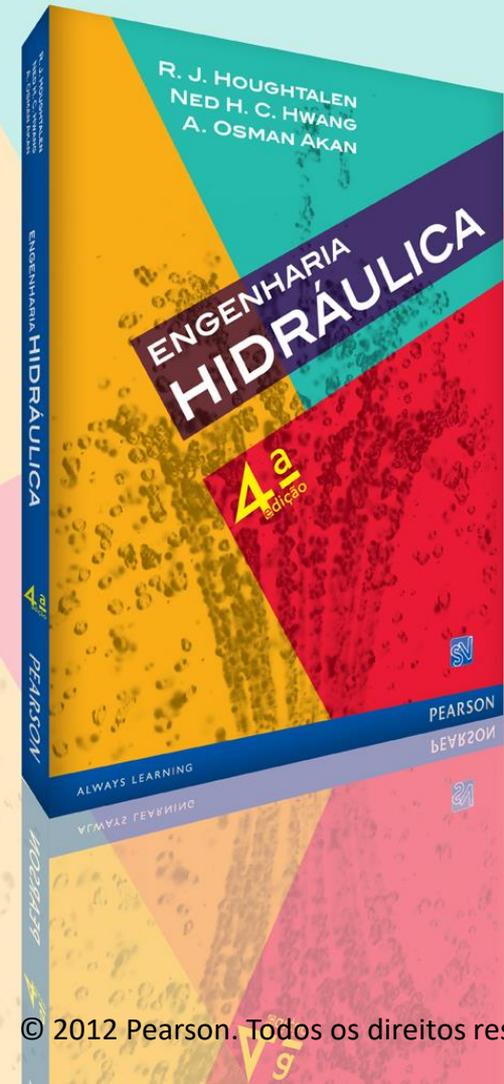


# Capítulo 1

## Propriedades fundamentais da água



# Propriedades fundamentais da água

R. J. HOUGHTALEN  
NED H. C. HWANG  
A. OSMAN AKAN  
ENGENHARIA  
**HIDRÁULICA**  
4ª edição

A palavra “hidráulica” vem de duas palavras gregas:

- “*hydor*” (que significa “água”) e
- “*aulos*” (que significa “tubo”).

É importante compreender as propriedades físicas da água para resolver de maneira adequada os vários problemas existentes nos sistemas de engenharia hidráulica.

Discutiremos a seguir as propriedades fundamentais da água que são importantes para problemas nos sistemas de engenharia hidráulica.

# A atmosfera e a pressão atmosférica da Terra

R. J. HOUGHTALEN  
NED H. C. HWANG  
A. OSMAN AKAN  
ENGENHARIA  
**HIDRÁULICA** 4<sup>a</sup>  
edição

- A atmosfera terrestre é uma camada espessa (cerca de 1.500 km) de gases mistos.
- O nitrogênio forma aproximadamente 78 por cento da atmosfera;
- o oxigênio é responsável por 21 por cento;
- e o 1 por cento restante é formado basicamente por vapor de água, argônio e alguns outros gases.

# A atmosfera e a pressão atmosférica da Terra

R. J. HOUGHTALEN  
NED H. C. HWANG  
A. OSMAN AKAN  
ENGENHARIA  
**HIDRÁULICA**  
4ª edição

- No nível do mar e sob condições normais, a pressão atmosférica é aproximadamente igual a  $1,014 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ , ou 1 bar.
- A unidade de pressão  $1 \text{ N/m}^2$  também é conhecida como 1 *pascal*.
- Na atmosfera, cada gás exerce uma pressão parcial independentemente de outros gases.
- Essa pressão parcial exercida pelo vapor da água na atmosfera é denominada *vapor de pressão*.

# As três fases da água

R. J. HOUGHTALEN  
NED H. C. HWANG  
A. OSMAN AKAN  
ENGENHARIA  
HIDRÁULICA

4<sup>a</sup>  
edição

- Dependendo do conteúdo de energia, a água pode apresentar-se em estado sólido, líquido ou gasoso.
- As três formas distintas da água são denominadas *fases*.
- Para fazer a água passar de uma fase à outra, é preciso que haja a adição ou subtração de energia da água.
- A quantidade de energia necessária para alterar a fase da água é conhecida como *energia latente*. Essa quantidade de energia pode estar na forma de calor ou pressão.

# As três fases da água

R. J. HOUGHTALEN  
NED H. C. HWANG  
A. OSMAN AKAN  
ENGENHARIA  
**HIDRÁULICA**  
4ª  
edição

- 1 cal é a energia necessária para aumentar em  $1^{\circ}\text{C}$  a temperatura de 1 grama (g) de água em estado líquido.
- Sob pressão atmosférica padrão, o calor específico da água e do gelo são, respectivamente, 1 e  $0,465 \text{ cal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$ .
- Para vapor de água, o calor específico sob pressão constante é  $0,432 \text{ cal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$ , e sob volume constante é  $0,322 \text{ cal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$ .
- Esses valores podem variar ligeiramente em razão da pureza da água.

# As três fases da água

R. J. HOUGHTALEN  
NED H. C. HWANG  
A. OSMAN AKAN  
ENGENHARIA  
**HIDRÁULICA**  
4<sup>a</sup>  
edição

- Para derreter 1 g de gelo, alterando a água da fase sólida para a líquida, é necessário um calor latente (calor de fusão) de 79,7 cal.
- Para congelar a água, é necessário que a mesma quantidade de energia térmica seja retirada de cada grama de água, de modo a reverter o processo.
- A evaporação, que é a mudança da água em estado líquido para o estado gasoso, requer um calor latente (calor de evaporação) de 597 cal/g.

# As três fases da água

Pressão de vapor da água.

Temperatura (°C)	Pressão de vapor		Temperatura (°C)	Pressão de vapor	
	Atm	N/m <sup>2</sup>		Atm	N/m <sup>2</sup>
-5	0,004162	421	55	0,15531	15.745
0	0,006027	611	60	0,19656	19.924
5	0,008600	873	65	0,24679	25.015
10	0,012102	1.266	70	0,30752	31.166
15	0,016804	1.707	75	0,38043	38.563
20	0,023042	2.335	80	0,46740	47.372
25	0,031222	3.169	85	0,57047	57.820
30	0,041831	4.238	90	0,69192	70.132
35	0,055446	5.621	95	0,83421	84.552
40	0,072747	7.377	100	1,00000	101.357
45	0,094526	9.584	105	1,19220	120.839
50	0,121700	12.331	110	1,41390	143.314

# Massa (densidade) e peso (peso específico)

R. J. HOUGHTALEN  
NED H. C. HWANG  
A. OSMAN AKAN  
ENGENHARIA  
**HIDRÁULICA**  
4<sup>a</sup>  
edição

- No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de medida para massa é o grama ou o quilograma (kg).
- A densidade depende não só do tamanho e do peso das moléculas, mas também da mecânica que as une.
- Em razão de sua estrutura molecular peculiar, a água é uma das poucas substâncias que se expandem ao congelar.
- A água alcança a densidade máxima de 4°C e torna-se menos densa quando resfriada ou aquecida. A densidade da água é apresentada na tabela a seguir.

# Massa (densidade) e peso (peso específico)

R. J. HOUGHTALEN  
NED H. C. HWANG  
A. OSMAN AKAN  
ENGENHARIA  
HIDRÁULICA

4<sup>a</sup>  
edição

Densidade e peso específico da água.

Temperatura (°C)	Densidade ( $\rho$ , kg/m <sup>3</sup> )	Peso específico ( $\gamma$ , N/m <sup>3</sup> )
0° (gelo)	917	8.996
0° (água)	999	9.800
4°	1.000	9.810
10°	999	9.800
20°	998	9.790
30°	996	9.771
40°	992	9.732
50°	988	9.692
60°	983	9.643
70°	978	9.594
80°	972	9.535
90°	965	9.467
100°	958	9.398

# Massa (densidade) e peso (peso específico)

- No sistema SI, o peso de um objeto é definido pelo produto entre sua massa ( $m$ , em gramas, quilogramas etc.) e a aceleração gravitacional ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  na Terra). A relação pode ser escrita como

$$W = mg$$

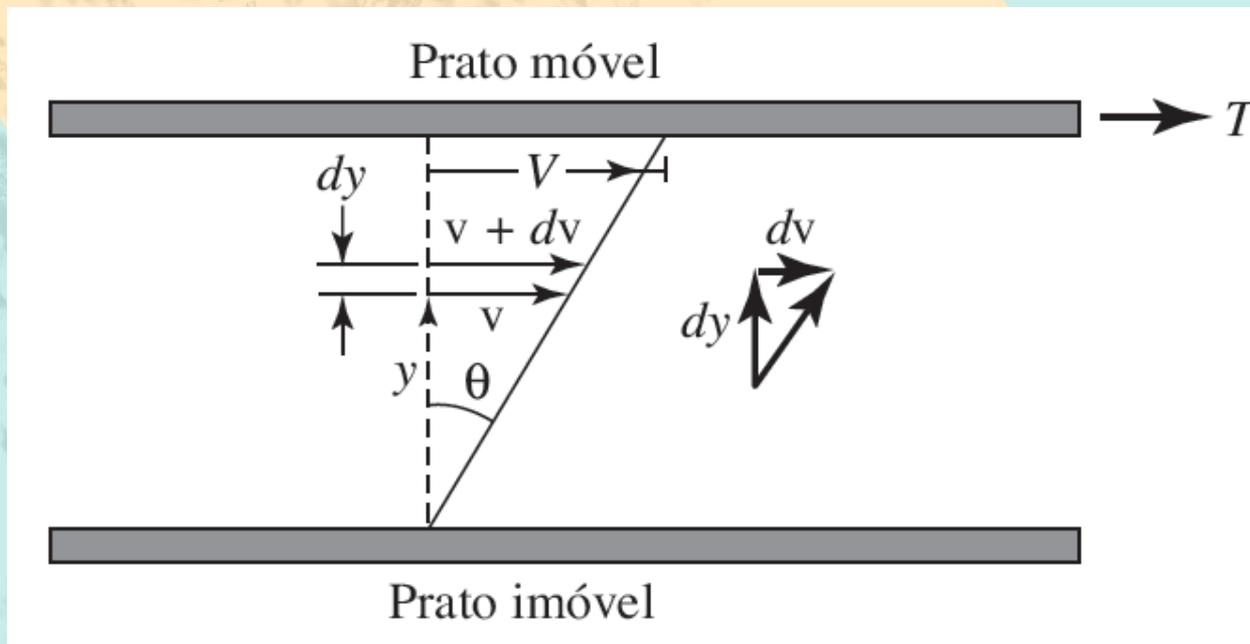
- O peso no sistema SI costuma ser expresso na unidade de força newton (N).
- Um newton é definido como a força necessária para acelerar 1 kg de massa a uma taxa de  $1 \text{ m/s}^2$ .

# Massa (densidade) e peso (peso específico)

- O *peso específico* (peso por volume de unidade) da água ( $\gamma$ ) pode ser determinado pelo produto entre a densidade ( $\rho$ ) e a aceleração gravitacional ( $g$ ).
- A razão entre o peso específico de qualquer líquido a uma determinada temperatura e a água a 4°C é denominada *gravidade específica* do líquido. Observe que o peso específico da água é mostrado como função da temperatura na tabela que vimos anteriormente.
- A unidade de massa no sistema britânico é o *slug*, a massa de um objeto que requer 1 libra de força para alcançar uma aceleração de 1 pé/s<sup>2</sup>.

# Viscosidade da água

- A água responde à tensão de corte apresentando uma deformação angular constante na direção do corte, conforme mostra a figura abaixo:



- O diagrama esquemático acima representa a base física da viscosidade.

# Viscosidade da água

- A resistência por unidade de área do prato superior (tensão de corte,  $\tau = R/A = T/A$ ) é proporcional à taxa de deformação angular no fluido,  $d\theta > dt$ . A relação pode ser escrita como

$$\tau \propto \frac{d\theta}{dt} = \frac{dx/dy}{dt} = \frac{dx/dt}{dy} = \frac{dv}{dy}$$

- onde  $v = dx/dt$  é a velocidade do elemento fluido. Por outro lado,

$$\tau = \mu \left( \frac{dv}{dy} \right)$$

- A constante proporcional  $\mu$  é a *viscosidade absoluta* do fluido.
- A Equação acima é bastante conhecida como *lei de Newton da viscosidade*.

# Viscosidade da água

- Na prática da engenharia, costuma ser conveniente conhecer o termo *viscosidade cinemática*,  $\nu$ , a qual é obtida dividindo-se a viscosidade absoluta pela densidade de massa do fluido à mesma temperatura:  $\nu = \mu/\rho$ .
- A viscosidade cinemática é expressa em  $\text{cm}^2/\text{s}$ .
- As viscosidades absolutas e as viscosidades cinemáticas da água pura e do ar são apresentadas na tabela a seguir como funções da temperatura.

# Viscosidade da água

## Viscosidades da água e do ar.

Temperatura (°C)	Água		Ar	
	Viscosidade ( $\mu$ ) N · s/m <sup>2</sup>	Viscosidade cinemática ( $\nu$ ) m <sup>2</sup> /s	Viscosidade ( $\mu$ ) N · s/m <sup>2</sup>	Viscosidade cinemática ( $\nu$ ) m <sup>2</sup> /s
0	$1,781 \times 10^{-3}$	$1,785 \times 10^{-6}$	$1,717 \times 10^{-5}$	$1,329 \times 10^{-5}$
5	$1,518 \times 10^{-3}$	$1,519 \times 10^{-6}$	$1,741 \times 10^{-5}$	$1,371 \times 10^{-5}$
10	$1,307 \times 10^{-3}$	$1,306 \times 10^{-6}$	$1,767 \times 10^{-5}$	$1,417 \times 10^{-5}$
15	$1,139 \times 10^{-3}$	$1,139 \times 10^{-6}$	$1,793 \times 10^{-5}$	$1,463 \times 10^{-5}$
20	$1,002 \times 10^{-3}$	$1,003 \times 10^{-6}$	$1,817 \times 10^{-5}$	$1,509 \times 10^{-5}$
25	$0,890 \times 10^{-3}$	$0,893 \times 10^{-6}$	$1,840 \times 10^{-5}$	$1,555 \times 10^{-5}$
30	$0,798 \times 10^{-3}$	$0,800 \times 10^{-6}$	$1,864 \times 10^{-5}$	$1,601 \times 10^{-5}$
40	$0,653 \times 10^{-3}$	$0,658 \times 10^{-6}$	$1,910 \times 10^{-5}$	$1,695 \times 10^{-5}$
50	$0,547 \times 10^{-3}$	$0,553 \times 10^{-6}$	$1,954 \times 10^{-5}$	$1,794 \times 10^{-5}$
60	$0,466 \times 10^{-3}$	$0,474 \times 10^{-6}$	$2,001 \times 10^{-5}$	$1,886 \times 10^{-5}$
70	$0,404 \times 10^{-3}$	$0,413 \times 10^{-6}$	$2,044 \times 10^{-5}$	$1,986 \times 10^{-5}$
80	$0,354 \times 10^{-3}$	$0,364 \times 10^{-6}$	$2,088 \times 10^{-5}$	$2,087 \times 10^{-5}$
90	$0,315 \times 10^{-3}$	$0,326 \times 10^{-6}$	$2,131 \times 10^{-5}$	$2,193 \times 10^{-5}$
100	$0,282 \times 10^{-3}$	$0,294 \times 10^{-6}$	$2,174 \times 10^{-5}$	$2,302 \times 10^{-5}$

# Tensão superficial e capilaridade

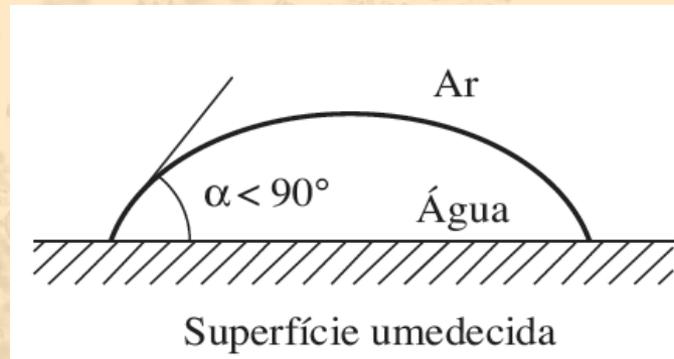
R. J. HOUGHTALEN  
NED H. C. HWANG  
A. OSMAN AKAN  
ENGENHARIA  
HIDRÁULICA

4<sup>a</sup>  
edição

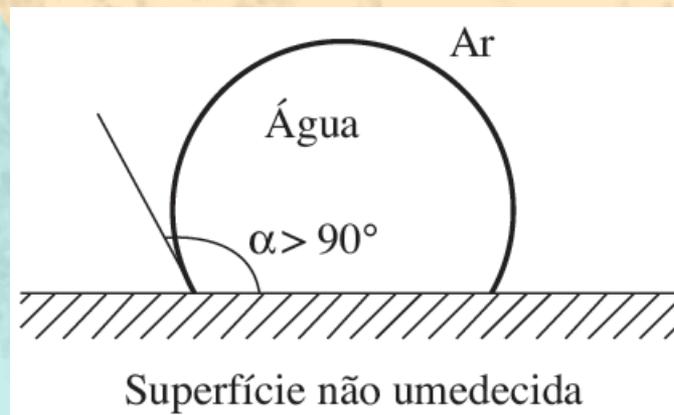
- As moléculas na superfície não conseguem se ligar em todas as direções e, por conseguinte, formam ligações mais fortes com as moléculas líquidas adjacentes.
- Isso faz que a superfície líquida busque uma área mínima possível, exercendo *tensão superficial* tangente à superfície ao longo de toda a área de superfície.
- A maioria dos líquidos adere a superfícies sólidas.
- A força de aderência varia em razão da natureza do líquido e da superfície sólida.

# Tensão superficial e capilaridade

- Se essa força for maior do que a coesão nas moléculas líquidas, então o líquido tende a se espalhar e molhar a superfície,



- Se a coesão for maior, forma-se uma pequena gota,



# Tensão superficial e capilaridade

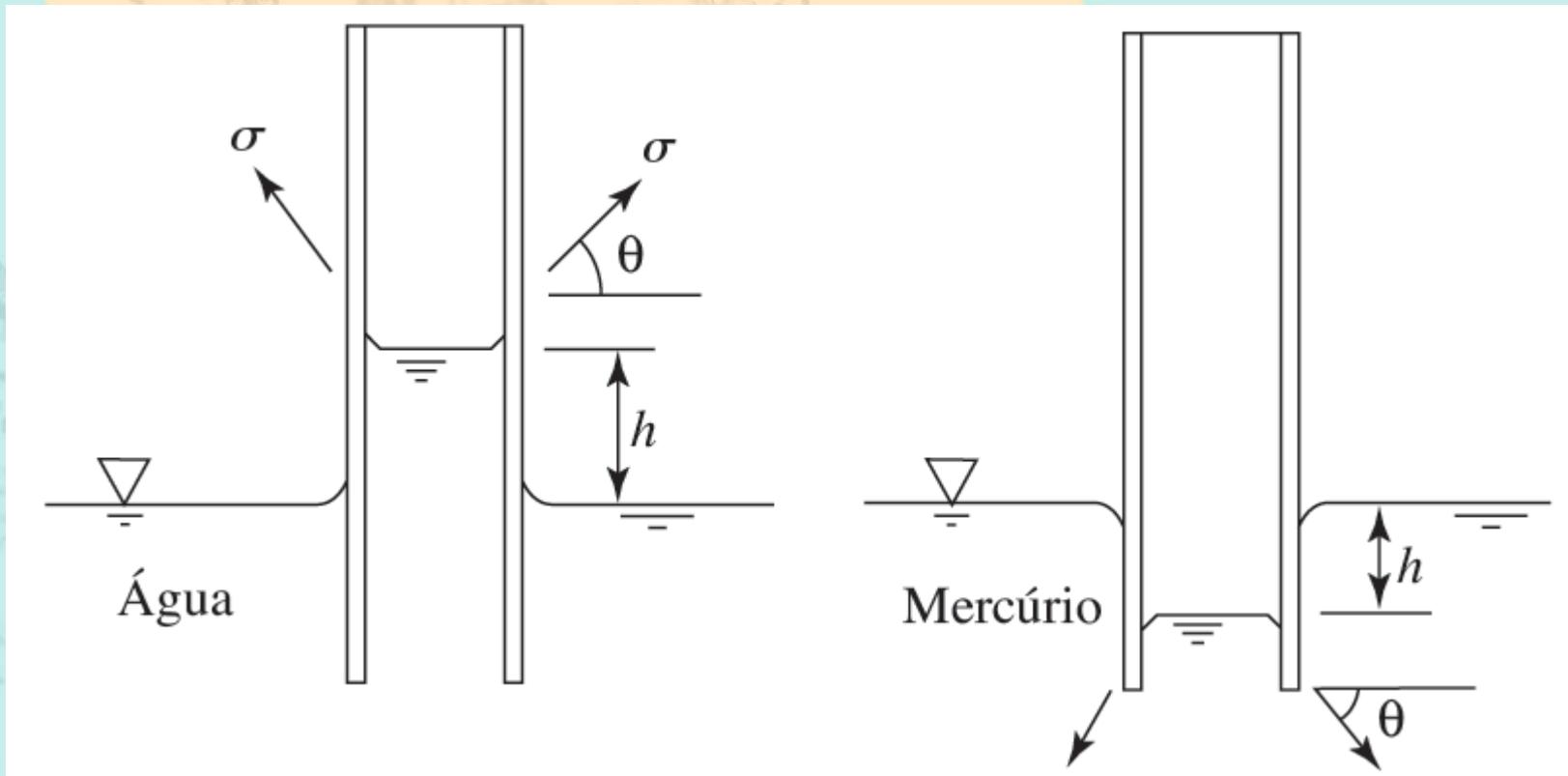
R. J. HOUGHTALEN  
NED H. C. HWANG  
A. OSMAN AKAN  
ENGENHARIA  
HIDRÁULICA

4<sup>a</sup>  
edição

- A água molha a superfície do vidro, mas o mercúrio não.
- Se pusermos um tubo de vidro vertical de diâmetro pequeno na superfície livre da água, veremos que a superfície de água no tubo se eleva.
- A mesma experiência feita com mercúrio mostrará que o líquido desce.
- Esses dois casos típicos são esquematicamente apresentados na figura a seguir. Esse fenômeno é conhecido como *ação capilar*.

# Tensão superficial e capilaridade

Ações capilares.



# Tensão superficial e capilaridade

- A magnitude da elevação (ou depressão) capilar,  $h$ , é determinada pelo equilíbrio da força de aderência entre o líquido e a superfície sólida e o peso da coluna de líquido acima (ou abaixo) da superfície livre de líquido.
- Quando o pequeno volume de líquido acima (ou abaixo) da base da meia-lua é negligenciado, a relação pode ser escrita como

$$(\sigma \pi D) \sen \theta = \frac{\pi D^2}{4} (\gamma h)$$

- Portanto,

$$h = \frac{4\sigma \sen \theta}{\gamma D}$$

# Elasticidade da água

- A compressibilidade da água é inversamente proporcional ao *módulo de elasticidade do volume*,  $E_b$ , também conhecido como *módulo de compressibilidade*.
- A relação pressão-volume pode ser escrita como

$$\Delta P = -E_b \left( \frac{\Delta Vol}{Vol} \right)$$

- onde  $Vol$  é o volume inicial, e  $\Delta P$  e  $\Delta Vol$  são as alterações correspondentes na pressão e no volume, respectivamente.

# Forças em um campo fluido

R. J. HOUGHTALEN  
NED H. C. HWANG  
A. OSMAN AKAN  
ENGENHARIA  
**HIDRÁULICA**  
4<sup>a</sup>  
edição

- As forças podem ser classificadas em três categorias básicas, de acordo com suas características físicas:
  1. **forças do corpo:** são aquelas que agem em todas as partículas em um corpo de água como resultado de algum corpo externo ou forças externas, mas não em razão do contato direto.
  2. **forças de superfície:** atuam na superfície do corpo de água por meio do contato direto.
  3. **forças lineares** (ou forças sobre uma distância de contato sólido-líquido): atuam sobre a superfície do líquido perpendicularmente a uma linha desenhada sobre ela.