

# Influência da temperatura na medição de perda de carga direta

JOSÉ CARLOS LEITÃO

Engenheiro Civil, coordenador de Acompanhamento e Controle do Sistema Produtor do Depto. de Controle e Apoio à Produção da Sabesp

**O** trabalho enfoca o método da medição de perda de carga direta e de que forma as trocas térmicas existentes entre a mangueira manométrica e o meio ambiente podem influir nos resultados. Procura mostrar ainda que a sutileza do fenômeno, bem como o hábito de se considerar alguns parâmetros hidráulicos como invariáveis, podem, em alguns casos, levar a resultados incorretos e em princípio de difícil compreensão. Finalmente, apresenta algumas recomendações, obtidas de pesquisa bibliográfica e de experiências obtidas em campo, que poderão ser bastante úteis para utilização correta do método.

Na grande maioria das formulações que se utiliza na Engenharia Hidráulica, é comum admitir-se alguns parâmetros como sendo constantes, tendo em conta que, em condições normais, não afetam de maneira significativa os resultados.

Assim, por exemplo, é habitual adotar-se para a água:  $\gamma = 1.000 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\rho = 102 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{s}^2$ ,  $\nu = 1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , desprezando-se o efeito da temperatura sobre estes parâmetros (ver Quadro 1, no fim do trabalho).

Do mesmo modo, é comum admitir-se  $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ , ignorando sua variação com a altitude.

Algumas vezes, entretanto, este hábito pode nos induzir a cometer erros, sem que percebamos, ou mesmo gerar resultados que, embora constataremos sua incorreção, sentimos dificuldade de explicá-los fisicamente. É o caso, por exemplo, de medições de perda de carga direta, quando se despreza o efeito da temperatura, o que pode levar a resultados totalmente incorretos, conforme se poderá observar nas considerações que se seguem nos itens seguintes.

## DESCRIÇÃO SUCINTA DO MÉTODO DA MEDIÇÃO DE PERDA DE CARGA DIRETA

A medição da perda de carga direta é um método bastante útil de ser utilizado em algumas situações, tais como:

- Quando a adutora em que se quer realizar ensaios de perda de carga é muito curta, o que exigiria precisão nas leituras de pressão, incompatíveis com os manômetros disponíveis.

- Quando se pretende localizar trechos com perda de carga localizada, por exemplo: obstruções.

- Neste caso, inicia-se com um método convencional de me-

dição de perda de carga, abrangendo toda a adutora, subdividindo-a posteriormente em trechos menores.

Quando o método convencional não for mais confiável, parte-se para o método das perdas de carga direta.

Para aplicação do método, devem-se seguir basicamente os seguintes passos (ver Fig. III, na página seguinte).

- Instalar tomadas de pressão, distantes entre si cerca de 100m.

- Instalar tap, em posição adequada, de modo a permitir medição de vazão com tubo Pitot.

- Interligar, através de mangueiras manométricas, dois pontos de tomada de pressão com um tubo "U" contendo líquido manométrico.

- Proceder às leituras das deflexões (h) no tubo "U", simultaneamente com as medições de vazão no tubo Pitot.

- Correlacionar os valores das deflexões "h" do líquido manométrico com a perda de carga na adutora, através da equação 3.

Com os dados anteriores, podem-se ainda obter coeficientes de perda de carga nos trechos analisados, utilizando-se equações tais como Hazen-William, Darcy etc.

## DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO QUE CORRELACIONA A DEFLEXÃO NO TUBO "U" COM A PERDA DE CARGA

### Desprezando-se o efeito de temperatura

Vamos inicialmente admitir como hipótese que o peso específico da água na mangueira manométrica e na adutora seja  $\gamma_a = 1.000 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , constante, e não sofre nenhum efeito térmico.

Deste modo, aplicando-se a equação fundamental do equilíbrio estático no plano (a-a) da Figura 1 temos

$$\begin{aligned} p_1 + (Z_1 - Z') \gamma_a &= p_2 + (Z_2 - h - Z') \gamma_a + \gamma_m h \\ p_1 - p_2 &= (Z_2 - Z_1) \gamma_a + (\gamma_m - \gamma_a) h \end{aligned} \quad (1)$$

Onde

$\gamma_m$  = Peso específico do líquido manométrico

h = Deflexão do líquido manométrico no tubo "U"

Com a equação de Bernoulli nas seções 1 e 2 obtemos:

$$p_1 - p_2 = (Z_2 - Z_1) \gamma_a + hf \gamma_a \quad (2)$$

Onde

hf = Perda de carga no trecho (1-2)

Igualando-se as expressões (1) e (2) obtemos

$$hf = \left( \frac{\gamma_m}{\gamma_a} - 1 \right) h \quad (3)$$

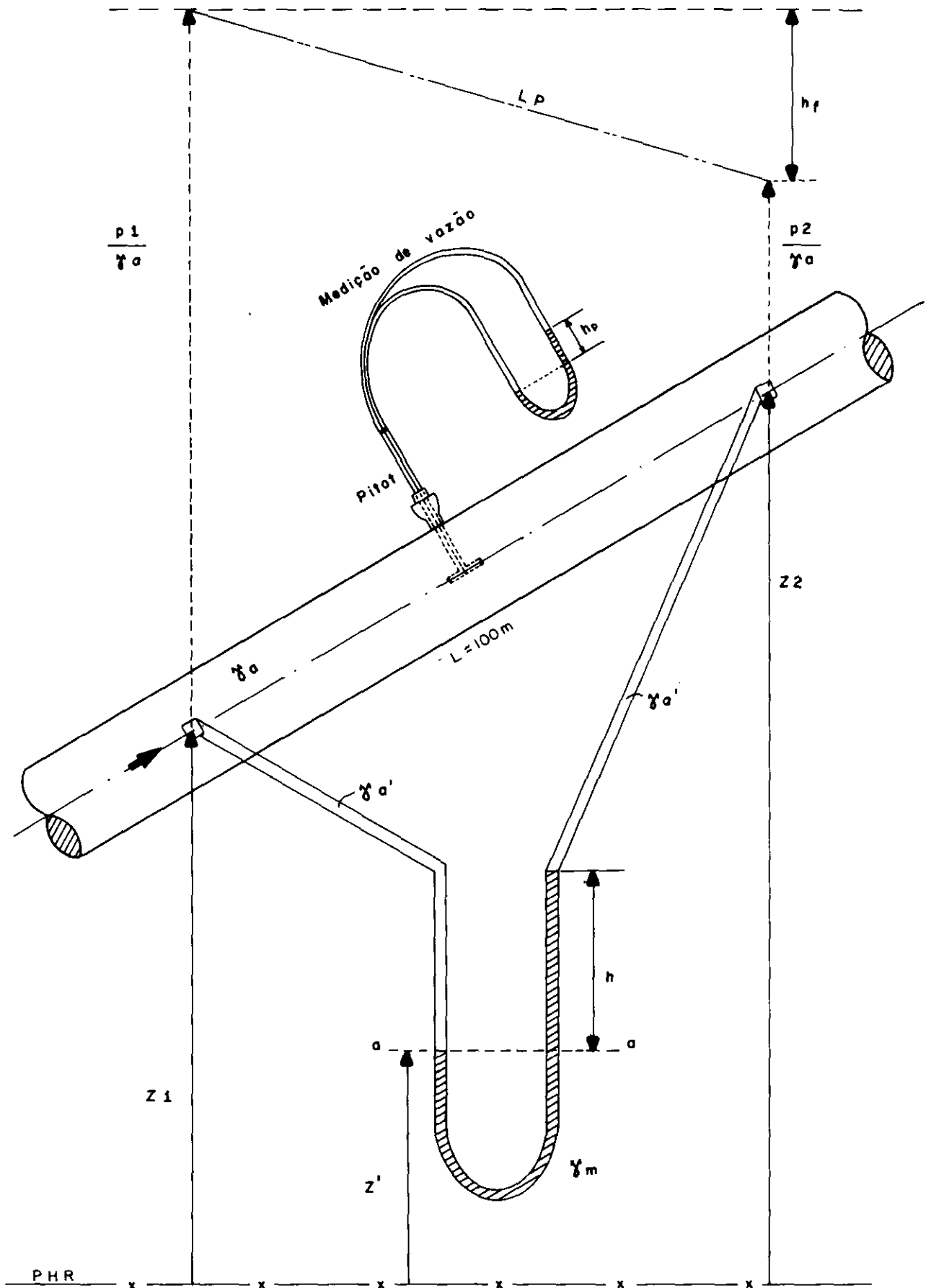
que é a expressão comumente encontrada na bibliografia.

### Análise correta levando-se em conta o efeito da temperatura

A equação fundamental do equilíbrio estático para fluidos

FIGURA 1

Esquema de medição de perda de carga direta



incompressível na sua forma diferencial é dada pela expressão

$$dp + \rho g dz = 0 \quad (4)$$

Assim, a diferença de pressão entre dois pontos pode ser calculada por:

$$\Delta p = \int_z^{z'} \rho g dz \quad (5)$$

Havendo distribuição uniforme de temperatura no líquido,  $\rho = \text{cte}$  e portanto:

$$\Delta p = \rho g \Delta z \quad (6)$$

No nosso caso, porém, a troca térmica existente entre a água contida na mangueira manométrica e o ambiente passa a ter influência significativa, de modo que a integral da expressão (5) será diferente da expressão (6); mesmo que  $Z = Z'$ , a integral (5) poderá ser diferente de zero, dependendo do caminho da integração (ver Fig. 2).

Como  $d\rho \neq 0$ , devido às trocas térmicas, se no caminho de integração os Incrementos forem diferentes de 0 ( $dZ \neq 0$ ), então a integração da equação (5) será diferente de zero.

$$\int_z^{z'} \rho g dz \neq 0$$

Para que a integral acima seja nula, é necessário que no mínimo uma das seguintes condições seja satisfeita:

- $d\rho = 0$ , que só acontecerá se houver distribuição uniforme de temperatura na mangueira manométrica, sem trocas térmicas com o ambiente.

- $dZ = 0$ , para tal a mangueira manométrica deverá estar na posição horizontal (ver Fig. 2).

Neste caso, a integral da expressão (5) será nula, independente da existência ou não de trocas térmicas.

Com base nestes aspectos, pode-se concluir que a utilização pura e simples da expressão (3) pode levar a resultados totalmente incorretos.

### Equacionamento simplificado levando-se em conta a influência da temperatura

Para se equacionar corretamente o fenômeno, seria necessário conhecer o valor da integral de  $\rho$  em função de  $Z$ , o que na prática é muito difícil.

Deste modo, a fim de quantificar, ainda que de forma simplificada, as influências que as trocas térmicas provocam e ajudar na compreensão do fenômeno, na forma como ele ocorre no campo, vamos admitir algumas hipóteses simplificadoras:

- A temperatura da água na adutora permanece constante, assim como seu peso específico ( $\gamma_a$ ).

- A temperatura da água na mangueira manométrica poderá variar até atingir a temperatura ambiente.

- O peso específico da água na mangueira manométrica é constante ( $\gamma_a'$ ) em toda sua extensão e é função unicamente da temperatura (ver Quadro 2).

Nestas condições, as equações (1) e (2) tomarão a seguinte forma:

$$(p_1 - p_2) = (Z_2 - Z_1) \gamma_a' + (\gamma_m - \gamma_a') h' \quad (7)$$

$$(p_1 - p_2) = (Z_2 - Z_1) \gamma_a + h f' \gamma_a \quad (8)$$

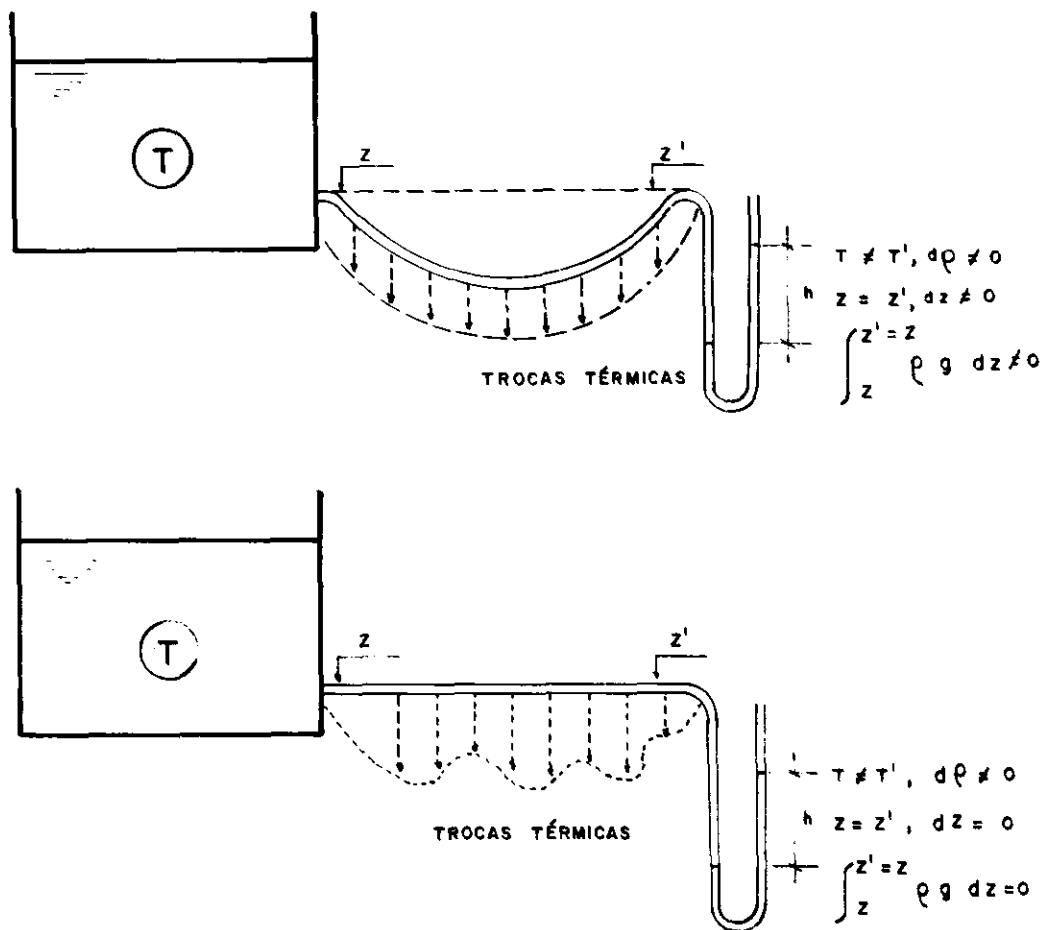


FIGURA 2

Efeitos das trocas térmicas na integração da equação fundamental do equilíbrio estático

Igualando-se as duas expressões:

$$hf' = \left( \frac{\gamma m}{\gamma a} - \frac{\gamma a'}{\gamma a} \right) h' + (Z_2 - Z_1) \left( \frac{\gamma a'}{\gamma a} - 1 \right) \quad (9)$$

Extraindo-se  $h'$  da expressão anterior temos:

$$h' = \frac{hf}{\left( \frac{\gamma m}{\gamma a} \right) - \left( \frac{\gamma a'}{\gamma a} \right)} - \frac{(\gamma a' - \gamma a) (Z_2 - Z_1)}{(\gamma m - \gamma a)} \quad (10)$$

A expressão (10) pode ser decomposta em:

$$h = h' - \Delta h \quad (11)$$

Onde:

$$h' = \frac{hf}{\left( \frac{\gamma m}{\gamma a} \right) - \left( \frac{\gamma a'}{\gamma a} \right)} ; \Delta h = \left( \frac{\gamma a' - \gamma a}{(\gamma m - \gamma a)} \right) \Delta z$$

Pode-se observar das expressões anteriores que a deflexão " $h$ " lida no tubo "U" é sensível às variações de temperatura na mangueira, já que a temperatura na adutora permanece constante.

A diferença de nível  $\Delta Z$  atuará como elemento amplificador desta sensibilidade.

### EXEMPLO NUMÉRICO

Vamos admitir um trecho descendente de adutora ( $\Delta Z < 0$ ), cuja perda de carga seja  $hf = 5\text{cm}$  e a temperatura da água ( $T_1$ ) igual a  $20^\circ\text{C}$ .

Durante os ensaios, a temperatura da água na mangueira manométrica varia uniformemente (hipótese) até atingir a temperatura ambiente ( $T_2$ ) que é  $30^\circ\text{C}$ .

O peso específico do líquido manométrico ( $\gamma m$ ) é  $1.250 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Admitindo-se as hipóteses do item "Equacionamento simplificado..." e utilizando suas equações, chegamos aos resultados apresentados no Quadro 2, do qual podemos obter as seguintes informações:

- Apesar do peso específico variar de apenas 0,26% na faixa de temperatura de  $20$  a  $30^\circ\text{C}$ , o efeito desta variação será considerável na deflexão do tubo "U".

- Se o desnível geométrico entre os pontos de tomada de pressão ( $\Delta Z$ ) for de  $-15\text{m}$ , então:

- A deflexão inicial no tubo "U", logo após a estabilização do menisco, quando:  $T_2 = T_1 = 20^\circ\text{C}$ , será  $h = 19,82 \text{ cm}$  e  $\Delta h = 0$ .

- Quando a temperatura da água na mangueira ( $T_2$ ) subir para  $25^\circ\text{C}$ , o valor de  $h$  cairá para  $12,82 \text{ cm}$ , pois  $\Delta h = 6,91 \text{ cm}$ .

- A sensibilidade do sistema aumenta para desníveis maiores.

Por exemplo: para um desnível de  $-20 \text{ m}$ , quando a temperatura da água na mangueira atingir  $30^\circ\text{C}$ , a deflexão no tubo "U" se inverterá,  $h = -0,72 \text{ cm}$ .

- Se o desnível geométrico ( $\Delta Z$ ) for nulo, o efeito da temperatura será desprezível.

Na prática, esta afirmação nem sempre é verdade, conforme visto no item "Análise correta levando-se em conta o efeito da temperatura".

— Se utilizarmos a expressão (3) para calcular a perda de carga  $hf$ , admitindo-se  $\gamma a = 1.000 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , para o caso de:

$\Delta Z = -15 \text{ m}$ , teremos:

- O valor da deflexão lida no tubo "U" será:  $12,82 \text{ cm}$ .

- A perda de carga calculada será:  $hf = (1,25 - 1) 12,82 = 3,21 \text{ cm}$ .

- Como a perda de carga real é de  $5\text{cm}$ , estará se cometendo um erro absurdo de  $35,9\%$ .

— O efeito que o desnível geométrico  $\Delta Z$  causa na leitura do menisco ( $h$ ), no tubo "U", depende do sinal de  $\Delta Z$ , ou seja:

- Para  $\Delta Z < 0$  (trecho descendente) o efeito será no sentido de diminuir a deflexão  $h$ , conforme exemplos anteriores.

- Para  $\Delta Z > 0$  (trecho ascendente) o efeito é no sentido de aumentar a deflexão.

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Para que o método da medição de perda de carga direta possa ser aplicado com correção, explorando todas as vantagens que pode oferecer, é necessário que se tenha um adequado conhecimento dos fatores que podem influenciar nos resultados.

Deste modo, esperamos que as considerações apresentadas nos itens anteriores possam contribuir favoravelmente neste sentido.

Complementarmente, apresentamos a seguir um resumo de recomendações que poderão ser úteis para a utilização adequada do método aqui descrito:

a) Os testes deverão preferencialmente ser executados nos períodos em que a diferença da temperatura da água na adutora e temperatura ambiente seja mínima. À noite ou de madrugada, por exemplo.

b) A mangueira manométrica deverá ser protegida durante todo o teste, para minimizar trocas térmicas com o ambiente.

c) Deve-se drenar continuamente a mangueira até o momento de se iniciar o teste, a fim de remover possíveis bolhas de ar e manter a temperatura de água na mangueira o mais próximo possível à temperatura da água na adutora.

d) Após a drenagem final da mangueira, é importante observar, com cuidado, o momento em que a coluna do líquido manométrico se estabiliza no tubo "U" e então iniciar rapidamente as leituras das deflexões.

O tempo de duração das leituras, em geral, não deve exceder a 5 minutos.

e) Sempre que houver possibilidade, a mangueira manométrica deve ter um traçado o mais horizontal possível, pelos motivos amplamente discutidos no item "Análise correta levando-se em conta o efeito da temperatura".

Pelos mesmos motivos é recomendável que o tubo "U" seja posicionado equidistante das seções 1 e 2.

f) Respeitadas as recomendações anteriores, pode-se utilizar a expressão (3) para cálculo de perda de carga.

g) Conforme visto anteriormente, os efeitos da variação do peso específico em função da temperatura são amplificados pelo desnível existente entre as seções de teste ( $Z_1 - Z_2$ ).

Deste modo, testes realizados em trechos horizontais são menos susceptíveis a erros. Em qualquer circunstância, porém, todos os cuidados anteriores deverão ser tomados durante os testes.

**QUADRO 1**  
**Propriedades físicas da água doce à pressão atm.**  
**normal**  
**(ref. 3)**

Temp. $\theta^{\circ} \text{C}$	Pêso esp. $\gamma$ $\text{kg}^*/\text{m}^3$	Densidade $\rho$ $\text{kg}^*/\text{seg}^2/\text{m}^4$	Viscosidade $\mu$ $\text{kg}^*/\text{seg}/\text{m}^2$	Viscosidade cinemática $\nu$ $\text{m}^2/\text{s}$	Módulo el. $\epsilon$ $\text{kg}^*/\text{m}^2$	Observações
0	999,87	101,93	$181 \times 10^{-6}$	$1,79 \times 10^{-6}$	$1,99 \times 10^8$	Nos cálculos habituais da Hidráulica costu- ma-se adotar $\gamma = 1000 \text{ kg}^*/\text{m}^3$ $\rho = 102 \frac{\text{kg}^*\text{seg}^2}{\text{m}^4}$ $\nu = 1,01 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{seg}.$
4	1000,00	101,94	$160 \times 10^{-6}$	$1,57 \times 10^{-6}$	—	
10	999,73	101,91	$134 \times 10^{-6}$	$1,31 \times 10^{-6}$	$2,09 \times 10^8$	
20	998,23	101,76	$103 \times 10^{-6}$	$1,01 \times 10^{-6}$	$2,18 \times 10^8$	
30	995,67	101,50	$84 \times 10^{-6}$	$0,83 \times 10^{-6}$	$2,20 \times 10^8$	
40	992,24	101,14	$67 \times 10^{-6}$	$0,66 \times 10^{-6}$	$2,21 \times 10^8$	
50	988,07	100,72	$56 \times 10^{-6}$	$0,55 \times 10^{-6}$	$2,22 \times 10^8$	
60	982,30	100,23	$47 \times 10^{-6}$	$0,46 \times 10^{-6}$	$2,23 \times 10^8$	
80	971,80	99,06	$37 \times 10^{-6}$	$0,37 \times 10^{-6}$	—	
100	958,40	97,70	$28 \times 10^{-6}$	$0,29 \times 10^{-6}$	—	

**QUADRO 2**  
**Cálculo dos parâmetros do item "Exemplo numérico"**

TEMPERATURA AMBIENTE (T2) $^{\circ} \text{C}$	PESO ESPECÍFICO DA ÁGUA ( $\gamma_a'$ ) $\text{Kg}^* \text{m}^{-3}$	VARIACÃO DE $\gamma_a'$ %	$h'$ (cm)	$\Delta h$ (cm)				
				$\Delta Z$ (m)				
				0	-5,0	-10,0	-15,0	-20,0
20	998,23	—	19,82	0	0	0	0	0
25	997,07	0,12	19,73	0	2,30	4,61	6,91	9,21
30	995,67	0,26	19,62	0	5,06	10,17	15,25	20,34

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1 — Garcez, L.N. — *Elementos de Mecânica dos Fluidos*, 3.ª Edição, Vol. 1, São Paulo, Edit. Edgard Blucher, 1977.

2 — Lencastre, A. — *Manual de Hidráulica Geral*, 1.ª Edição, São Paulo, Edit. Edgard Blucher, 1972.

3 — Vieira, R.C.C. — *Atlas de Mecânica dos Fluidos*, 1.ª Edição, 3 Vols., São Paulo, Edit. Edgard Blucher, 1971.