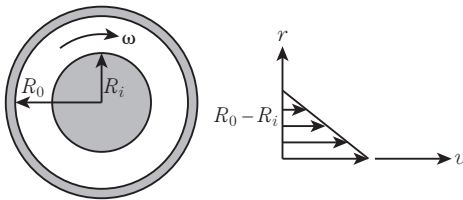


- 9 Duas grandes superfícies planas mantêm uma distância H . O espaço entre elas está preenchido com um fluido.
- Se o fluido for considerado não viscoso (perfeito) qual será a tensão de cisalhamento na parede da placa superior?
 - Se o perfil de velocidades for uniforme (1). Qual será a magnitude da tensão de cisalhamento na parede inferior comparada com a tensão de cisalhamento no centro das placas?
 - Se o perfil de velocidades for uma reta inclinada (2). Onde a tensão de cisalhamento será maior?
 - Se o perfil de velocidades for parabólico (3). Onde a tensão de cisalhamento será menor?

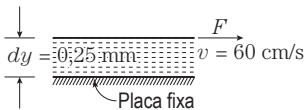


Respostas: a) nula; b) ambas nulas; c) iguais em todos os pontos; d) no centro. Explique.

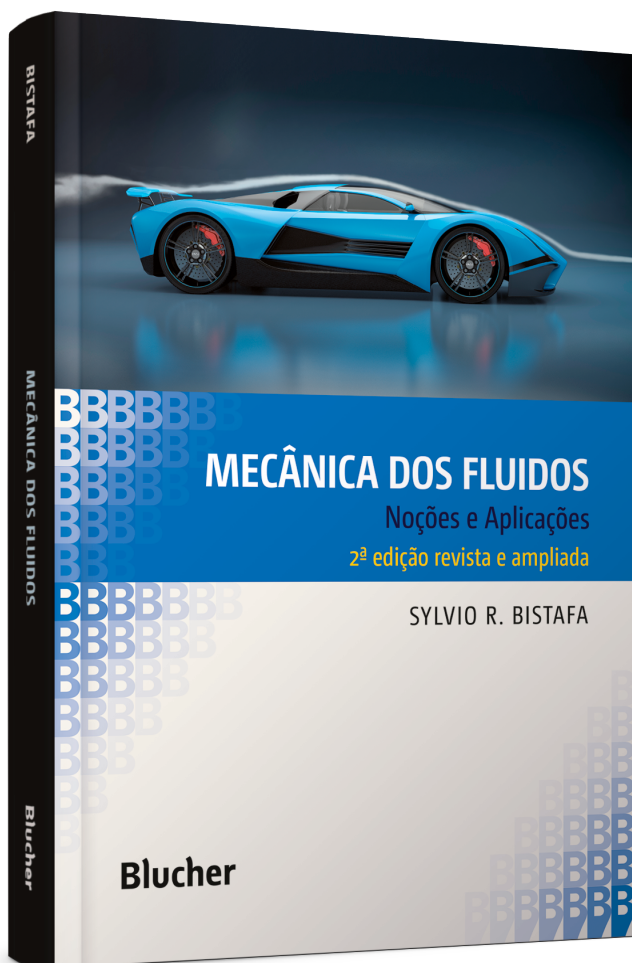
- 10 Um eixo de raio R_i e comprimento h gira com velocidade angular ω no interior de um mancal de raio R_0 . O gap entre o eixo e o mancal é preenchido com um filme de óleo com comportamento Newtoniano de viscosidade dinâmica μ . Admitindo um perfil linear de velocidades no filme de óleo, desenvolva expressões para: a) as tensões de cisalhamento de origem viscosa no filme de óleo, na superfície do eixo e na superfície do mancal. Resposta: $\tau_v = \mu \frac{\omega R_i}{(R_0 - R_i)}$, no óleo, no eixo e no mancal. b) A força de origem viscosa que age na superfície do eixo. Resposta: $F_v = 2\mu\pi \frac{\omega R_i^2 h}{(R_0 - R_i)}$. c) O torque necessário para manter o eixo girando na velocidade angular ω . Resposta: $T = 2\mu\pi \frac{\omega R_i^3 h}{(R_0 - R_i)}$. d) Obter uma expressão para viscosidade em função das características geométricas do eixo/mancal, do torque T e da velocidade angular ω . Resposta: $\mu = \frac{T(R_0 - R_i)}{2\pi\omega R_i^3 h}$.



- 11 Uma placa móvel, dista 0,025 mm de uma placa fixa, e requer uma força de 2 N por unidade de área para ser movida a uma velocidade de 60 cm/s. Determine a viscosidade do fluido entre as placas. Resposta: $8,33 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$.



- 12 Determine a viscosidade cinemática de um óleo com massa específica de $981 \text{ kg}/\text{m}^3$. A tensão viscosa em um determinado ponto do óleo é de $0,2452 \text{ N}/\text{m}^2$, onde o gradiente de velocidades é $0,2 \text{ s}^{-1}$. Resposta: $12,5 \text{ cm}^2/\text{s}$.



Clique aqui e:

[Veja na loja](#)

Mecânica dos Fluidos Noções e Aplicações

Sylvio R. Bistafa

ISBN: 9788521210320

Páginas: 348

Formato: 17 x 24 cm

Ano de Publicação: 2016

Peso: 0.569 kg
