

AZEVEDO NETTO
MIGUEL FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ



manual de
HIDRÁULICA

9ª edição

Blucher

PROF. ENG. JOSÉ MARTINIANO DE AZEVEDO NETTO

(1918 - 1991)

Engenheiro Civil pela Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo em 1942

MIGUEL FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ

Engenheiro Civil pela Escola de Engenharia da
Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1970

MANUAL DE HIDRÁULICA

9ª EDIÇÃO

Blucher

Manual de Hidráulica

© 2015 José Martiniano de Azevedo Netto

Miguel Fernández y Fernández

9ª edição – 2015

2ª reimpressão – 2017

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.

FICHA CATALOGRÁFICA

Azevedo Netto, José M. de (José Martiniano de),
Manual de hidráulica / José Martiniano de Azevedo
Netto, Miguel Fernández y Fernández. – 9. ed. – São Paulo:
Blucher, 2015.

Bibliografia

ISBN 978-85-212-0500-5

1. Hidráulica 2. Engenharia hidráulica I. Título
II. Fernández, Miguel Fernández y

15-0153

CDD 627

Índices para catálogo sistemático:

1. Hidráulica

CONTEÚDO

PARTE A CONCEITUAL

- A-1 Princípios Básicos, 15
- A-2 Hidrostática, 35
- A-3 Equilíbrio dos Corpos Flutuantes, 51
- A-4 Hidrodinâmica, 57
- A-5 Orifícios, Bocais e Tubos Curtos, 71
- A-6 Vertedores, 91
- A-7 Escoamento em Tubulações, 109
- A-8 Cálculo do Escoamento em Tubulações sob Pressão, 139
- A-9 Conduitos Forçados, 193
- A-10 Acessórios de Tubulações, 217
- A-11 Bombeamentos, 255
- A-12 Golpe de Ariete/Transiente Hidráulico, 293
- A-13 Sistemas de Tubulações, 309
- A-14 Conduitos Livres ou Canais, 327
- A-15 Hidrometria, 371

PARTE B HIDRÁULICA APLICADA

- B-I Sistemas Urbanos, 405
 - B-I.1 Sistemas Urbanos de Abastecimento de Água, 407
 - B-I.2 Sistemas Urbanos de Esgotos Sanitários, 445
 - B-I.3 Sistemas de Drenagem Pluvial, 468
- B-II Instalações Prediais, 497
 - B-II.1 Instalações Prediais de Água, 499
 - B-II.2 Instalações Prediais de Esgotos, 511
 - B-II.3 Instalações Prediais de Águas Pluviais, 519
- B-III Hidráulica Aplicada à Irrigação, 529
 - B-III.1 Uso da Água pelas Culturas Agrícolas, 531
 - B-III.2 Características do Solo, 535
 - B-III.3 Métodos de Irrigação, 537
 - B-III.4 Elaboração de Projeto – Dimensionamento, 548
- B-IV Diversos, 567
 - B-IV.1 Bombas e Casas de Bombas, 569
 - B-IV.2 Medições – Indicações e Cuidados na Medição de Vazões, 583

PARTE C ANEXOS

- C-1 Sistema Internacional de Unidades (SI), 601
 - C-1.1 Apresentação, 601
 - C-1.2 Unidades do Sistema Internacional, 602
 - C-1.3 Outras Unidades, 603
 - C-1.4 Observações, 604
 - C-1.5 Relações de Medidas e Conversões de Unidades, 605
- C-2 Convenções e Notações, 609
- C-3 Índice Remissivo, 615
- C-4 Bibliografia, 621
- C-5 Alfabeto Grego, 627
- C-6 Informatização e Acessibilidade, 629
- C-7 Agradecimentos, 631

PARTE A

CONCEITUAL

Princípios Básicos

- A-1.1 CONCEITO DE HIDRÁULICA – SUBDIVISÕES
- A-1.2 EVOLUÇÃO DA HIDRÁULICA
- A-1.3 SÍMBOLOS ADOTADOS E UNIDADES USUAIS
- A-1.4 PROPRIEDADES DOS FLUIDOS, CONCEITOS
 - A-1.4.1 Definições – Fluidos: Líquidos e Gases
 - A-1.4.2 Massa Específica, Densidade e Peso Específico
 - A-1.4.3 Compressibilidade
 - A-1.4.4 Elasticidade
 - A-1.4.5 Líquidos Perfeitos
 - A-1.4.6 Viscosidade/Atrito Interno
 - A-1.4.7 Atrito Externo
 - A-1.4.8 Coesão, Adesão e Tensão Superficial
 - A-1.4.9 Solubilidade dos Gases
 - A-1.4.10 Tensão de Vapor
- A-1.5 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO
 - A-1.5.1 Aceleração de Coriolis

Princípios Básicos

A-1.1 CONCEITO DE HIDRÁULICA – SUBDIVISÕES

O significado etimológico da palavra Hidráulica é “condução de água” (do grego *hydor*, água e *aulos*, tubo, condução).

Entretanto, atualmente, empresta-se ao termo Hidráulica um significado muito mais lato: é o estudo do comportamento da água e de outros líquidos, quer em repouso, quer em movimento.

A Hidráulica pode ser assim dividida:

- Hidráulica Geral ou Teórica
 - Hidrostática
 - Hidrocinemática
 - Hidrodinâmica
- Hidráulica Aplicada ou Hidrotécnica

A Hidráulica Geral ou Teórica aproxima-se muito da Mecânica dos Fluidos.

A Hidrostática trata dos fluidos em repouso ou em equilíbrio. A Hidrocinemática estuda velocidades e trajetórias, sem considerar forças ou energia. A Hidrodinâmica refere-se às velocidades, às acelerações e às forças que atuam em fluidos em movimento.

A Hidrodinâmica, em face das características dos fluidos reais, que apresentam grande número de variáveis físicas, o que tornava seu equacionamento altamente complexo, até mesmo insolúvel, derivou para a adoção de certas simplificações tais como a abstração do atrito interno, trabalhando com o denominado “fluido perfeito”, resultando em uma ciência matemática com aplicações práticas bastante limitadas.

Os engenheiros, que necessitavam resolver os problemas práticos que lhes eram apresentados, voltaram-se para a experimentação, desenvolvendo fórmulas empíricas que atendiam suas necessidades.

Com o progresso da ciência, e impulsionada sobretudo por alguns ramos onde se necessitaram abordagens mais acadêmicas, e onde houve disponibilidade de recursos para aplicação em pesquisa, e principalmente com o advento dos computadores,

que permitiram trabalhar com sistemas de equações de grande complexidade, em pouco tempo a Hidrodinâmica desenvolveu-se e é hoje instrumento não apenas teórico-matemático, mas de valor prático indiscutível.

A Hidráulica Aplicada ou Hidrotécnica é a aplicação concreta ou prática dos conhecimentos científicos da Mecânica dos Fluidos e da observação criteriosa dos fenômenos relacionados à água, quer parada, quer em movimento.

As áreas de atuação da Hidráulica Aplicada ou Hidrotécnica são:

- Urbana:
 - Sistemas de abastecimento de água
 - Sistemas de esgotamento sanitário
 - Sistemas de drenagem pluvial
 - Canais
- Rural:
 - Sistemas de drenagem
 - Sistemas de irrigação
 - Sistemas de água potável e esgotos
- Instalações prediais:
 - Industriais
 - Comerciais
 - Residenciais
 - Públicas
- Lazer e paisagismo
- Estradas (drenagem)
- Defesa contra inundações
- Geração de Energia
- Navegação e Obras Marítimas e Fluviais
- Dragagens/Aterros Hidráulicos

Os instrumentos utilizados para a atividade profissional de Hidrotécnica são:

- analogias
- cálculos teóricos e empíricos
- modelos reduzidos físicos
- modelos matemáticos de simulação
- hidrologia/estatística
- arte

Os acessórios, materiais e estruturas utilizados na prática da Engenharia Hidráulica ou Hidrotécnica são:

- aterros
- barragens
- bombas
- cais de portos
- canais
- comportas
- diques
- dragas
- drenos

- eclusas
- enrocamentos
- flutuantes
- medidores
- orifícios
- poços
- reservatórios
- tubos e canos
- turbinas
- válvulas
- vertedores
- etc.

A-1.2 EVOLUÇÃO DA HIDRÁULICA

Obras hidráulicas de certa importância remontam à Antiguidade. Na Mesopotâmia existiam canais de irrigação construídos na planície situada entre os rios Tigre e Eufrates e, em Nipur (Babilônia), existiam coletores de esgotos desde 3750 a.C.

Importantes empreendimentos de irrigação também foram executados no Egito, 25 séculos a.C, sob a orientação de Uni. Durante a XII dinastia, realizaram-se importantes obras hidráulicas, inclusive o lago artificial Méris, destinado a regularizar as águas do baixo Nilo.

O primeiro sistema público de abastecimento de água de que se tem notícia, o aqueduto de Jerwan, foi construído na Assíria, em 691 a.C.

Alguns princípios de Hidrostática foram enunciados por Arquimedes⁽¹⁾, no seu “Tratado Sobre Corpos Flutuantes”, em 250 a.C.

A bomba de pistão foi idealizada pelo físico grego Ctesibius e construída pelo seu discípulo Hero, em 200 a.C.

Grandes aquedutos romanos foram construídos em várias partes do mundo, a partir de 312 a.C. No ano 70 a.C. Sextus Julius Frontinus foi nomeado Superintendente de Águas de Roma.

No século XVI, a atenção dos filósofos voltou-se para os problemas encontrados nos projetos de chafarizes e fontes monumentais, tão em moda na Itália. Assim foi que Leonardo da Vinci⁽²⁾ apercebeu-se da importância das observações nesse setor. Um novo tratado publicado em 1586 por Stevin⁽³⁾ e as contribuições de Galileu⁽⁴⁾, Torricelli⁽⁵⁾ e Daniel Bernoulli⁽⁶⁾ constituíram a base para o novo ramo científico.

Devem-se a Euler⁽⁷⁾ as primeiras equações gerais para o movimento dos fluidos. No seu tempo, os conhecimentos que hoje constituem a Mecânica dos Fluidos apresentavam-se separados em dois campos distintos: a Hidrodinâmica Teórica, que estudava os fluidos perfeitos, e a Hidráulica Empírica, em que cada problema era investigado isoladamente.

A associação desses dois ramos iniciais, constituindo a Mecânica dos Fluidos, deve-se principalmente à Aerodinâmica.

Convém ainda mencionar que a Hidráulica sempre constituiu fértil campo para as investigações e análises matemáticas, tendo dado lugar a estudos teóricos que frequentemente se afastavam dos resultados experimentais. Várias expressões assim deduzidas tiveram de ser corrigidas por coeficientes práticos, o que contribuiu para que a Hidráulica fosse cognominada a “ciência dos coeficientes”. As investigações experimentais tornaram famosos vários físicos da escola italiana, entre os quais Venturi⁽⁸⁾ e Bidone.

Apenas no século XIX, com o desenvolvimento da produção de tubos de ferro fundido, capazes de resistir a pressões internas relativamente elevadas, com o crescimento das cidades e a importância cada vez maior dos serviços de abastecimento de água e, ainda, em consequência do emprego de novas máquinas hidráulicas, é que a Hidráulica teve um progresso rápido e acentuado.

As investigações de Reynolds⁽⁹⁾, os trabalhos de Prandtl⁽¹⁰⁾ e as experiências de Froude⁽¹¹⁾ forneceram a base científica para esse progresso, originando a Mecânica dos Fluidos moderna.

As usinas hidrelétricas começaram a ser construídas no final dos anos 1800 (século XIX). Aos laboratórios de Hidráulica devem ser atribuídas as investigações que possibilitaram os desenvolvimentos mais recentes.

Estes e outros acontecimentos marcantes para o estudo da hidráulica podem ser observados nas *Tabelas A-1.2-a e A-1.2-b*.

- ⁽¹⁾ Arquimedes (287-212 a.C.)
⁽²⁾ Leonardo da Vinci (1452-1519)
⁽³⁾ Simão Stevin (1548-1620)
⁽⁴⁾ Galileu Galilei (1564-1642)
⁽⁵⁾ Evangelista Torricelli (1608-1647)
⁽⁶⁾ Daniel Bernoulli (1700-1783)
⁽⁷⁾ Leonardo Euler (1707-1783)
⁽⁸⁾ Giovanni Battista Venturi (1746-1822)
⁽⁹⁾ Osborne Reynolds (1842-1912)
⁽¹⁰⁾ Ludwig Prandtl (1875-1953)
⁽¹¹⁾ William Froude (1810-1879)

Tabela A-1.2-a Eventos históricos

Invenções	“Autores”	Ano	País
Esgotos		3750 a.C.	Babilônia
Drenagem	Empédocles	450 a.C.	Grécia
Parafuso de Arquimedes	Arquimedes	250 a.C.	Grécia
Bomba de pistão	Ctesibius/Hero	200/120 a.C.	Grécia
Aquedutos romanos		150 a.C.	Roma
Termas romanas		20 a.C.	Roma
Barômetro	E.Torricelli	1643	Itália
Compressor de ar	Otto von Guericke	1654	Alemanha
Tubos de ferro fundido moldado	Johan Jordan	1664	França
Bomba centrífuga	Johan Jordan	1664	França
Máquina a vapor	Denis Papin	1680	França
Vaso sanitário	Joseph Bramah	1775	Inglaterra
Turbina hidráulica	Benoit Fourneyron	1827	França
Prensa hidráulica	S. Stevin/J. Bramah	1600/1796	Holanda/Inglaterra
Emprego de hélice	John Ericson	1836	Suécia
Manilhas cerâmicas extrudadas	Francis	1846	Inglaterra
Tubos de concreto armado	J. Monier	1867	França
Usina hidrelétrica	H. J. Rogers (Thomas Edison)	1882	EUA
Turbina a vapor	A. Parsons/De Lava	1884/1890	Inglaterra/Suécia
Submarino	J. P. Holland	1898	EUA
Tubos de cimento amianto	A. Mazza	1913	Itália
Tubos de ferro fundido centrifugado	Arens/de Lavaud	1917	Brasil
Propulsão a jato	Frank Whittle	1937	Inglaterra
Tubos de PVC		1936	Alemanha

O processamento de dados com o auxílio de computadores, além de abreviar cálculos, tem contribuído na solução de problemas técnico-econômicos para o projeto e implantação de obras hidráulicas. Propicia a montagem de modelos de simulação que permitem a previsão e análise de fenômenos dinâmicos que eram até então impraticáveis ou feitos com tão significativas simplificações, que comprometiam a confiabilidade ou a economicidade.

onde a aceleração da gravidade é maior, não esquecendo que a aceleração da gravidade também varia com a latitude (*Tabela A-1.3-d*), e até com a posição da lua em relação à Terra (exemplo visível: as marés).

Entre a força (F) e a massa (M) de um corpo existe uma relação expressa pela equação:

$$F = k \times M \times a \quad (2^{\text{a}} \text{ lei de Newton})$$

onde:

k é uma constante;

a é a aceleração a que o corpo está submetido.

Há dois sistemas de unidades que tornam a constante k igual a 1 (um): o SI (Sistema Internacional), ou “absoluto”, e o “gravitacional”. No “absoluto”, k é igual a 1 (um) pela definição da unidade de força e, no “gravitacional”, pela definição da unidade de massa, ou seja:

SISTEMA ABSOLUTO – a unidade de força é aquela que, ao agir sobre um corpo com a massa de um quilograma, ocasiona uma aceleração de um metro por segundo por segundo, e se denomina “newton”. A unidade de massa nesse sistema é correspondente a um bloco de platina denominado quilograma-protótipo, guardado em Sevres (França).

SISTEMA GRAVITACIONAL – a unidade de força é igual à unidade de massa por unidade de comprimento por segundo, logo, a unidade de massa neste sistema é igual a g quilogramas. Como g varia de lugar para lugar, especialmente com a latitude e a altitude, g só é constante em um mesmo local.

Melhor explicando, o Sistema Gravitacional torna o k igual à unidade pela definição da unidade de massa. “Se um corpo de peso unitário cai livremente, a força unitária atuará e a aceleração será g ”; logo, para que a força unitária produza uma aceleração unitária, a unidade de massa será equivalente a g unidades de peso.

Tabela A-1.2-b Eventos históricos no Brasil

Eventos	Ano	Cidade
Primeiro sistema de abastecimento de água	1723	Rio de Janeiro – RJ
Primeira cidade com rede de esgotos	1864	Rio de Janeiro – RJ
Primeira hidrelétrica (para mineração)	1883	Diamantina – MG
Primeira hidrelétrica (para abastecimento público)	1889	Juiz de Fora – MG

A-1.3 SÍMBOLOS ADOTADOS E UNIDADES USUAIS

As grandezas físicas são comparáveis entre si através de medidas homogêneas, ou seja, referidas à mesma unidade.

Os números apenas, sem dimensão de medida, nada informam em termos práticos: o que é maior, 8 ou 80? A pergunta carece de sentido porque não há termo de comparação. Evidentemente que 8 m^3 é mais que 80 litros (80 dm^3). Poderia ser de outra forma: 8 kg e 80 kg ou 80 kg e 80 litros.

As unidades de grandezas físicas (dimensões de um corpo, velocidade, força, trabalho ou potência) permitem organizar o trabalho científico e técnico, sendo que com apenas sete grandezas básicas é possível formar um sistema que abranja todas as necessidades.

Tradicionalmente a engenharia, logo a Hidráulica também, usava o denominado sistema MKS (metro, quilograma, segundo) ou CGS (centímetro, grama, segundo) ou Sistema Gravitacional, cujas unidades básicas (MKS) são mostradas na *Tabela A-1.3-a*.

Entretanto, observou-se que esse sistema estabelecia uma certa confusão entre as noções de peso e massa, que do ponto de vista físico são coisas diferentes. A massa de um corpo refere-se à sua inércia, e o peso de um corpo refere-se à força que sobre esse corpo exerce a aceleração da gravidade g . É evidente que uma mesma massa de água, digamos um litro em determinada temperatura, tem “pesos” diferentes ao nível do mar ou a 2.000 m acima dele. Essa mesma massa é mais “pesada” ao nível do mar,

Tabela A-1.3-a (Sistema mks) Grandezas e unidades físicas tradicionais

Grandezas	Unidade	Símbolo	Dimensional
Comprimento	metro	m	L
Força	quilograma-força	kgf	MLT^{-2}
Tempo	segundo	s	T

Tabela A-1.3-b Grandezas básicas do S.I.

Grandeza	Unidade	Símbolo
Comprimento	metro	m
Massa	quilograma	kg
Tempo	segundo	s
Intensidade corrente elétrica	ampère	A
Temperatura termodinâmica	kelvin	K
Intensidade luminosa	candeia	cd
Quantidade de matéria	mol	mol
Havendo ainda as denominadas unidades complementares:		
Ângulo plano	radiano	rad
Ângulo sólido	esterradiano	sr

No sistema métrico seria:

$$1 \text{ kgf} = \text{unidade de massa} \times 1 \text{ m/s}^2,$$

logo

$$\text{unidade de massa} = 1 (\text{kgf})/1 (\text{m/s}^2) = g (\text{kg})$$

Em outras palavras, a força gravitacional comunica à massa de 1 kg a aceleração g :

$$1 \text{ kgf} \equiv g \text{ 1 kg}.$$

O importante é entender que o peso de um corpo pode se reduzir a zero ao sair da gravidade terrestre, mas sua massa permanecerá a mesma.

Evidentemente, a definição de massa pecava por variar em função da aceleração da gravidade, o que não corresponde à realidade física da grandeza massa. Entretanto, as aproximações são boas o suficiente para, de maneira geral, em problemas pouco sensíveis à variação desse tipo de grandeza, continuarem a ser usadas. Isso ocorre pelo hábito e pelas facilidades advindas principalmente do fato de que, a grosso modo:

$$1 \text{ dm}^3 \text{ de H}_2\text{O (um litro de água)} \equiv 1 \text{ kgf},$$

gerando a unidade prática de pressão conhecida como *metro de coluna d'água* (m.c.a.), tão difundida entre os técnicos.

Por convenção internacional de 1960, foi criado o Sistema Internacional de Unidades (SI), também conhecido por Sistema Absoluto, legalmente em vigor no Brasil e na maioria dos países do mundo. O SI é do tipo MLT (massa, comprimento, tempo) e não FLT (força, comprimento, tempo), como era o Sistema Gravitacional.

As unidades básicas desse sistema são o quilograma (neste caso seria um quilograma-massa), o metro e o segundo. Deve-se atentar para a coinci-

dência de nomenclatura entre a antiga unidade de peso e a atual de massa, evitando-se assim as confusões daí advindas, infelizmente tão frequentes. O SI é composto por sete grandezas básicas (*Tabela A-1.3-b*).

Cabe registrar que, para os fins usuais de engenharia hidráulica, não interessa muito a diferença entre os conceitos de massa e quantidade de matéria, que vai interessar à física e à química puras. Um “mol” é a quantidade de matéria (ou quantidade de substância, nos EUA) de uma amostra ou sistema contendo tantas entidades elementares quantos átomos existem em 0,012 quilograma de carbono 12.

Neste livro, será adotado o Sistema Internacional (SI) de Unidades, sem abandonar os “usos e costumes” dos técnicos da área, a quem o livro se destina, estabelecendo também uma “ponte” entre aquele que se inicia no ofício e o veterano, entre o acadêmico e o profissional do dia a dia.

As unidades derivadas do SI são estabelecidas através de tratamento algébrico ou dimensional das grandezas físicas básicas.

Apresenta-se na *Tabela A-1.3-c* as grandezas “derivadas” mais frequentes, com suas respectivas unidades para os cálculos relacionados com as atividades da hidráulica.

Tabela A-1.3-c Grandezas “derivadas” do S.I.

Grandeza	Símbolo	Unidade	Relação com as unidades básicas	Dimensional
Área			m ²	L ²
Volume			m ³	L ³
Velocidade			m/s	LT ⁻¹
Aceleração			m/s ²	LT ⁻²
Massa específica			kg/m ³	ML ⁻³
Frequência	Hz	hertz	s ⁻¹	T ⁻¹
Força	N	newton	Kg × m/s ²	MLT ⁻²
Pressão	Pa	pascal	N/m ²	ML ⁻¹ T ⁻²
Energia	J	joule	N × m	ML ² T ⁻²
Potência	W	watt	J/s	ML ² T ⁻³
Viscosidade dinâmica	P	poise	0,1 N × s/m ²	ML ⁻¹ T ⁻¹
Viscosidade cinemática	St	stokes	10 ⁻⁴ × m ² /s	L ² T ⁻¹
Momento de inércia			m ⁴	L ⁴
Tensão superficial			N/m	MT ⁻²
Peso específico			N/m ³	ML ⁻² T ⁻²

Tabela A-1.3-d Aceleração da gravidade g e pressão atmosférica p_a

Cidade	Latitude (graus)	Altitude (m)	Aceleração da gravidade (m/s^2)	Pressão atmosférica aproximada			
				atm	N/cm ²	m.c.a.	mmHg
Quito	0	3.000	9,77100	0,69	6,94	7,10	517
Manaus	3 S	80	9,78068	0,99	10,13	10,31	753
La Paz	17 S	4.000	9,77236	0,65	6,75	7,00	515
Rio de Janeiro	23 S	1	9,78814	1,00	10,134	10,33	760
São Paulo	24 S	800	9,78637	0,92	9,14	9,32	685
Buenos Aires	35 S	1	9,79729	1,00	10,134	10,33	760
New York	42 N	1	9,80345	1,00	10,134	10,33	760
Paris	49 N	150	9,80700	0,98	10,00	10,29	745
Ilhas Malvinas	53 S	1	9,81331	1,00	10,134	10,33	760

Observação:

Para calcular o valor de g (cm/s^2) em qualquer situação geográfica (latitude e altitude), abstraindo as distorções provocadas pela falta de homogeneidade da massa do planeta Terra, pode-se utilizar a fórmula (Gamow, 1° vol, p. 38):

$$g = 980,616 - 2,5928 \times \cos 2\varphi + 0,0069 \times (\cos 2\varphi)^2 - 0,3086 H,$$

onde:

φ = latitude em graus

H = altitude em quilômetros

Na *Tabela A-1.3-d* apresentam-se valores de g calculados para diversas localidades pela fórmula de Gamow mencionada anteriormente.

Portanto, para as latitudes brasileiras e altitudes andinas, parece que a melhor aproximação para o valor de g é 9,79 ou 9,80 e não o 9,81 citado nas bibliografias europeia e norte-americana. Neste livro, sempre que for o caso, será utilizado o valor $g = 9,80 m/s^2$.

No *item A-1.5.1* (Aceleração de Coriolis) esse assunto é aprofundado.

A-1.4 PROPRIEDADES DOS FLUIDOS, CONCEITOS

A-1.4.1 Definições – Fluidos: líquidos e gases

Fluidos são substâncias ou corpos cujas moléculas ou partículas têm a propriedade de se mover umas em relação às outras sob a ação de forças de mínima grandeza.

Os fluidos se subdividem em líquidos e aeriformes (gases, vapores). Em virtude do pouco uso da expressão aeriforme, serão utilizados neste livro os termos gases ou

vapores, indistintamente, com o conceito de substância aeriforme.

Os líquidos têm uma superfície livre, e uma determinada massa de um líquido, a uma mesma temperatura, ocupa só um determinado volume de qualquer recipiente em que caiba sem sobras. Os líquidos são pouco compressíveis e resistem pouco a trações e muito pouco a esforços cortantes (por isso se movem facilmente).

Os gases, quando colocados em um recipiente, ocupam todo o volume, independente de sua massa ou do tamanho do recipiente. Os gases são altamente compressíveis e de pequena densidade, relativamente aos líquidos.

O estudo do escoamento de gases (ou vapores) na Hidráulica praticamente só está presente nos problemas de enchimento e esvaziamento de tubulações e reservatórios fechados, quando há que se dar passagem ao ar através de dispositivos tais como ventosas e respiradores, ou ainda na análise de problemas de descolamento de coluna líquida em tubulações por fenômenos transitórios hidráulicos (golpe de aríete).

A forma como um líquido responde, na prática, às várias situações de solicitação depende basicamente de suas propriedades físico-químicas, ou seja, de sua estrutura molecular e energia interna. A menor partícula de água, objeto da Hidráulica, é uma molécula composta por dois átomos de hidrogênio e um de oxigênio. Entretanto, uma molécula de água não forma o que em engenharia hidráulica se designa como tal. São necessárias muitas moléculas de água juntas para que se apresentem as características práticas desse composto. A proximidade dessas moléculas entre si é função da atração que umas exercem sobre as outras, o que varia com a energia interna e, portanto, com a temperatura e com a pressão.

Os estados físicos da água (sólido, líquido e gasoso) são resultado da maior ou menor proximidade e do arranjo entre essas moléculas e, portanto, da energia presen-

te em forma de pressão e de temperatura. A medida de energia é o “joule”, a de calor a “caloria” e a de pressão o “pascal”. Uma caloria é a energia requerida para aquecer um grama de água, em um Kelvin (ou um grau Celsius).

Para passar de um estado físico para outro (ou de uma fase para outra), a água apresenta uma característica própria, que é a quantidade de calor requerida, sem correspondente variação de temperatura, denominada calor latente de vaporização (líquido ↔ vapor) e calor latente de cristalização (sólido ↔ líquido). Ao nível do mar, a 45° de latitude e à temperatura de 20°C, a pressão atmosférica é de 0,1 MPa (1,033 kgf/cm²). Nessas condições, se a temperatura de uma massa líquida for elevada à temperatura de 100°C e aí mantida, ela evapora segundo o fenômeno da ebulição ou fervura. Em altitudes acima do nível do mar, a pressão atmosférica é menor e a água evapora a temperaturas também menores (*Figura A-1.4.1-a* e *Tabela A-1.4.1-b*).

Denomina-se “pressão de vapor” (ou “tensão de vapor”) de um líquido a “pressão” na superfície quando o líquido evapora (ver *item A-1.4.10*). Essa “pressão de vapor” varia com a temperatura. A *Tabela A-1.4.1-a* mostra a variação da pressão de vapor da água conforme a temperatura. Observe-se que a pressão de vapor iguala a pressão atmosférica normal a 100 °C e que, havendo uma diminuição de pressão (por exemplo em sucção de bombas), a pressão de vapor pode chegar a ser ultrapassada (para baixo) e a água passa ao estado de vapor brusca-mente, criando o denominado efeito de “cavitação”.

Tabela A-1.4.1-a Tensão de vapor (pressão do vapor) da água a várias temperaturas, para $g = 9,80 \text{ m/s}^2$ (ao nível do mar)

t_v (°C)	p_v			
	(N/m ²)	(kgf/m ²)	(kgf/m ²)	(m.c.a.)
0		62	0,00620	0,062
1		67	0,00669	0,067
3		77	0,00772	0,077
4	813	83	0,00830	0,083
5		89	0,00889	0,089
10	1.225	125	0,01251	0,125
15		174	0,01737	0,174
20	2.339	239	0,02383	0,239
25		323	0,03229	0,323
30	4.490	458	0,04580	0,458
35		573	0,05733	0,573
40		752	0,07520	0,752
45		977	0,09771	0,977
50	12.300	1.258	0,12580	1,258
55		1.695	0,16050	1,695
60		2.031	0,20310	2,031
65		2.550	0,25500	2,550
70		3.178	0,31780	3,178
75		3.931	0,39310	3,931
80	47.300	4.829	0,48290	4,829
85		5.894	0,58490	5,894
90		7.149	0,71490	7,149
95		8.519	0,86190	8,619
100	101.200	10.332	1,03320	10,332

Fonte: Bib. A983.

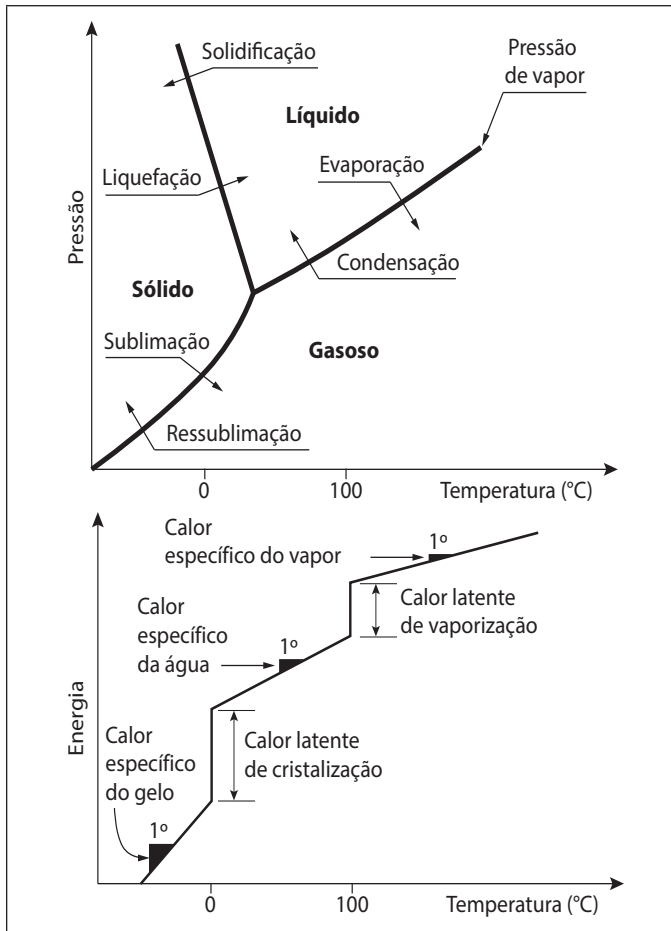


Figura A-1.4.1-a – Variação da pressão e energia da água conforme a temperatura.

Tabela A-1.4.1-b Ponto de ebulição da água conforme a altitude

ALTITUDE (m)	0	500	800(São Paulo)	1.000	1.500	2.000	3.000(Quito)	4.000(La Paz)
(°C)	100	98	97	96	95	93	91	89

A-1.4.2 Massa específica, densidade e peso específico

A massa de um fluido em uma unidade de volume é denominada densidade absoluta, também conhecida como massa específica (kg/m^3) (*density*).

O peso específico de um fluido é o peso da unidade de volume desse fluido (N/m^3) (*unit weight*).

Essas grandezas dependem do número de moléculas do fluido na unidade de volume. Portanto, dependem da temperatura, da pressão e do arranjo entre as moléculas.

A água alcança sua densidade absoluta máxima a uma temperatura de $3,98\text{ }^\circ\text{C}$ (*Tabela A-1.4.2-a*). Já o peso específico da água nessa mesma temperatura também será igual à unidade em locais onde a aceleração da gravidade seja de $9,80\text{ m/s}^2$ e à pressão de 1 atm (760 mmHg, 10,33 m.c.a. ou 0,1 MPa).

Chama-se densidade relativa de um material a relação entre a massa específica desse material e a massa específica de um outro material tomado como base. No caso de líquidos, essa substância normalmente é a água a $3,98\text{ }^\circ\text{C}$. Tratando-se de gases, geralmente adota-se o ar nas CNTP [Condições Normais de Temperatura ($0\text{ }^\circ\text{C}$) e Pressão (1 atm)]. Assim, a densidade relativa do mercúrio é 13,6 e da água salgada do mar em torno de 1,04 (números adimensionais) (*specific gravity*).

Na literatura, há quem faça distinção entre CNTP_N (condições normais, considerando a temperatura a $25\text{ }^\circ\text{C}$) e CNTP_P (condições padrões, $T \approx 0\text{ }^\circ\text{C}$). Portanto, a temperatura considerada deve ser sempre informada (perguntada).

Em termos práticos, pode-se dizer que a densidade da água é igual à unidade e que sua massa específica é igual a 1 kg/l e seu peso específico é $9,8\text{ N/l}$.

A-1.4.3 Compressibilidade

Compressibilidade é a propriedade que têm os corpos de reduzir seus volumes sob a ação de pressões externas.

Considerando-se a lei de conservação da massa, um aumento de pressão corresponde a um aumento de massa específica, ou seja, uma diminuição de volume. Assim,

$$dV = -\alpha \times V \times dp \quad \text{Equação (1.1)}$$

onde:

α é o coeficiente de compressibilidade

V é o volume inicial

dp é a variação de pressão

O inverso de α é ε ($\varepsilon = 1/\alpha$), denominado módulo de elasticidade de volume. Porém, a massa (m) vale

$$m = \rho \times V = \text{constante}$$

onde ρ é a massa específica. Derivando, tem-se

$$\rho \times dV + V \times d\rho = 0, \quad V = -\rho \times \frac{dV}{d\rho}$$

e substituindo o valor de V na *Equação (1.1)* tem-se:

$$\frac{dV}{V} = \frac{1}{\varepsilon} \times \rho \times \frac{dV}{d\rho} \times dp \quad \text{Equação (1.2)}$$

$$\frac{\varepsilon}{\rho} = \frac{dp}{d\rho}$$

Verifica-se diretamente da *Equação (1.2)* que o módulo de elasticidade de volume tem dimensões de pressão e é dado, geralmente, em kgf/cm^2 ou kgf/m^2 (mks) e em N/m^2 ou Pa (SI) ($1\text{ kgf} \approx 9,8\text{ N}$).

Para os líquidos, ele varia muito pouco com a pressão, mas varia apreciavelmente com a temperatura. Os gases têm ε muito variável com a pressão e com a temperatura (*Tabela A-1.4.3-a*).

Tabela A-1.4.2-a Variação da massa específica da água doce com a temperatura

Temperatura (°C)	Massa específica (kg/m^3)	Temperatura (°C)	Massa específica (kg/m^3)
0	999,87	40	992,24
2	999,97	50	988
4	1.000,00	60	983
5	999,99	70	978
10	999,73	80	972
15	999,13	90	965
20	998,23	100	958
30	995,67		

Tabela A-1.4.3-a Variação de ε e α da água doce com a temperatura

Temperatura °C	ε (N/m^2) $\times 10^8$	α (m^2/N) $\times 10^{-10}$	ε (kgf/m^2) $\times 10^8$	α (m^2/kgf) $\times 10^{-10}$
0	19,50	5,13	1,99	50,2
10	20,29	4,93	2,07	48,2
20	21,07	4,75	2,15	46,5
30	21,46	4,66	2,19	45,6

Suponha-se que certa transformação de um gás se dê a uma temperatura constante e que obedeça à lei de Boyle. Então,

$$\frac{p}{\rho} = \text{constante};$$

daí,

$$\frac{dp}{d\rho} = \frac{p}{\rho}$$

Pela *Equação (1.2)* tem-se

$$\epsilon = p$$

Equação (1.3)

O resultado da *Equação (1.3)* pode ser assim escrito: “quando um gás se transforma segundo a lei de Boyle, o seu módulo de elasticidade de volume iguala-se à sua pressão, a cada instante”.

Para os líquidos, desde que não haja grandes variações de temperatura, pode-se considerar ϵ constante. Então, a *Equação (1.2)* pode ser assim integrada:

$$\ln \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{1}{\epsilon} \times (p - p_0)$$

Equação (1.4)

A *Equação (1.4)* expressa a variação de ρ com p . Como essa variação é muito pequena, pode-se escrever a expressão aproximada:

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \alpha \times (p - p_0),$$

de onde vem

$$\rho = \rho_0 \times [1 + \alpha \times (p - p_0)]$$

Nos fenômenos em que se pode desprezar α , tem-se $\rho = \rho_0$, que é a condição de incompressibilidade.

Normalmente, em termos práticos, a compressibilidade da água é considerada apenas nos problemas de cálculo de golpe de aríete (transitórios hidráulicos sob pressão).

Por esses motivos, não se pode prescindir da compressibilidade de um líquido, ou, em outro extremo, pode-se prescindir da compressibilidade de um gás (movimento uniforme com baixas velocidades).

Chamando de “ c ” a celeridade de propagação do som no fluido, sabe-se (Newton) que:

$$c = \sqrt{\frac{\epsilon}{\rho}}$$

ou, substituindo pela *Equação (1.2)*.

$$c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}}$$

Portanto, a compressibilidade de um fluido está intimamente relacionada com a celeridade.

Na água, a 10 °C e pressão atmosférica ao nível do mar, $c = 1.425$ m/s.

Só se pode considerar ρ constante ou $d\rho = 0$ se $dp = 0$ ou $c = \infty$.

Nos fenômenos do golpe de aríete não se pode considerar ρ constante, pois $dp \neq 0$ e c é um valor finito.

Pode-se, entretanto, considerar ρ constante nos fenômenos que envolvem pequenas massas de fluidos, onde se considera $c = \infty$, ou em fenômenos em que p varia muito gradualmente, onde se considera $dp = 0$.

Chamando-se de número de Mach (Ma) a relação entre a velocidade de um escoamento “ v ” e a celeridade de propagação do som no mesmo fluido,

$$\text{Ma} = \frac{v}{c}$$

Chamando de K a constante da transformação adiabática, pode-se deduzir a seguinte relação:

$$\rho = \rho_0 \times \left[1 + \frac{K-1}{2} \times \text{Ma}^2 \right]^{\frac{1}{1-K}}$$

onde ρ_0 é a massa específica para $v = 0$.

Para $\text{Ma} = 0,3$ e um escoamento de ar ($K = 1,4$) com velocidade de 100 m/s, tem-se:

$$\rho = 0,967 \times \rho_0$$

Nesse caso, igualando-se ρ a ρ_0 , comete-se um erro de aproximadamente 4%.

O critério, portanto, para se considerar um gás compressível ou não depende do erro que se permita cometer nos cálculos. No exemplo acima, o erro foi de 4%, que muitas vezes é inferior aos erros com que se tomam os dados do problema. Portanto, o critério de compressibilidade a adotar é o bom senso do engenheiro.

A água na natureza e nas CNTP é cerca de 100 vezes mais compressível que o aço comum.

A-1.4.4 Elasticidade

Berthelot, em 1850, descobriu essa propriedade que têm os líquidos de aumentar seu volume quando se lhes diminui a pressão. Para os gases, a propriedade já era bem conhecida.

Em seguida, Worthington provou que o aumento de volume devido a uma certa depressão tem o mesmo valor absoluto que a diminuição do volume para uma compressão de igual valor absoluto. Isto é, os módulos de elasticidade são iguais à depressão e à compressão.

Os gases dissolvidos afetam essa propriedade quando se trata de grandes pressões.

A-1.4.5 Líquidos perfeitos

Um fluido em repouso goza da propriedade da isotropia, isto é, em torno de um ponto os esforços são iguais em todas as direções.

Num fluido em movimento, devido à viscosidade, há anisotropia na distribuição dos esforços.

Em alguns problemas particulares, pode-se, sem grave erro, considerar o fluido sem viscosidade e incompressível. Essas duas condições servem para definir o que se chama líquido perfeito, em que a densidade é uma constante e existe o estado isotrópico de tensões em condições de movimento.

O fluido perfeito não existe na prática, ou seja, na natureza, sendo portanto uma abstração teórica, mas em um grande número de casos é prático considerar a água como tal, ao menos para cálculos expeditos.

A-1.4.6 Viscosidade/Atrito interno

Quando um fluido escoar, verifica-se um movimento relativo entre as suas partículas, resultando um atrito entre elas. Atrito interno ou viscosidade é a propriedade dos fluidos responsável pela sua resistência à deformação.

Pode-se definir ainda a viscosidade como a capacidade do fluido em converter energia cinética em calor, ou a capacidade do fluido em resistir ao cisalhamento (esforços cortantes).

A viscosidade é diretamente relacionada com a coesão entre as partículas do fluido. Alguns líquidos apresentam essa propriedade com maior intensidade que outros. Assim, certos óleos e certos lodos pesados escoam mais lentamente que a água ou o álcool.

Ao se considerarem os esforços internos que se opõem à velocidade de deformação, pode-se partir do caso mais simples, representado pela *Figura A-1.4.6-a*. No interior de um líquido, as partículas contidas em duas lâminas paralelas de área (A) movem-se à distância (Δn), com velocidades diferentes (v) e ($v + \Delta v$).

A segunda lâmina tenderá a acelerar a primeira e a primeira a retardar a segunda.

A força tangencial (F) decorrente dessa diferença de velocidade será proporcional ao gradiente de velocidade (igual à velocidade de deformação angular).

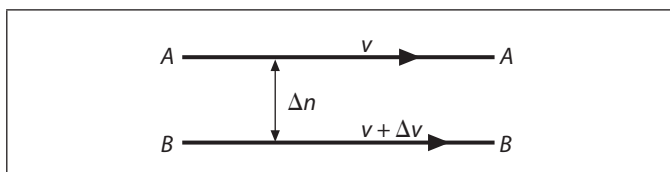


Figura A-1.4.6-a – Representação para estudo da viscosidade.

$$F = \mu \times A \times \frac{\Delta v}{\Delta n}$$

Equação (1.5)

Onde “ μ ” é um coeficiente característico do fluido, em determinada temperatura e pressão, que se denomina coeficiente de viscosidade dinâmica ou viscosidade. A Equação (1.5) também é conhecida como “equação da viscosidade de Newton”.

A viscosidade varia bastante com a temperatura e pouco com a pressão.

O coeficiente de viscosidade dinâmica ou absoluta, ou simplesmente viscosidade, tem a dimensional

$$ML^{-1} T^{-1} \text{ no (SI), e } FL^{-2} T \text{ no (mks)}$$

No sistema (SI), a unidade de “ μ ” denomina-se *pouiseville*, abreviatura “Pl”; e, no sistema (mks), denomina-se *pouise*, abreviatura “P”.

$$1 \text{ Pl} = 1 \text{ N s/m}^2$$

$$1 \text{ P} = 0,1 \text{ N s/m}^2$$

$$100 \text{ centipoise} = 1 \text{ P} = 1 \text{ g/cm} \times \text{s}$$

Para a água a 20 °C e 1 atm, tem-se

$$“\mu” = 10^{-3} \text{ N} \times \text{s/m}^2 = 1 \text{ centipoise}$$

Por essa facilidade de ter a viscosidade igual à unidade nas CNTP, a água é usada como padrão de viscosidade, exprimindo-se em relação a ela a viscosidade de outros fluidos.

Dividindo o valor da viscosidade “ μ ” pela massa específica do fluido “ ρ ”, obtém-se a “viscosidade cinemática” “ v_{cn} ”.

$$v_{cn} = \frac{\mu}{\rho}$$

Essas grandezas têm a vantagem de não depender da unidade de massa.

A unidade de viscosidade cinemática no (SI) tem a dimensional [$L^2 T^{-1}$] e exprime-se em m^2/s ; e no (mks), tem a mesma dimensional, exprimindo-se em cm^2/s , e denomina-se “*stoke*”, abreviação “*St*”.

Os fluidos que obedecem a essa equação de proporcionalidade da Equação (1.5), ou seja, em que há uma relação linear entre o valor da tensão de cisalhamento aplicada e a velocidade de deformação resultante, quer dizer, a viscosidade dinâmica “ v_{cn} ” constante, são denominados fluidos newtonianos, incluindo a água, líquidos finos assemelhados e os gases de maneira geral.

Entretanto, não devem ser esquecidos os fluidos denominados não newtonianos, que não obedecem a essa lei de proporcionalidade e são muito encontrados nos problemas reais de engenharia civil, tais como lamas e lodos em geral. Os fluidos não newtonianos apresentam uma re-

lação não linear entre o valor da tensão de cisalhamento aplicada e a velocidade de deformação angular. Basicamente, há três tipos de fluidos não newtonianos:

Tipo (1) – a viscosidade não varia com o estado de agitação. Embora não obedeça à proporcionalidade linear da *Equação (1.5)*, obedece a equações semelhantes em que, por exemplo, o coeficiente de viscosidade cinemática está elevado a uma potência.

Tipo (2) – “tixotrópicos”, em que a viscosidade cai com o aumento da agitação. Em bombeamentos, podem ser tratados como newtonianos desde que introduzidos no sistema a partir de certa velocidade ou agitação. Exemplo: lodos adensados de estações de tratamento de esgotos.

Tipo (3) – “dilatantes”, em que a viscosidade aumenta com o aumento da agitação. Exemplo: algumas pastas industriais, o melado da cana de açúcar.

A *Figura A-1.4.6-b* ilustra melhor o assunto.

Como se pode observar pelas *Tabelas A-1.4.6-a* e *A-1.4.6-b*, a viscosidade varia consideravelmente com a

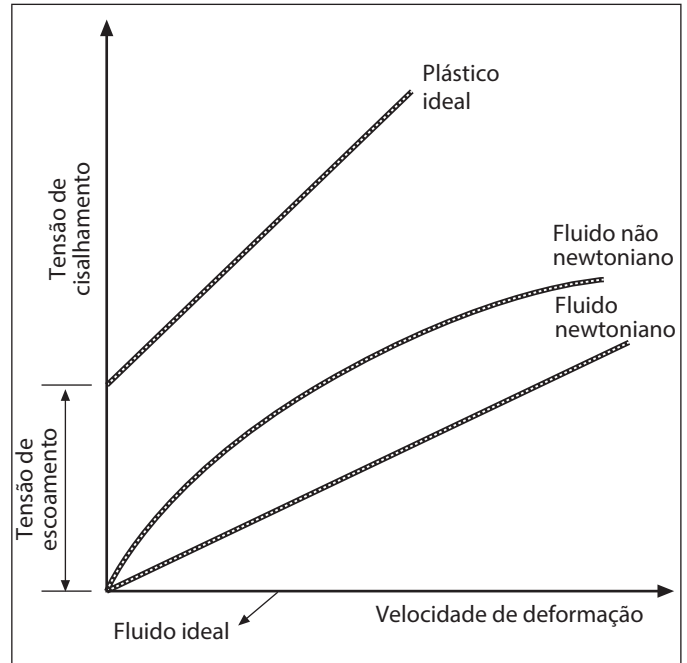


Figura A-1.4.6-b – Diagrama Cisalhamento × Deformação.

Tabela A-1.4.6-a Variação da viscosidade “ μ ” da água doce com a temperatura

Temperatura °C	μ (N × s/m ²) × 10 ⁻⁶	Temperatura °C	μ (N × s/m ²) × 10 ⁻⁶
0	1.791	40	653
2	1.674	50	549
4	1.566	60	469
5	1.517	70	407
10	1.308	80	357
15	1.144	90	317
20	1.008	100	284
30	799		

temperatura e, portanto, essa é uma variável importantíssima a ser levada em consideração nos cálculos. A bibliografia registra a diminuição de capacidade de vazão de poços da ordem de até 30% quando a temperatura da água se aproxima dos 4 °C. Situação facilmente entendida se observarmos que o escoamento em meio poroso (laminar e com muita superfície de contato), como é o caso da maioria dos aquíferos subterrâneos, é sobremaneira afetado pela viscosidade.

De maneira geral, para os líquidos, a viscosidade cai e, para os gases, sobe com o aumento da temperatura.

O atrito interno pode ser evidenciado pela seguinte experiência: imprimindo-se a um cilindro contendo um líquido um movimento de rotação em torno do seu eixo, dentro de pouco tempo, todo o líquido passa a partici-

Tabela A-1.4.6-b Variação da viscosidade cinemática “ ν_{cn} ” da água doce com a temperatura

Temperatura °C	ν_{cn} (m ² /s) × 10 ⁻⁹	Temperatura °C	ν_{cn} (m ² /s) × 10 ⁻⁹	Temperatura °C	ν_{cn} (m ² /s) × 10 ⁻⁹	Temperatura °C	ν_{cn} (m ² /s) × 10 ⁻⁹
0	1.792	14	1.172	28	839	60	478
2	1.673	15	1.146	30	804	70	416
4	1.567	16	1.112	32	772	80	367
5	1.519	18	1.059	34	741	90	328
6	1.473	20	1.007	36	713	100	296
8	1.386	22	960	38	687		
10	1.308	24	917	40	657		
12	1.237	26	876	50	556		

Tabela A-1.4.6-c Viscosidade cinemática “ ν_{cn} ” e peso específico de alguns fluidos

Temperatura °C	Gasolina		Óleo combustível		Ar (na pressão atmosférica)	
	Peso específico kgf/m ³	ν_{cn} (m ² /s) × 10 ⁻⁹	Peso específico kgf/m ³	ν_{cn} (m ² /s) × 10 ⁻⁹	Peso específico kgf/m ³	ν_{cn} (m ² /s) × 10 ⁻⁹
5	737	757	865	5.980	1,266	13.700
10	733	710	861	5.160	1,244	14.100
15	728	681	858	4.480	1,222	14.600
20	725	648	855	3.940	1,201	15.100
25	720	621	852	3.520	1,181	15.500
30	716	596	849	3.130	1,162	16.000

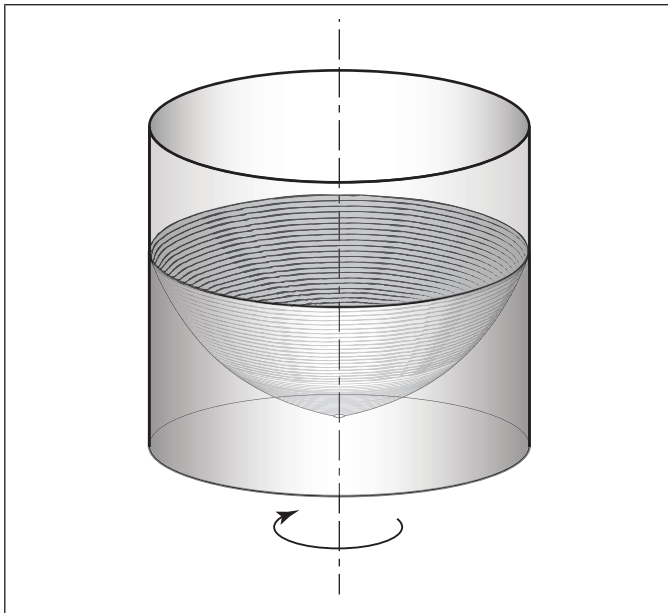
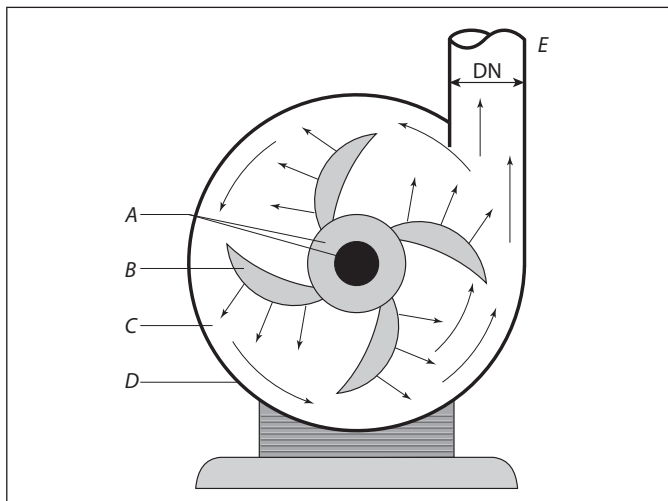


Figura A-1.4.6-c – Representação de experiência para estudo da viscosidade.

Figura A-1.4.6-d – Esquema de bomba centrífuga.
A) Eixo e entrada; B) Rotor; C) Líquido em aceleração;
D) Carcaça (voluta); E) Saída.

par do mesmo movimento, assumindo a forma parabólica. A bomba centrífuga utiliza-se desse princípio. Veja-se a *Figura A-1.4.6-c* e a *Figura A-1.4.6-d*, a seguir.

A-1.4.7 Atrito externo

Chama-se atrito externo à resistência ao deslizamento de fluidos ao longo de superfícies sólidas.

Quando um líquido escoar ao longo de uma superfície sólida, junto a ela existe sempre uma camada fluida, aderente, que não se movimenta.

Nessas condições, entende-se que o atrito externo é uma consequência da ação de freio exercida por essa camada estacionária sobre as demais partículas em movimento.

Na experiência anterior (*Figura A-1.4.6-c*), o movimento do líquido é iniciado graças ao atrito externo que se verifica junto à parede do recipiente.

Um exemplo importante é o que ocorre com o escoamento de um líquido em um tubo. Forma-se junto às paredes uma película fluida que não participa do movimento. Junto à parede do tubo, a velocidade é zero, sendo máxima na parte central (*Figura A-1.4.7-a*). Em consequência dos atritos e, principalmente, da viscosidade, o escoamento de um líquido numa canalização só ocorre com certa perda de energia, perda essa designada por “perda de carga” (*Figura A-1.4.7-b*).

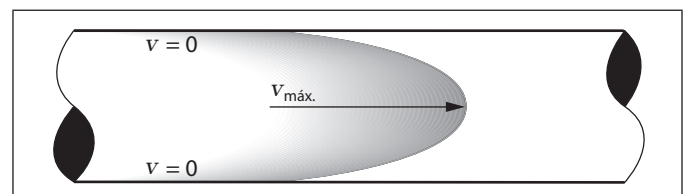


Figura A-1.4.7-a – Velocidades em seção transversal de escoamento em tubo.

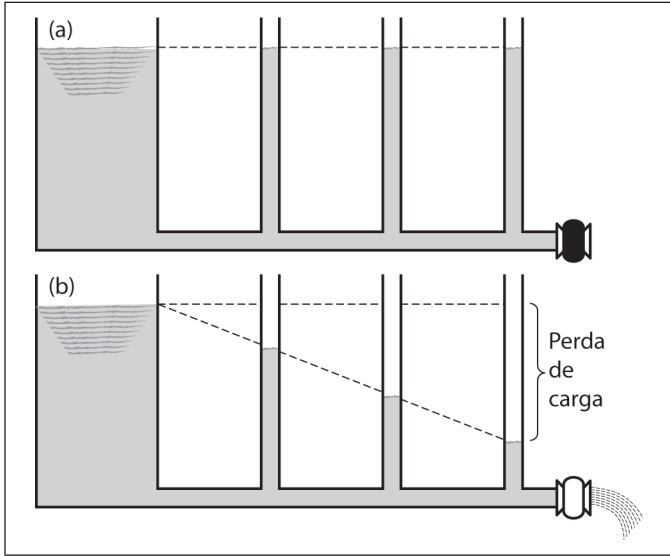


Figura A-1.4.7-b – (a) Sem escoamento, princípio dos vasos comunicantes; (b) com escoamento, perda de carga.

periciais atraídas para o interior do líquido tenderem a tornar a área da superfície um mínimo. É o fenômeno da tensão superficial. As propriedades de adesão, coesão e tensão superficial são responsáveis pelos conhecidos fenômenos de capilaridade (Figura A-1.4.8-a).

A elevação do líquido, num tubo de pequeno diâmetro, é inversamente proporcional ao diâmetro. Como tubos de vidro e de plástico são frequentemente empregados para medir pressões (piezômetros), é aconselhável o emprego de tubos de diâmetro superior a 1 cm, para que sejam desprezíveis os efeitos de capilaridade. Num tubo de 1 mm de diâmetro, a água pode subir 35 cm nas CNPT.

A tensão superficial τ tem dimensional $[MT^{-2}]$ no (SI), exprime-se em N/m e varia com a temperatura. A Tabela A-1.4.8-a mostra os valores da tensão superficial para a água doce normal a diferentes temperaturas.

Esses valores variam ainda com o material eventualmente dissolvido na água. Por exemplo, os sais mi-

A-1.4.8 Coesão, adesão e tensão superficial

A primeira propriedade (coesão) permite às partículas fluidas resistirem a pequenos esforços de tensão (tração). A formação de uma gota d'água deve-se à coesão.

Quando um líquido está em contato com um sólido, a atração exercida pelas moléculas do sólido pode ser maior que a atração existente entre as moléculas do próprio líquido. Ocorre então a adesão.

Na superfície de um líquido em contato com o ar, há a formação de uma verdadeira película elástica. Isso ocorre porque a atração entre as moléculas do líquido é maior que a atração exercida pelo ar e porque as moléculas su-

Tabela A-1.4.8-a Variação de τ da água doce com a temperatura

Temperatura °C	τ (N/m) $\times 10^{-2}$	Temperatura °C	τ (N/m) $\times 10^{-2}$
0	7,513	50	6,778
2	7,515	60	6,622
10	7,375	70	6,453
20	7,230	80	6,260
30	7,069	90	6,070
40	6,911	100	

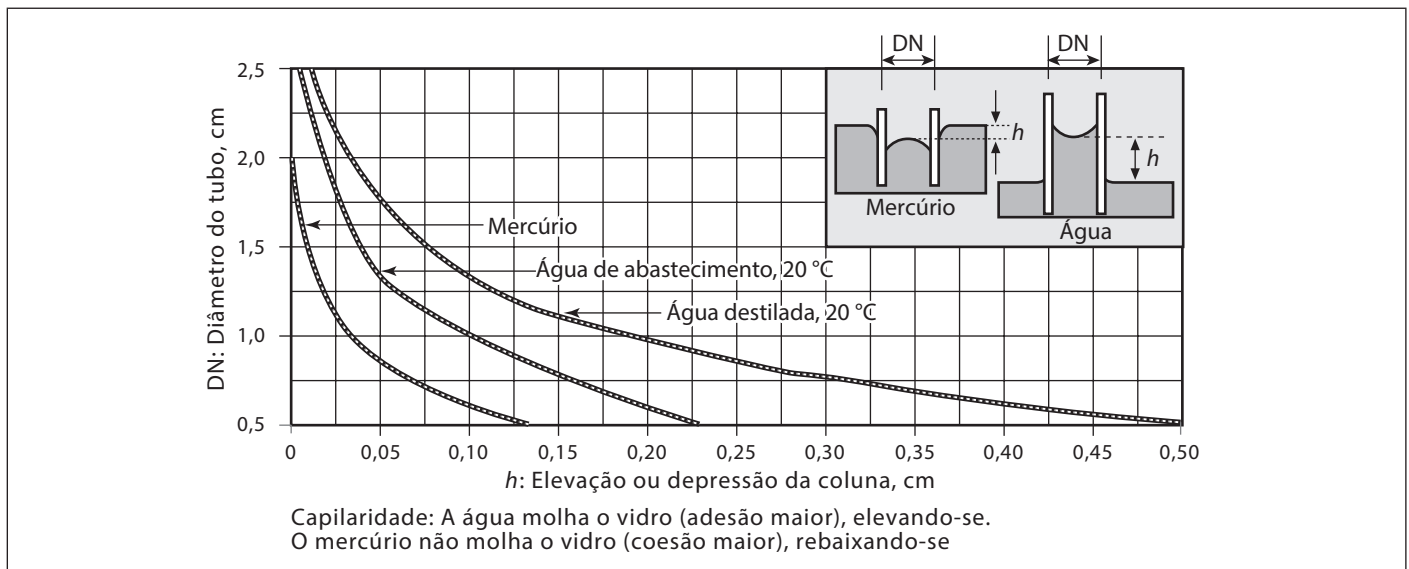


Figura A-1.4.8-a – Capilaridade em tubos cilíndricos de vidro (Bib. S790, p. 17).

nerais normalmente aumentam a tensão superficial, e compostos orgânicos, como o sabão e o álcool, além dos ácidos em geral, diminuem a tensão superficial da água que os dissolve.

Quanto à adesão de um líquido a um sólido, esta pode ser “positiva” (sólidos hidrófilos) ou “negativa” (sólidos hidrófobos), conforme a *Figura A-1.4.8-b*.

A adesão da água com a prata é praticamente neutra, sendo $\alpha \approx 90^\circ$ nas CNTP. A capilaridade dos solos finos é bastante conhecida e deve-se às características de seus compostos, sendo a adesão de tal forma forte que só se separa a água por evaporação.

O cálculo da altura h (cm) que um líquido sobe ou desce em um capilar de diâmetro interno DN (m) (*Figura A-1.4.8-c*), suficientemente pequeno para desprezar-se o volume de água acima ou abaixo do plano de tangência do menisco, é feito da seguinte forma:

$$h = \frac{4 \times \tau \times \text{sen} \alpha}{\gamma \times d}$$

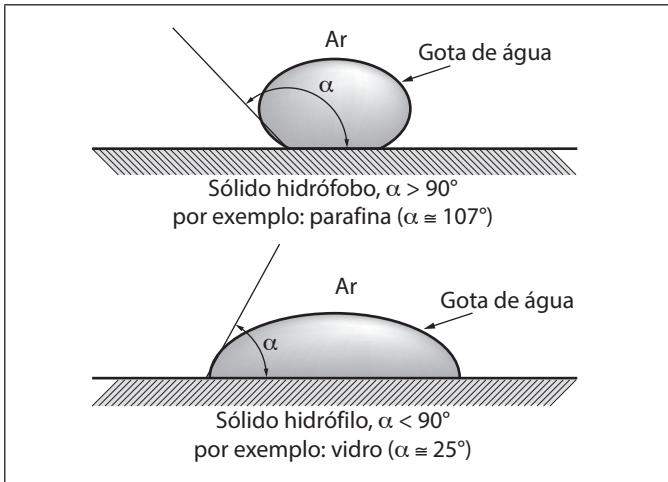


Figura A-1.4.8-b – Adesão de uma gota de água a materiais.

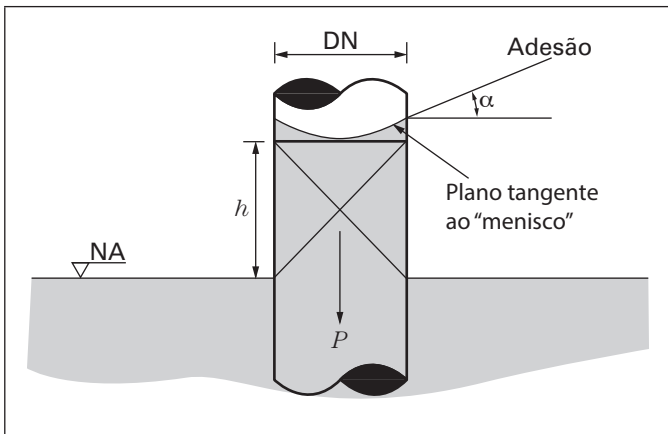


Figura A-1.4.8-c – Representação da capilaridade em um tubo.

onde

- τ é a tensão superficial (N/m) $\times 10^{-2}$
- α é o ângulo de contato (adesão)
- γ é o peso específico da água (N/m³)

O equilíbrio na *Figura A-1.4.8-c* se dá quando o peso (P) da coluna líquida deslocada igualar as forças de coesão e adesão.

A água elevada em um capilar está abaixo da pressão atmosférica, daí ser impossível pretender que ela possa verter de alguma forma, o que, aliás, criaria um moto-contínuo (o que é inconcebível).

A-1.4.9 Solubilidade dos gases

Os líquidos dissolvem os gases. Em particular, a água dissolve o ar, em proporções diferentes entre o oxigênio e nitrogênio, pois o oxigênio é mais solúvel.

O volume do gás dissolvido é proporcional à pressão do gás, e o volume é o mesmo que o gás ocuparia no estado livre (não dissolvido), mas sujeito à mesma pressão (Henry).

Em outras palavras, o volume de gás dissolvido em um determinado volume de água é constante se não houver variação de temperatura, pois um incremento de pressão diminui o volume de gás dissolvido e passa a ser possível dissolver mais gás. Ao diminuir a pressão, ocorre o inverso, liberando-se gás.

Essa propriedade é uma causa do desprendimento de ar e o aparecimento de bolhas de ar nos pontos altos das tubulações.

Nas CNTP, a água dissolve o ar em até cerca de 2% de seu volume (*Tabela A-1.4.9-a*).

Tabela A-1.4.9-a Coeficiente de solubilidade de gases na água doce, em m³ de gás por m³ de água, ao nível do mar

	0 °C	20 °C
Ar	0,03	
Ácido clorídrico	5,60	
Ácido sulfídrico	5,00	
Cloro	5,00	
Gás carbônico (CO ₂)	1,87	0,92
Hidrogênio	0,023	0,020
Monóxido de carbono (CO)	0,04	
Oxigênio	0,053	0,033
Nitrogênio	0,026	0,017

Na *Tabela A-1.4.9-b* é apresentada a saturação de oxigênio na água para diferentes temperaturas.

Tabela A-1.4.9-b Saturação de oxigênio, em mg/ℓ

°C	0	5	10	15	20	25	30
Água doce	14,6	12,8	11,3	10,2	9,2	8,4	7,6
Água do mar	11,3	10,0	9,0	8,1	7,4	6,7	6,1

Fonte: Bib. L185.

A-1.4.10 Tensão de vapor

Dependendo da pressão a que está submetido, um líquido entra em ebulição a determinada temperatura; variando a pressão, varia a temperatura de ebulição. Por exemplo, a água entra em ebulição à temperatura de 100 °C quando a pressão é de 1,0332 kgf/cm² (1 atm), mas também pode ferver a temperaturas mais baixas se a pressão também for menor.

Então, todo líquido tem temperaturas de saturação de vapor (t_v) (quando entra em ebulição), que correspondem biunivocamente a pressões de saturação de vapor ou simplesmente tensões de vapor (p_v).

Essa propriedade é fundamental na análise do fenômeno da cavitação (*Capítulo A-11*), pois, quando um líquido inicia a ebulição, inicia-se também a cavitação (ver *Tabela A-1.4.1-a*).

A-1.5 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

A-1.5.1 Aceleração de Coriolis

Exemplo para a percepção de vários fenômenos citados neste capítulo é a denominada “aceleração de Coriolis” (Gustave-Gaspard Coriolis, França, 1835), presente nos vórtices que se formam em corpos de água quando há escoamento na direção vertical. É um fenômeno facilmente observado no sentido de cima para baixo, girando no hemisfério sul em um sentido e no hemisfério norte em sentido oposto. É o mesmo fenômeno que forma os “redemoinhos” no ar, conhecidos por tornados, fazendo com que as correntes marinhas e os ventos girem predominantemente na direção “descrita” por essa força (ver *Figura A-1.5.1-b* e *item A-5.1.7*).

Com efeito, no *item A-1.3*, já se percebeu que, dependendo da latitude e da altitude de uma partícula em relação ao eixo da Terra, embora sua massa seja a mesma, o “peso”, ou seja, a força que age sobre essa partícula, varia. Então, se essa partícula muda de lugar, subindo ou descendo, ou se deslocando para o norte ou para o sul,

para leste ou para oeste, o somatório das forças agindo sobre ela se altera, para mais ou para menos. Isto quer dizer que, se a energia de que esteja imbuída a partícula na posição inicial não é a mesma na posição final, algo ocorre. O que ocorre?

Supondo que uma partícula de água esteja na superfície de uma lagoa interligada ao mar, ou seja, no nível do mar, e que uma tubulação no fundo dessa lagoa, digamos a 10 m de profundidade, de um sistema de refrigeração industrial comece a succionar água da lagoa, a massa líquida no entorno é atraída para o ponto de sucção, inclusive a partícula da superfície em observação, que vai descer até o tubo. Nesse trajeto de descida, nossa partícula tende a fazer um caminho helicoidal, formando um vórtice (visível ou não a “olho nu”), ou seja, vai fazer um caminho mais longo, para dissipar a diferença de energia de que está imbuída na superfície à que terá a 10 m de profundidade. São forças muito pequenas, que só são observadas em determinadas circunstâncias e só produzem efeito nos fluidos devido à baixa viscosidade da água e do ar, mas com as quais temos com que nos preocupar em engenharia civil, mecânica, aeronáutica, naval e neste livro.

Quando uma partícula muda de posição em relação à Terra, subindo ou descendo, ou caminhando pela superfície em qualquer direção, sua velocidade absoluta aumenta ou diminui, já que cada partícula no planeta gira junto com o planeta e, portanto, tem uma velocidade angular (tangencial) do local em que se encontra. Se, ao mudar de posição, o raio de seu movimento de rotação aumenta ou diminui, haverá energia a dissipar ou a absorver. Note que mudanças sobre os paralelos (leste-oeste ou oeste-leste) embora não alterem o raio de giração, alteram a velocidade de giração (seria como andar sobre uma esteira em movimento).

No equador (latitude zero), ao nível do mar, a velocidade tangencial (vt_{eq} ou v_{t0}) de uma partícula do planeta terra devido à sua rotação (1 volta a cada 24 horas em um círculo com 6.370 km de raio) é

$$vt_{eq} = \frac{2 \times \pi \times R_{eq}}{24} = \frac{2 \times \pi \times 6.370}{24} = 1.667,666 \text{ km/h,}$$

bem maior que a velocidade do som, que, ao nível do mar, é de 1.225 km/h.

No paralelo a 30° de latitude, a velocidade absoluta de uma partícula na superfície do oceano (vt_{30°) seria:

$$vt_{30^\circ} = \frac{2 \times \pi \times R_{eq} \cos 30}{24} = \frac{2 \times \pi \times 6.370 \times 0,87}{24} = \frac{6,2832 \times 5.542 \text{ km}}{24} = 1.450,898 \text{ km/h.}$$

Se uma partícula no paralelo 30° “afundar” 10 m (H = 10 m) (por exemplo, uma partícula na superfície

sobre uma tomada de água afogada a 10 m de profundidade), o raio de giração passa de 5.542 km para

$$5.542.000 \text{ m} - \cos\theta \times 10 \text{ m} = 5.542.000 - 8,4 = 5.541.991,60 \text{ m} = 5.541,99 \text{ km}$$

então:

$$vt_{30^\circ-10 \text{ m}} = \frac{2 \times \pi \times 5.541,99}{24} = 1.450,893 \text{ km/h.}$$

É uma diferença significativa!

Como se vê, são mudanças quase imperceptíveis ($1.450,898 - 1.450,893 = 0,005 \text{ km/h}$), mas não desprezíveis, que cada vez mais pertencem ao interesse do ramo da engenharia pelas aplicações cada vez mais ousadas e detalhadas, como as simulações por métodos numéricos de escoamentos da natureza (modelos matemáticos) ou de perfurações de petróleo a mais de 3.000 m de profundidade no mar. Qualquer resíduo de movimento na água pode ser mais forte do que essas forças “sutis” e fazer com que a rotação se inicie na outra direção. Por isso, quando destapamos a pia para ver a formação do vórtice, pode não girar sempre na mesma direção esperada.

Os movimentos convectivos (provocados por alterações de temperatura, logo de densidade) dos oceanos (e da atmosfera), por mudar a posição das partículas de água e de ar, introduzem uma aceleração de “Coriolis” que se reflete claramente nos movimentos predominantes das correntes marítimas e dos ventos.

Para uma partícula movimentando-se em relação ao planeta (na superfície), o efeito da aceleração de Coriolis é máximo no equador ($\theta = 0^\circ$, $\cos 0 = 1$) e tende a zero nos polos, onde ($\theta = 90^\circ$, $\cos 90 = 0$). Para uma partícula movimentando-se para cima ou para baixo, o produto vetorial que gera o movimento no hemisfério Norte para um lado e no hemisfério Sul para o outro lado, tende a zero no equador e a tendência à rotação pode dar-se em um ou em outro sentido (equilíbrio indiferente).

A Figura A-1.5.1-a mostra duas partículas, uma no hemisfério Norte, sobre o paralelo 60 (no ponto P_{N60}), e outra no hemisfério Sul, sobre o paralelo 30 (no ponto P_{S30}), e, depois, H m abaixo (cota -Z1, sem escala), respectivamente nos pontos P_{N60-H} e P_{S30-H} .

Legenda para a Figura A-1.5.1-a –

- r_{N60} - Raio de giração em relação ao eixo da esfera
- R - Raio do planeta em relação ao centro da esfera
- H - Distância na vertical (eixo Z)
- P_{N60} - Ponto na superfície (NA_{mar})
- $P_{N\theta-H}$ - Ponto sob a superfície a uma profundidade H
- No Equador: $R = r$
- θ - Ângulo do eixo Z em relação do plano do equador

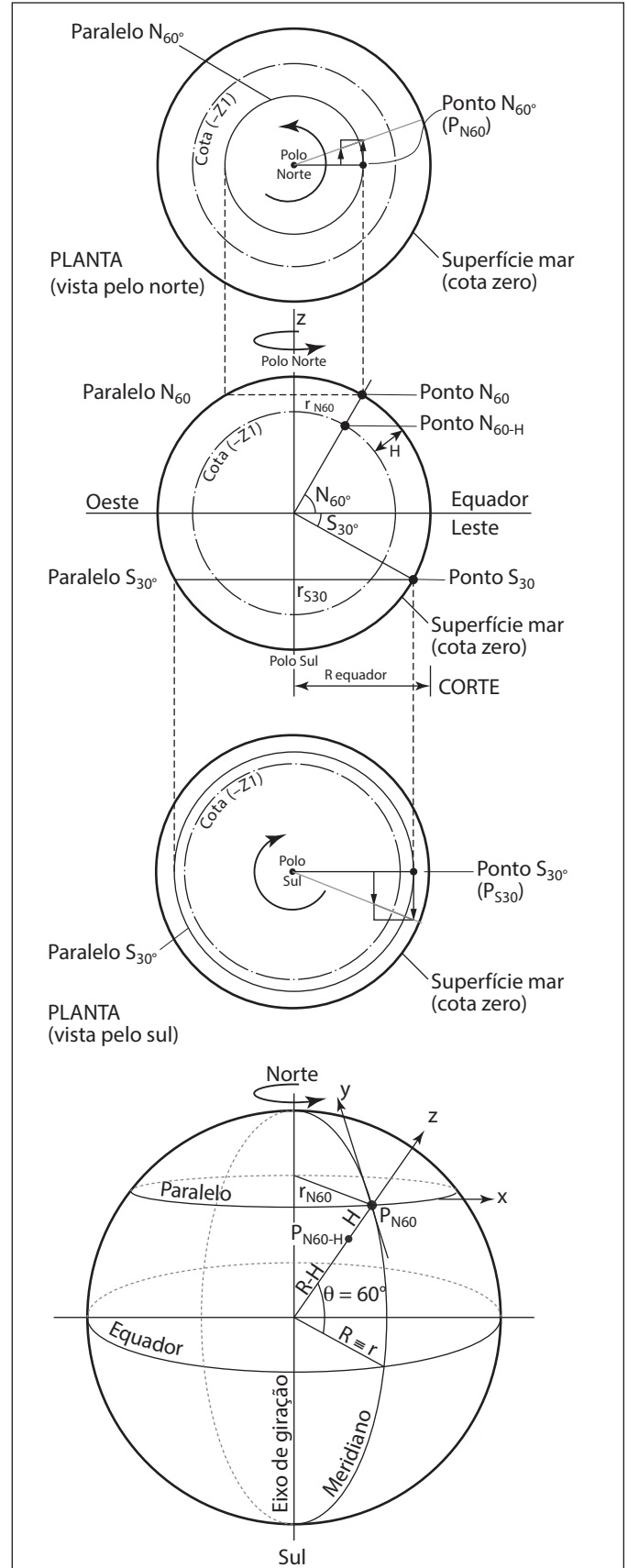


Figura A-1.5.1-a – Aceleração de Coriolis (desenho esquemático, sem escala).

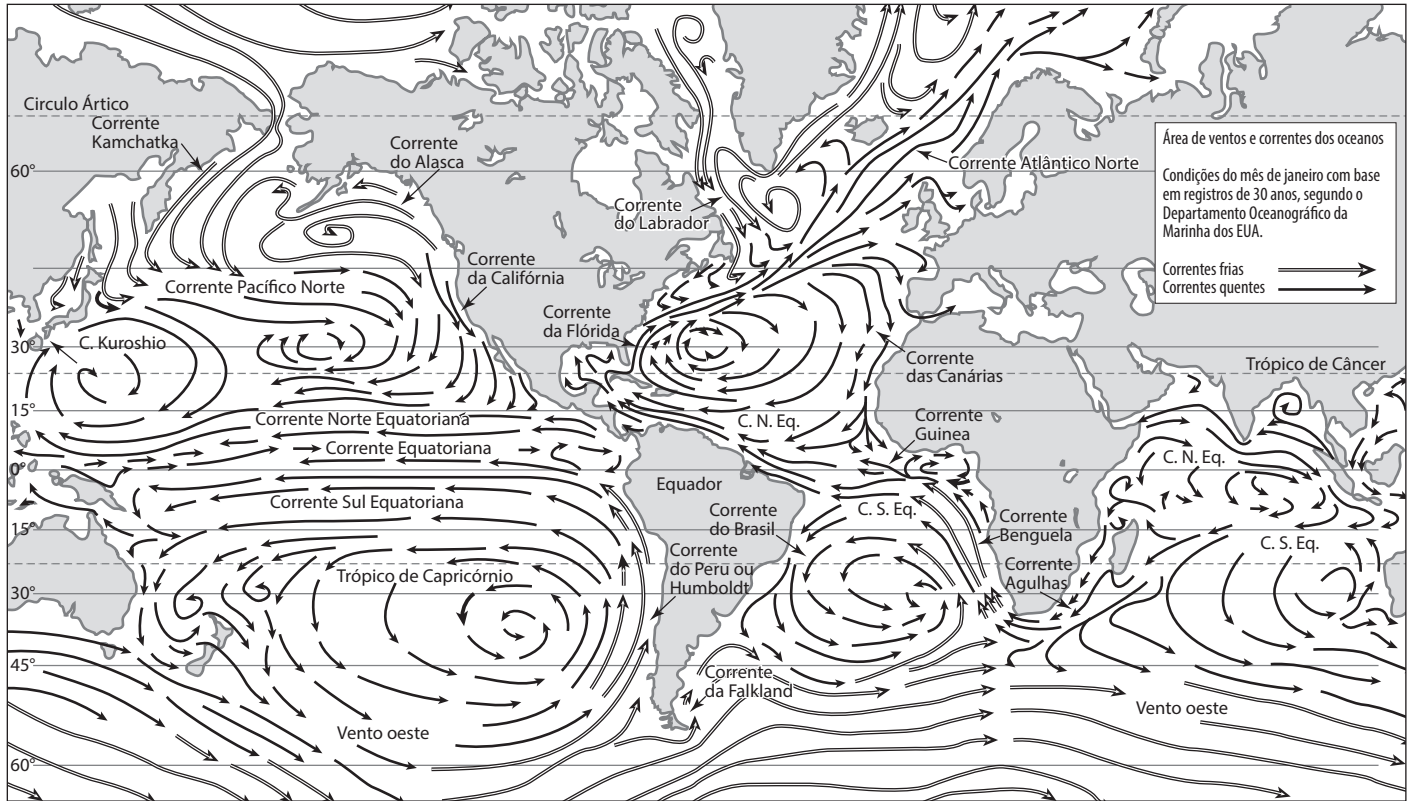


Figura A-1.5.1-b – Correntes marinhas. (Fonte: <http://www.learner.org/jnorth/tm/tulips/OceanExp.html/>).

Exercício A-1-a

Qual a densidade da água a 1.000 m de profundidade? Considerar a água a uma temperatura uniforme de 20° (massa específica de 998 kg/m³, com módulo de elasticidade volumétrico de 2,15 × 10⁸ kgf/m² ou 21,07 × 10⁸ N/m². Desprezar o efeito da compressão gradativa da água com o aumento da profundidade.

Solução:

A essa profundidade, a pressão da água é de 99,80 kgf/cm² (978 N/cm²). Calculando a massa específica da água e essa pressão, a diferença de pressão pode ser entendida como a força do peso por unidade de área, logo:

$$dp = \frac{F}{A} = \frac{m}{A} \times g = \rho_0 \times \frac{V}{A} \times g$$

$$dp = 998 \text{ (kg/m}^3\text{)} \times 1.000 \text{ (m)} \times 9,80 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

$$dp = 9.780.400 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

da Equação (1.1)

$$= dp = -\varepsilon \times \frac{dV}{V}, \quad \frac{dV}{V} = -\frac{dp}{\varepsilon}$$

$$\frac{dV}{V} = -\left(\frac{9.780.400}{21,07 \times 10^8}\right) = -0,004642$$

sendo

$$\rho_0 = \frac{m}{V}, \quad V = \frac{m}{\rho_0} \quad \text{e} \quad dV = \frac{m}{\rho} - \frac{m}{\rho_0}$$

$$\frac{dV}{V} = \frac{\rho_0}{\rho} - 1 \quad \therefore \quad \rho = \frac{\rho_0}{\left(1 + \frac{dV}{V}\right)}$$

sendo

$$\rho = \frac{998}{(1 - 0,004642)} = 1.002,65 \text{ kg/m}^3$$

portanto, houve um acréscimo de densidade de 0,47%:

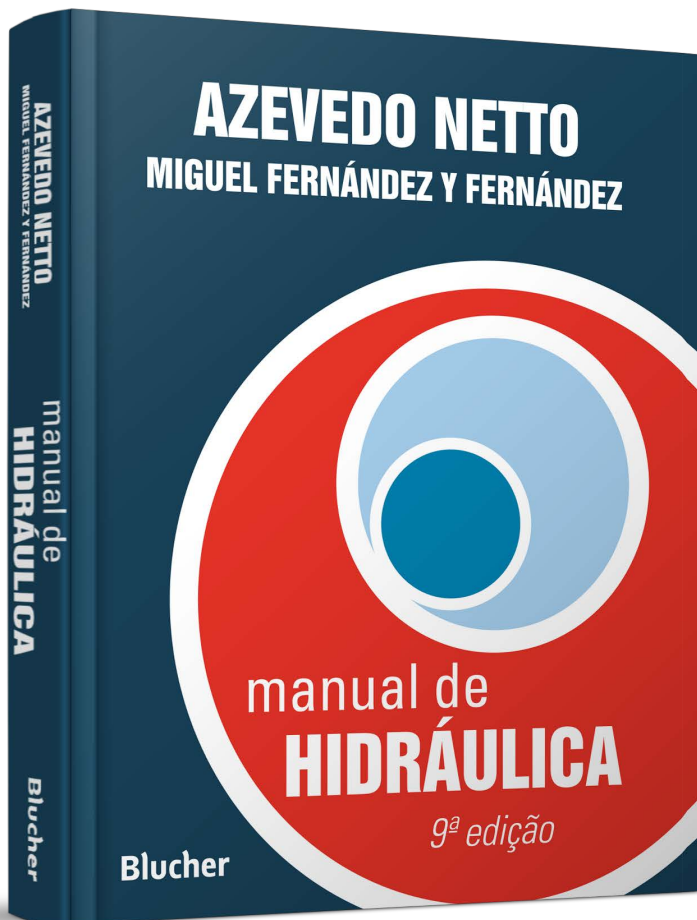
$$(1.002,65/998 = 1,00466).$$

Da mesma forma, sob uma coluna de água de 200 m, um litro de água nas CNTP reduz-se a 999 cm³ de água na mesma temperatura.

A água é cerca de 100 vezes mais compressível que o aço (variando com o tipo de aço).



Sifão invertido na adutora Hampaturi (barragem-captção, NA 4.203 m.s.n.m.) a Pampahasi (ETA, NA chegada 3.840 m.s.n.m.), que abastece La Paz (Bolívia) por gravidade. Tubulação em FFD, JE, PN 40, DN 800, 13,8 km, implantada em 1991 a 1992. (No ponto mais baixo passa na cota 3.632 m, após uma quebra de pressão). Projeto MFyF.



Clique aqui e:

[Veja na loja](#)

Manual de Hidráulica

**José Martiniano de Azevedo Netto
Miguel Fernandez y Fernandez**

ISBN: 9788521205005

Páginas: 632

Formato: 21 x 28 cm

Ano de Publicação: 2015

Peso: 1.665 kg
