

CÁLCULO DE TUBULAÇÕES SOB PRESSÃO



Estreito, contruída em seguida a Furnas e logo a jusante desta, inaugurada em 1969, permitiu um reforço substancial de energia para a área mais industrializada do Brasil na ocasião. Recorde em prazo de implantação e em economia (Fonte: IESA Notícias).

8.1 – INTRODUÇÃO

No projeto de uma tubulação, a questão principal é determinar a quantidade de energia necessária para “empurrar” a quantidade de água desejada entre um ponto e outro dessa tubulação. _

Engenheiros e pesquisadores que se ocuparam da questão, buscaram sempre encontrar uma fórmula prática que permitisse a solução desse problema. Normalmente, num abastecimento de água por gravidade, os dados conhecidos são a carga disponível e a vazão desejada, é a incógnita é o diâmetro do tubo. Mas qualquer combinação de parâmetros conhecidos ou por determinar é freqüente no dia-a-dia dos engenheiros. Por exemplo, em geração hidrelétrica é comum conhecer a vazão necessária para a turbina, a altura geométrica entre o nível de água a montante e a jusante e a perda de carga máxima admissível, sendo a incógnita novamente o diâmetro.

8.2 – O MÉTODO EMPÍRICO E A MULTIPLICIDADE DE FÓRMULAS

Conforme visto no item 7.7, a fórmula de Darcy-Weisbach ou fórmula Universal, apresenta o inconveniente de precisar de aferição de um coeficiente f que nem sempre é transladável de uma situação para outra, o que torna sua utilização problemática.

Assim, diversos engenheiros e pesquisadores dedicaram-se a lançar os dados observados na prática em gráficos e tentar desenvolver equações empíricas a partir dos mesmos.

A fórmula empírica consagrada pelo uso é a fórmula de Hazen-Williams (ou Williams-Hazen) que, pela tradição de bons resultados e simplicidade de uso via tabelas, há de permanecer em uso por muito tempo no meio dos engenheiros, em que pese a campanha pelo abandono das fórmulas empíricas e tentativas de obrigatoriedade do uso do método científico. Tal colocação de obrigatoriedade de fórmula, já incluída em diversas normas brasileiras, parece ser exigência desnecessária que extrapola os objetivos de normalização.

As fórmulas empíricas, normalmente só se aplicam ao líquido em que foram ensaiadas, a temperaturas semelhantes, uma vez que não incluem termos relativos às propriedades físicas do líquido (fluido).

canalizações, depois de postas em serviço, são ensaiadas de modo conveniente para a determinação das suas características hidráulicas; mesmo assim os resultados do seu funcionamento, invariavelmente, são classificados como bons.

Como os resultados obtidos com o emprego de fórmulas diferentes chegam a variar de 100%, Fanning, em seu tratado, ponderou: "Graves erros podem provir do uso pouco racional e inconveniente das fórmulas. O conhecimento completo da origem de uma fórmula é essencial para a segura aplicação prática".

No presente capítulo serão feitas algumas considerações, como contribuição para o melhor esclarecimento do assunto e fixação de critérios mais racionais para a escolha de uma fórmula.

8.2.2 — Fórmula de Darcy

Darcy teve o grande mérito de ter sido o primeiro investigador a considerar a natureza e o estado das paredes dos tubos, isto é, foi quem primeiro apresentou uma fórmula moderna na atual acepção da palavra.

Foi Darcy um verdadeiro gênio da Hidráulica; com base em apenas duzentas observações, obteve uma fórmula cuja utilidade e aplicação têm sido reconhecidas e asseguradas há cerca de 150 anos.

Analisando os próprios dados do antigo diretor da Repartição de Águas de Paris, verifica-se que, para ele, o expoente n da velocidade na expressão geral

$$J = k \frac{v^n}{D^p}$$

está compreendido entre 1,76 e 2. Entretanto, em sua fórmula, Darcy, como os demais pesquisadores de sua época, adotou o expoente 2. Considerando-se que aquele hidráulico tinha em vista estabelecer uma fórmula prática, para uso generalizado, e que no seu tempo eram desconhecidas as régua de cálculo e a Nomografia, assim como eram praticamente inexistentes as tabelas, a orientação tomada por Darcy veio a seu crédito (embora os oficiais de Napoleão já usassem régua para a solução rápida dos problemas de balística, somente em 1859 surgiu a régua logarítmica de Mannheim.).

Um fato pouco conhecido e que demonstra o bom-senso e o espírito cuidadoso de Darcy é os seus dados e observações geralmente se referirem a tubos novos. Todavia ele soube admitir, com critério razoável, o fenômeno do envelhecimento dos tubos, dobrando os seus coeficientes.

1 — Apresentação alemã da Fórmula de Darcy (Forcheimer):

Com relação à expressão geral de resistência oposta ao escoamento (item 7.7):
 $D \cdot J = \varphi (v)$

Darcy admitiu: $\varphi (v) = kv^2$.

A fórmula de Darcy pode ser escrita:

$$J = KQ^2 \quad \text{equação (1a)}$$

$$\frac{v^2}{2g} = K'Q^2 \quad \text{equação (1b)}$$

$$v = K''Q \quad \text{equação (1c)}$$

Também é importante anotar que tais fórmulas assumem que o escoamento é sempre turbulento, que é o que ocorre na prática com raríssimas exceções, para as quais o leitor deverá estar atento.

As fórmulas empíricas, são fórmulas monômicas, por isso facilmente calculadas e tabeladas.

O grande número de fórmulas existentes para o cálculo de canalizações certamente impressiona e põe em dúvida aqueles que se iniciam nesse setor da hidráulica aplicada.

Desde a apresentação da fórmula de Chézy, em 1775, que representou a primeira tentativa para exprimir algebricamente a resistência ao longo de um conduto, inúmeras foram as expressões propostas para o mesmo fim, muitas das quais ainda hoje são reproduzidas e encontradas nos manuais de Hidráulica. No prelo deste capítulo foram compiladas numerosas fórmulas, podendo-se dizer que existam mais de cem.

Parece mesmo ter havido época em que todos os engenheiros hidráulicos — uns mais, outros menos — preocupavam-se no sentido de apresentar fórmulas próprias, ou, pelo menos, de prestigiar fórmulas "nacionais". Como curiosidade, mantêm-se nesta edição o Quadro 8.1 a seguir, onde se listam as supostas 40 fórmulas principais:

QUADRO 8.1 — Algumas fórmulas práticas

Ano	Autor	País	Ano	Autor	País
1	1775	Chézy	21	1877	Fanning
2	1779	Dubuat	22	1877	Hamilton Smith
3	1791	Woltmann	23	1878	Colombo
4	1796	Eyrekweub	24	1878	Darrach
5	1800	Coulomb	25	1880	Ehrmann
6	1802	Eisenmann	26	1880	Iben
7	1804	Prony	27	1881	Franck
8	1825	D'Aubuisson	28	1883	Reynolds
9	1828	Tadini	29	1884	Thrupp
10	1845	Weisbach	30	1886	Unwin
11	1851	Saint Venant	31	1887	Stearns-Brusch
12	1854	Hagen	32	1889	Geslain
13	1855	Dupuit	33	1889	Tutton
14	1855	Leslie	34	1890	Manning
15	1855	Darcy	35	1892	Flamant
16	1867	Ganguillet-Kutter	36	1896	Lang
17	1867	Levy	37	1898	Fornié
18	1868	Bresse	38	1902	Hiram-Mills
19	1868	Gauclier	39	1903	Christen
20	1873	Lampe	40	1903*	Hazen-Williams

* Verificada em 1920 e em 1994.

8.2.1 — Critério para a adoção de uma fórmula

Evidentemente, uma expressão não deve ser adotada simplesmente por motivos de simpatia pelo nome do autor, pela sua escola ou país de origem, ou, ainda, pelo fato de a fórmula já ter sido empregada com "bons resultados". Raramente as

A Tab. 8.1 apresenta os valores de K , K' e K'' .

Diâmetros (mm)		K		K'		K''	
		Tubos usados	Tubos novos				
10	116 785 000,0000	58 392 500,0000	8 263 800,0000			12 732,0000	
20	2 338 500,0000	1 169 250,0000	516 490,0000			3 183,0000	
30	250 310,0000	125 155,0000	102 022,0000			1 414,7000	
40	52 560,0000	26 280,0000	32 281,0000			795,8000	
50	15 874,0000	7 937,0000	13 222,0000			509,3000	
60	6 021,0000	3 011,0000	6 376,4000			353,6800	
75	1 990,0000	995,0000	2 730,0000			230,0000	
100	412,4000	206,2000	826,3800			127,3200	
125	133,0000	66,5000	344,0000			81,9000	
150	50,6400	25,3200	163,2400			56,5900	
200	11,5700	5,7900	51,6490			31,8310	
250	3,7050	1,8530	21,1550			20,3720	
300	1,4680	0,7340	10,2020			14,1470	
350	0,6704	0,3852	5,5070			10,3940	
400	0,3413	0,1707	3,2280			7,9580	
450	0,1880	0,0940	2,0150			6,2880	
500	0,1104	0,0552	1,3220			5,0930	
550	0,0683	0,0342	0,9030			4,2100	
600	0,0440	0,0220	0,6380			3,5370	

Exercício 8.1 - Para o abastecimento de água de uma grande fábrica será executada uma linha adutora com tubos de ferro fundido numa extensão de 2 100 m. Dimensionar a canalização com capacidade de 25 ℓ/s . O nível de água na barragem de captação é 615 m e a cota da canalização na entrada do reservatório de distribuição é de 599,65 m.

$$L = 2\ 100\text{ m}$$

$$h_f = 615 - 599,65 = 15,35\text{ m}$$

$$J = \frac{H_f}{L} = \frac{15,35}{2\ 100} = 0,0073\text{ m/m}$$

$$Q = 25\ \ell/s = 0,025\text{ m}^3/s$$

São dados J e Q ; a incógnita é D (problema tipo IV). Calcule-se:

$$J = KQ^2 \therefore K = \frac{J}{Q^2} = \frac{0,0073}{0,025^2} = 11,7$$

Para esse valor de K , encontra-se, na Tab. 8.1, $D = 0,20\text{ m}$ (tubos usados)

2 — Apresentação americana da Fórmula de Darcy

Modernamente apresenta-se a expressão de Darcy com a seguinte forma:

$$h_f = f \frac{Lv^2}{D2g}$$

equação (2)

onde h_f = perda de carga (m);
 f = coeficiente de atrito;
 L = comprimento da canalização (m);
 v = velocidade média (m/s);
 g = aceleração da gravidade (9,8 m/s²).

Tabela 8.2 — Valores do coeficiente de atrito " f " na fórmula de Darcy (apresentação americana), para tubos novos de ferro fundido e de aço, conduzindo água fria						
Diâmetro nominal (mm)	Velocidade média em m/s					
	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,50
13	0,041	0,037	0,034	0,032	0,031	0,029
19	0,040	0,036	0,033	0,031	0,030	0,028
25	0,039	0,034	0,032	0,030	0,029	0,027
38	0,037	0,033	0,031	0,029	0,029	0,026
50	0,035	0,032	0,030	0,028	0,027	0,026
75	0,034	0,031	0,029	0,027	0,026	0,024
100	0,033	0,030	0,028	0,026	0,025	0,023
150	0,031	0,028	0,026	0,025	0,024	0,022
200	0,030	0,027	0,025	0,024	0,024	0,022
250	0,028	0,026	0,024	0,023	0,023	0,021
300	0,027	0,025	0,023	0,022	0,021	0,019
350	0,026	0,024	0,022	0,021	0,021	0,018
400	0,024	0,023	0,022	0,021	0,021	0,018
450	0,024	0,022	0,021	0,020	0,020	0,017
500	0,023	0,022	0,020	0,020	0,019	0,017
550	0,023	0,021	0,019	0,019	0,018	0,016
600	0,022	0,020	0,019	0,018	0,017	0,015

Tabela 8.3 — Valores do coeficiente de atrito " f " na fórmula de Darcy (apresentação americana), para tubos usados de ferro fundido e de aço e para tubulações de concreto, conduzindo água fria

Diâmetro nominal (mm)	Tubos de aço e de ferro					Tubos de concreto novos ou velhos	
	Com 10 anos de uso		Velhos		qualquer	0,50	
	0,50	1,00	1,50	3,00		1,00	1,50
25	0,054	0,053	0,052	0,051	0,071	—	—
50	0,048	0,047	0,046	0,045	0,059	—	—
75	0,044	0,043	0,042	0,041	0,054	—	—
100	0,041	0,040	0,039	0,038	0,050	—	—
150	0,037	0,036	0,035	0,034	0,047	—	—
200	0,035	0,034	0,033	0,032	0,044	—	—
250	0,033	0,032	0,031	0,030	0,043	—	—
300	0,031	0,031	0,030	0,029	0,042	0,030	0,027
350	0,030	0,030	0,029	0,028	0,041	0,028	0,026
400	0,029	0,029	0,028	0,027	0,040	0,027	0,025
450	0,028	0,028	0,027	0,026	0,038	0,026	0,024
500	0,023	0,027	0,026	0,025	0,037	0,025	0,023
550	0,026	0,026	0,025	0,024	0,035	0,025	0,022
600	0,025	0,024	0,023	0,022	0,032	0,024	0,022

Obs.: para manilhas de borracha adotar $0,02 \leq f \leq 0,03$

Exercício 8.2 - Uma estação elevatória recalca 220 ℓ/s de água através de uma canalização antiga, de aço, de 500 mm de diâmetro e 1 600 m de extensão. Estimar a economia mensal de energia elétrica que será feita, quando essa canalização for substituída por uma linha nova, de aço, com revestimento interno especial. Custo da energia elétrica \$ 0,10/kWh.

$$h_f = f \frac{Lv^2}{D2g} \quad A = 0,196 \text{ m}^2 \quad v = \frac{Q}{A} = \frac{0,220}{0,196} = 1,13 \text{ m/s}$$

Para a canalização antiga, $f = 0,037$ e, para a tubulação nova, $f = 0,019$, valor que manterá devido à existência do revestimento especial. A perda de carga nas condições iniciais (tubulação velha) é:

$$h_f = 0,037 \frac{1\,600 \times 1,13^2}{0,50 \times 19,6} = \frac{75,6}{9,8} = 7,71 \text{ m}$$

Para a tubulação nova resultará:

$$h_f = \frac{0,019}{0,037} 7,71 = 3,96 \text{ m}$$

A diferença de altura de recalque será, portanto, de 3,75 m, o que corresponde a uma potência de:

$$P = Q \times H \times \frac{0,736}{75} = 220 \times 3,75 \times \frac{0,736}{75} = 8,085 \text{ kW (teórica)}$$

Levando-se em conta o rendimento do conjunto motor-bomba, estimado em 70%,

$$P = 8,085 \frac{1}{0,70} = 11,550 \text{ W} = 11,55 \text{ kW}$$

Economia diária de 11,55 kW $\times$ \$ 0,10/kWh $\times$ 24 h/dia = \$ 27,72/dia;
Economia mensal de \$ 831,60.

8.2.3 - Outras fórmulas para tubulações e seus limites de aplicação

Cada fórmula de resistência costuma ser apresentada com a indicação dos limites para a sua aplicação fixando-se, geralmente, os diâmetros mínimo e máximo. Esses valores, algumas vezes estabelecidos pelos próprios autores das expressões, foram outras vezes fixados pelos engenheiros interessados na sua aplicação.

Tais limites, entretanto, não têm o significado absoluto que freqüentemente lhes é atribuído e sobretudo não são comparáveis. Enquanto algumas fórmulas foram estabelecidas com base em poucas dezenas de dados, outras decorreram da análise de alguns milhares de observações. Prony, por exemplo, baseou-se em 51 experiências; Weisbach, em 63; Darcy, em 200; Flamant, em 552; enquanto Hazen e Williams serviram-se de alguns milhares de dados. Entre os limites fixados para a fórmula de Darcy estariam compreendidos dados compilados por Hazen e Williams, num total muito superior a 200. Flamant baseou-se em observações feitas com tubos de até 90 cm de diâmetro; não obstante, a sua fórmula tem sido recomendada para canalizações de maior diâmetro. As investigações conduzidas por Hazen e Williams incluíram dados sobre condutos desde 25 mm de diâmetro até cerca de 4,5 m.

8.2.4 - Comparação de algumas fórmulas práticas

Seja a expressão geral para perda de carga unitária $J = k \frac{v^n}{D^p}$

Para movimento laminar, $n = 1$ e $p = 2$; para movimento francamente turbulento $n = 2$ e $p = 1$.

No Quadro 8.2, estão comparadas algumas das expressões propostas, sob esse aspecto (relação entre os expoentes de "v" e "D"):

QUADRO 8.2				
Autor**	Fórmula (aspecto geral)	Expoentes de "v"	Expoentes de "D"	Soma dos expoentes
Darcy (MUSEL)	$J = k_1 \frac{v^2}{D}$	2	1	3*
Levy-Vallot	$J = k_2 \frac{v^2}{D^{1.33}}$	2	1,33	3,33
Manning	$J = k_3 \frac{v^2}{D^{1.33}}$	2	1,33	3,33
Flamant	$J = k_4 \frac{v^{1.75}}{D^{1.25}}$	1,75	1,25	3
Biegeleisen-Bukowsky	$J = k_5 \frac{v^{1.9}}{D^{1.1}}$	1,9	1,1	3
Lawford	$J = k_6 \frac{v^{1.87}}{D^{1.127}}$	1,87	1,127	2,997
Scobey	$J = k_7 \frac{v^2}{D^{1.25}}$	2	1,25	3,25
Fair, Whipple e Hsiao	$J = k_8 \frac{v^{1.88}}{D^{1.12}}$	1,88	1,12	3
Hazen-Williams	$J = k_9 \frac{v^{1.85}}{D^{1.17}}$	1,85	1,17	3,02

(*) Na expressão de Darcy, a variação de k, com D está em torno de 7% apenas.

(**) Estão relacionadas apenas as fórmulas empíricas mais consagradas pelo uso ou por seu valor histórico.

8.2.5 - Inconvenientes das primeiras fórmulas

A fórmula de Darcy há muitos anos completou seu centenário; a de Levy é apenas 10 anos mais nova; a de Manning resultou de uma simplificação da expressão de Ganguillet-Kutter, fórmula essa que remonta a 1867.

Evidentemente, no decorrer de tantos anos a indústria dos materiais e a técnica de fabricação dos tubos evoluíram bastante. A superfície interna dos tubos apresentou-se mais homogênea e mais favorável ao escoamento. Evoluíram os processos de revestimento e ainda mais, com a produção de tubos mais longos,

reduziu-se o número de juntas.

Por outro lado, definiram-se melhor as características das águas a transportar, tornou-se mais conhecido o fenômeno da corrosão e pôde-se controlar a agressividade das águas.

Essas considerações mostram as inconveniências do emprego de muitas das fórmulas estabelecidas há muito tempo.

O emprego das primeiras fórmulas está condicionado à classificação das canalizações em uma de duas classes: tubos novos e tubos usados. Os resultados geralmente variam de 1 para 2, isto é, os coeficientes para tubos em uso são duas vezes maiores do que os para tubos novos. Resta perguntar quando um tubo deixa de ser novo e se uma tubulação de 10 anos é velha. O número limitado de observações não permitia uma classificação melhor ou uma apreciação mais precisa do fenômeno conhecido como o "envelhecimento dos tubos".

Cumprir lembrar que tais inconvenientes, que podem ser atribuídos à velha expressão de Darcy, são removidos quando se considera a nova apresentação de sua fórmula, mais conhecida como apresentação americana ou fórmula de Darcy-Weisbach.

8.2.6 — Contribuição da estatística. Uma fórmula média

O tratamento estatístico dos inúmeros dados existentes sobre o assunto — resultados das observações e experimentações realizadas pelos diversos investigadores — mostra que o expoente de v varia entre cerca de 1,7 a 2. Um valor médio pode ser assumido em torno de 1,85. As próprias experiências de Darcy levam a valores de n compreendidos entre 1,76 e 2.

Reynolds, que teve a primazia de investigar as velocidade-limite entre os regimes de escoamento laminar e turbulento, chegou à conclusão de que o expoente n assume o valor da unidade para o movimento laminar e que, para os movimentos turbulentos que ocorrem na prática, n depende da rugosidade da parede dos tubos, oscilando entre 1,73 e 2. Para os tubos muito lisos, n é cerca de 1,75 ao passo que, para grandes turbulências, em tubos fortemente "incrustados", $n = 2$.

Com base nessas considerações e no que indica a análise dimensional, conclui-se que uma fórmula "racionalizada" para a determinação da perda de carga nas tubulações seria

$$J = k \frac{v^{1+x}}{D^{2-x}}$$

onde, para o movimento 100% turbulento, o valor experimental de x seria 1 e, para as condições correntes, com movimento turbulento, oscilaria de 0,70 a 1; tomando-se, para o último caso, o valor médio de $x = 0,85$, resultaria a seguinte expressão:

$$J = k \frac{v^{1.85}}{D^{1.15}}$$

8.2.7 — Fórmula de Hazen-Williams

Depois de feitas essas considerações, é curioso notar que dois pesquisadores norte-americanos, após cuidadoso exame estatístico de dados obtidos por mais de trinta investigadores, inclusive os de Darcy e os decorrentes de pesquisas próprias,

propuseram, em 1903, uma fórmula prática que pode ser escrita

$$J = k \frac{v^{1.85}}{D^{4.87}} \quad \text{equação (3)}$$

denominada fórmula de Hazen-Williams (Allen Hazen, engenheiro civil e sanitaria, e Gardner S. Williams, professor de Hidráulica) que goza de grande aceitação, devido ao amplo uso e às confirmações experimentais.

A fórmula de Hazen-Williams, com o seu fator numérico em unidades SI, é a seguinte:

$$J = 10,643 Q^{1.85} \cdot C^{-1.85} \cdot D^{-4.87} \quad \text{equação (4)}$$

onde: Q = vazão (m^3/s);

D = diâmetro (m);

J = perda de carga unitária (m/m)

C = coeficiente adimensional que depende da natureza (material e estado) das paredes dos tubos, Quadro 8.3.

A fórmula também pode ser escrita explicitando-se a vazão ou a velocidade:

$$Q = 0,279 CD^{2.63} J^{0.54} \quad \text{equação (5)}$$

como

$$Q = AV = \frac{\pi D^2}{4} v$$

substituindo em (5) tem-se:

$$v = 0,355 CD^{0.63} J^{0.54} \quad \text{equação (6)}$$

onde

$$v = \text{velocidade (m/s)}$$

No final deste capítulo (item 8.4), estão apresentadas as Tabelas (8.14a) com o resultado dos cálculos pela fórmula de Hazen-Williams para os diâmetros comerciais e velocidades usuais e para diferentes valores do coeficiente C .

A disposição dos vários aspectos da fórmula, tal como está apresentada no Quadro 8.4, é de grande conveniência na prática.

8.2.8 — Vantagens da fórmula de Hazen-Williams

É uma fórmula que resultou de um estudo estatístico cuidadoso, no qual foram considerados os dados experimentais disponíveis, obtidos anteriormente por um grande número de pesquisadores, bem como dados de observações dos próprios autores.

A expressão de Hazen-Williams é teoricamente correta: a soma dos expoentes p e n , que é 3,02, apresenta uma diferença desprezível sobre o valor teórico.

Os expoentes da fórmula foram estabelecidos de maneira a resultarem as menores variações do coeficiente numérico C para tubos de mesmo grau de rugosidade. Em consequência, o coeficiente C é tanto quanto possível e praticável, uma função quase que exclusiva da natureza das paredes.

A grande aceitação que teve a fórmula permitiu que fossem obtidos valores bem determinados do coeficiente C . Nessas condições, pode-se estimar o envelhecimento dos tubos.

É uma fórmula que pode ser satisfatoriamente aplicada para qualquer tipo de

conduto e de material*. Os seus limites de aplicação são os mais largos: diâmetro de 50 a 3 500 mm e velocidades até 3 m/s, ou seja, praticamente todos os casos do dia a dia aí se enquadram.

QUADRO 8.3 — Valor do coeficiente C sugerido para a fórmula de Hazen-Williams

Tubos	Novos	Usados ± 10 anos	Usados ± 20 anos
Aço corrugado (chapa ondulada)	60	—	—
Aço galvanizado rosado	125	100	—
Aço rebitado, novos	110	90	80
Aço soldado, comum (revestimento betuminoso)	125	110	90
Aço soldado com revestimento epóxico	140	130	115
Chumbo	130	120	120
Cimento-amianto	140	130	120
Cobre	140	135	130
Concreto, bom acabamento	130	—	—
Concreto, acabamento comum	130	120	110
Ferro fundido, revestimento epóxico	140	130	120
Ferro fundido, revestimento de argamassa de cimento	130	120	105
Grês cerâmico, vidrado (manilhas)	110	110	110
Latão	130	130	130
Madeira, em aduelas	120	120	110
Tijolos, condutos bem executados	100	95	90
Vidro	140	—	—
Plástico (PVC)	140	135	130

Obs.: o engenheiro projetista ao adotar um coeficiente C deve se precaver contra valores acima daqueles aqui indicados, mesmo que indicados nos catálogos dos fabricantes de tubulações. Ocorre que os valores indicados nos catálogos são normalmente obtidos em condições de laboratório e na prática influenciam também outros fatores, tais como o efeito das juntas, falta de alinhamento na montagem, irregularidades ou recalques no terreno, qualidade da água, etc.

QUADRO 8.4 — Fórmula de Hazen-Williams no sistema SI

Para C = 100	Relações para valores quaisquer de C
$v = 35,5 D^{0,63} J^{0,54}$	$\frac{J_c}{J_{C=100}} = \left(\frac{100}{C} \right)^{1,852}$
$Q = 27,88 D^{2,63} J^{0,54}$	$\frac{D_c}{D_{C=100}} = \left(\frac{C}{100} \right)^{0,38}$
$J = 0,00135 \frac{v^{1,852}}{D^{4,87}}$	$\frac{v_c}{v_{C=100}} = \frac{C}{100}$
$J = 0,0021 \frac{Q^{1,852}}{D^{4,87}}$	$\frac{Q_c}{Q_{C=100}} = \frac{C}{100}$

(*) A fórmula de Hazen-Williams pode ser aplicada a condutos livres ou condutos forçados; tem sido empregada para canalizações de águas e esgotos. Seus autores basearam-se em experiências com os seguintes materiais (tubos): aço, cimento, chumbo, estanho, ferro forjado ("wroughtiron"), ferro fundido, latão, madeira, tijolos e vidro.

8.2.9 — O envelhecimento das tubulações de ferro fundido e aço

Ensaio e verificações feitos em linhas de aço e de ferro fundido, muito bem executadas e em que foram empregados tubos de boa qualidade, sem revestimento interno, mostraram que, para o início de funcionamento, o coeficiente C assume valores nas vizinhanças de 140. Pouco depois, entretanto, esse valor cai para 130 e com o decorrer do tempo passa a valores cada vez mais baixos. A tendência de o ferro entrar em solução e a presença de oxigênio dissolvido na água — fatores primordiais da corrosão — são responsáveis pela formação de tubérculos na superfície interna dos tubos. Da redução da seção e do aumento da rugosidade resultam a diminuição da capacidade de transporte da canalização e o decréscimo de C.

Tal fenômeno da tuberculização, que se caracteriza por formações esponjosas duras que crescem como se fossem corais e que, uma vez bem secas se "esfarelam" com relativa facilidade, é algumas vezes erroneamente designado por incrustação.

O termo incrustação deve ser reservado ao fenômeno da constituição de camadas ou crostas devidas a certas substâncias presentes em quantidades excessivas na água, que vão se depositando ou aderindo às paredes dos tubos, especialmente os tubos metálicos, diminuindo o diâmetro interno do tubo. O caso típico de incrustação ocorre quando a água transportada pelo tubo apresenta elevados teores de cálcio, por exemplo, águas de terrenos calcários, bastante frequentes.

Entre os vários fatores (*) que afetam a corrosão, o pH tem uma grande influência, conforme se pode constatar no Quadro 8.5.

QUADRO 8.5 — Perda de capacidade de tubulações de ferro fundido não revestido internamente ao fim de 30 anos (C inicial: 135 ou 100%)

pH da água	Valor de C	Porcentagem da capacidade inicial
6,0	20	15
6,5	52	40
7,5	85	65
7,0	72	55
8,0	91	70

(*) Alguns dos fatores que afetam a corrosão: potencial de oxidação do material (entropia), sobretensão, oxigênio dissolvido, CO₂, alcalinidade, presença de substâncias inibidoras ou capazes de formar películas, homogeneidade da superfície dos tubos, velocidade da água, temperatura, existência de resíduos de sulfato de alumínio, cloro, etc.

8.2.10 — Escolha criteriosa do coeficiente C

A fórmula de Hazen-Williams, sendo das mais perfeitas, requer, para a sua aplicação criteriosa, maior cuidado na adoção do coeficiente C. A escolha negligente desse coeficiente ou a fixação de um valor médio invariável reduz de muito a precisão que se pode esperar de tal fórmula.

Para tubos de ferro ou de aço, o coeficiente C é uma função do tempo, de modo que o seu valor deve prever a vida útil que se espera na canalização.

Para avaliações expeditas, pode-se usar, para tubos metálicos, C = 100. Tal valor corresponde, aproximadamente, à situação da tubulação em quinze a vinte anos,

portanto dentro da vida útil esperada, quando ainda deverá estar funcionando para as vazões de cálculo. Tal desempenho pode ser melhorado se periodicamente for feita uma "limpeza" na tubulação. Tal limpeza periódica é muito pouco usual na América Latina, até porque os projetos não a prevêem e depois passa a ser muito difícil fazê-la, pois não são instalados os acessórios necessários para facilitar a operação, especialmente a colocação e retirada do "pig" de limpeza. Menos usual ainda é a recomposição do revestimento interno. Também pouco se faz em termos de controle de qualidade eficaz para a corrosividade da água.

A Tabela 8.4, obtida das investigações de Hazen e Williams, é de grande utilidade nas aplicações práticas, especialmente quando se calculam canalizações de certa importância. Nas observações que serviram de base predominaram águas "moles", em sua maioria não tratadas quimicamente. Os valores apresentados resultam das condições mais comuns. Para águas "in natura", muito agressivas, ou para águas tratadas e não bem controladas, o envelhecimento dos tubos poderá ser mais rápido. Para águas muito bem controladas, o decréscimo de C é mais lento.

Na Fig. 8.1 estão comparados os dados disponíveis de diversos investigadores, relativos ao envelhecimento de tubulações de ferro fundido. Pode-se notar que as condições adotadas por Hazen e Williams, bem próximas das investigações de Carter, são bastante razoáveis, não constituindo condições extremas, mas, bem ao contrário, dados médios.

Na Figura 8.2 estão representados os valores indicados na Tab. 8.4. O aumento de rugosidade, a redução de diâmetro e as dimensões relativas dos tubérculos maiores para os tubos de menor diâmetro, causam, para estes, um envelhecimento mais rápido.

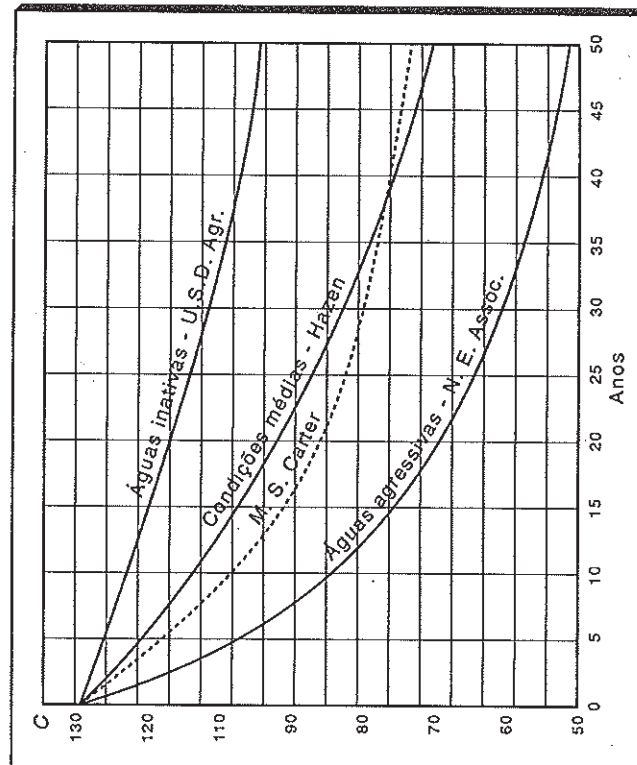


Figura 8.1

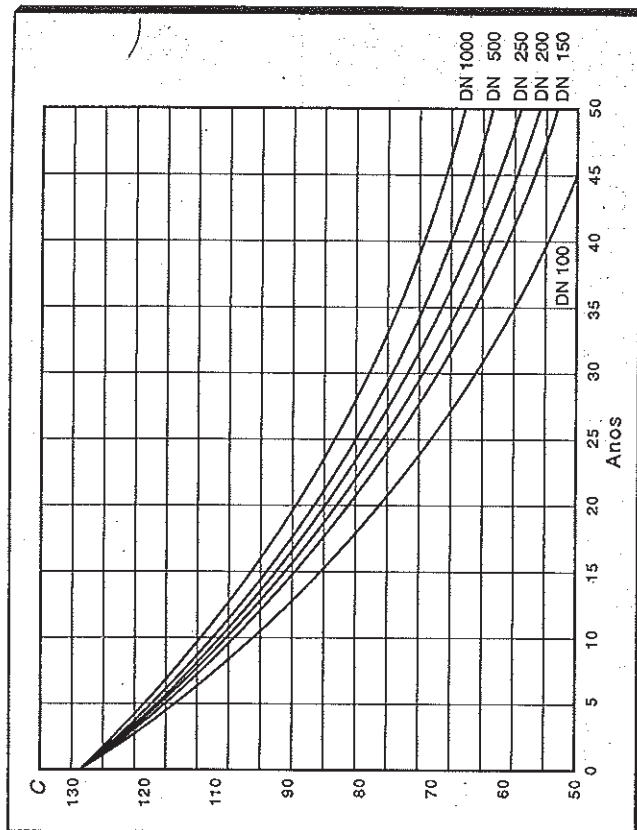


Figura 8.2

Tabela 8.4 — Valores do coeficiente C segundo os dados analisados por Hazen-Williams. Tubos de ferro fundido sem revestimento interno (*)

Diâmetro (mm)	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600	750	900	1050	1500
Anos														
(**)	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
0	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130
5	117	118	119	120	120	120	120	120	120	120	121	122	122	122
10	106	108	109	110	110	111	112	112	112	112	113	113	113	113
15	96	100	102	103	103	104	104	105	105	105	106	106	106	106
20	88	93	94	96	97	97	98	98	99	99	100	100	100	100
25	81	86	89	91	91	91	92	92	93	93	94	94	94	95
30	75	80	83	85	86	86	87	87	88	89	90	90	90	91
35	70	75	78	80	82	82	83	84	85	85	86	86	87	88
40	64	71	74	76	78	78	79	80	81	81	82	83	83	84
45	60	67	71	73	75	76	76	77	77	78	79	80	81	81
50	56	63	67	70	71	72	73	73	74	75	76	76	77	78

(*) Valores do coeficientes C para tubulações de aço:

- a) Com juntas "lock-bar", adotar os mesmos coeficientes indicados para os tubos de ferro fundido;
b) Soldadas, tomar como valores de C os valores indicados para tubos de ferro fundido 5 anos mais velhos;
c) Rebitados, tomar como valores de C os valores indicados para tubos de ferro fundido 10 anos mais velhos;
d) Com revestimentos especiais, admitir 130.
(**) O valor 140 correspondente ao início de funcionamento de linhas muito bem executadas, com tubos de boa qualidade.

Portanto, note-se que para uma mesma rugosidade de parede interna do tubo, na fórmula de Hazen-Williams, um tubo de maior diâmetro deverá ter um coeficiente C ligeiramente maior que o de um tubo de diâmetro menor. Isso significa que ao estudar alternativas de diâmetros diferentes usando Hazen-Williams, para ser rigoroso o engenheiro deve atribuir a tubos de diâmetros diferentes, diferentes valores de C , valendo-se para isso de sua experiência, da Fig. 8.2 e da Tab. 8.4.

Tabela 8.5 — Correspondência aproximada entre os valores de f (fórmula Universal) e o coeficiente C da expressão de Hazen-Williams. Para $C = 100$ (valores de f)

D (mm)	$v = 0,50$ (m/s)	$v = 1,00$ (m/s)	$v = 1,50$ (m/s)
50	0,049	0,044	0,042
100	0,043	0,039	0,037
150	0,040	0,036	0,034
200	0,038	0,034	0,032
300	0,036	0,032	0,030
400	0,034	0,031	0,029
500	0,033	0,030	0,028
600	0,032	0,029	0,027

Tabela 8.6 — Correspondência aproximada entre os coeficientes C de Hazen-Williams e n de Manning, K de Strickler e γ de Bazin

C	40	60	80	90	100	110	120	130	140
n	0,031	0,021	0,016	0,014	0,013	0,012	0,011	0,010	0,009
K	35	50	60	70	75	85	90	100	110
γ	1,75	1,30	0,45	0,23	0,20	0,17	0,12	0,06	0,04

Tabela 8.7 - Fatores de correspondência K para os diferentes valores de C na fórmula de Hazen-Williams(*)

C	K	C	K	C	K	C	K	C	K	C	K	C	K
40	5,457	55	3,026	70	1,936	85	1,351	100	1,000	115	0,772	130	0,615
41	5,213	56	2,927	71	1,886	86	1,322	101	0,982	116	0,760	131	0,606
42	4,986	57	2,832	72	1,837	87	1,294	102	0,964	117	0,748	132	0,598
43	4,773	58	2,742	73	1,791	88	1,267	103	0,947	118	0,736	133	0,590
44	4,574	59	2,657	74	1,747	89	1,241	104	0,930	119	0,725	134	0,582
45	4,388	60	2,576	75	1,704	90	1,215	105	0,914	120	0,713	135	0,574
46	4,213	61	2,498	76	1,662	91	1,191	106	0,898	121	0,703	136	0,566
47	4,048	62	2,424	77	1,623	92	1,167	107	0,882	122	0,692	137	0,558
48	3,894	63	2,353	78	1,584	93	1,144	108	0,867	123	0,682	138	0,551
49	3,748	64	2,285	79	1,547	94	1,121	109	0,852	124	0,671	139	0,543
50	3,610	65	2,221	80	1,512	95	1,100	110	0,838	125	0,661	140	0,536
51	3,480	66	2,159	81	1,477	96	1,079	111	0,824	126	0,652	141	0,529
52	3,357	67	2,099	82	1,444	97	1,058	112	0,811	127	0,642	142	0,522
53	3,241	68	2,043	83	1,412	98	1,038	113	0,797	128	0,633	143	0,516
54	3,130	69	1,988	84	1,381	99	1,019	114	0,785	129	0,624	144	0,509

(*) Os valores acima são aplicados para a correção de resultados de perda de carga f , a partir de $C = 100$ para valores de C diferentes de 100, conforme explicado a seguir.

A Tab. 8.7 apresenta um coeficiente prático K para o cálculo de uma nova perda de carga quando já é conhecida a perda de carga para $C = 100$:

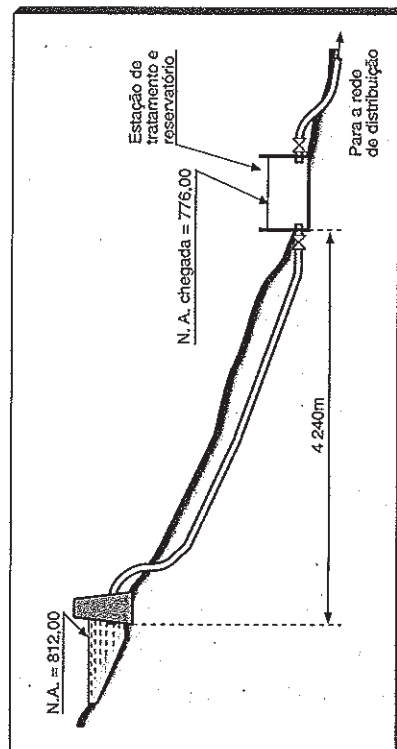
$$J C_{99} = K J C_{100}$$

Exemplo: Uma linha de recalque com 500 mm de diâmetro funcionando com 220 l/s de vazão e $C = 100$, tem uma perda de carga de 3,50 m/km. Se com uma limpeza interna da tubulação o C chegar a 130, a perda de carga vai se reduzir como segue:

$$J C_{130} = K J C_{100} = 0,615 \times 3,50 = 2,15 \text{ m/km}$$

Exercício 8.3 — Numa cidade do interior, o número de casas atinge a 1 340 e, segundo a agência de estatística regional, a ocupação média dos domicílios gira em torno de 5 pessoas por habitação. A cidade já conta com um serviço de abastecimento de água, localizando-se o manancial na encosta de uma serra, em nível mais elevado do que o reservatório de distribuição de água na cidade. O diâmetro da linha adutora existente é de 150 mm, sendo os tubos de ferro fundido com bastante uso. O nível de água no ponto de captação flutua em torno de cota 812,0 msnm (metros sobre o nível médio do mar); o nível de água médio no reservatório de distribuição é 776,00 msnm; o comprimento da linha adutora é 4 240 m.

Verificar se o volume de água aduzido diariamente pode ser considerado satisfatório para o abastecimento atual da cidade, admitindo-se o consumo individual médio como sendo de 200 litros por habitante por dia, aí incluídos todos os usos da cidade, mesmo aqueles não domésticos, e que nos dias de maior calor a demanda é cerca de 25% maior que a média.



Solução:

Cálculo do consumo no dia de maior demanda:

$$1\,340 \text{ domicílios} \times \frac{5 \text{ habitantes}}{\text{domicílio}} \times \frac{200 \ell}{\text{hab.} \times \text{dia}} \times 1,25 = 1\,675\,000 \cdot \ell/\text{dia} = 1\,675 \text{ m}^3/\text{dia}$$

a vazão, dita instantânea, ou seja, na unidade de tempo de segundo é:

$$\frac{1.675.000 \cdot \ell / \text{dia}}{86.400 \text{ segundos/dia}} = 19,4 \cdot \ell / \text{s} = 0,0194 \text{ m}^3/\text{s}$$

Usando os dados da adutora existente, calcula-se a carga total disponível;

$$812 \text{ m} - 776 \text{ m} = 36 \text{ m}$$

e a perda de carga unitária máxima possível:

$$J = \frac{H}{L} = \frac{36 \text{ m}}{4.240 \text{ m}} = 0,0085 \cdot \text{m/m}$$

e a velocidade necessária para fazer passar essa vazão pela seção do tubo seria:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0,0194 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \times D^2 / 4} = \frac{0,0194 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \times 0,150^2 / 4} = 1,0978 \text{ m/s}$$

Aplicando a fórmula de Williams-Hazen:

Como o tubo é considerado velho, adote-se $C = 100$

Conhecidos D e J , são incógnitas v e Q porque só se conhecem as velocidades e vazões necessárias, mas não se sabe se a configuração implantada permite passar essa vazão.

Escolhendo primeiro a fórmula de WH explicitada para Q :

$$Q = 0,279 \text{ CD}^{2,63} J^{0,54}, \text{ logo}$$

$$Q = 0,279 \times 100 \times 0,150^{2,63} \times 0,0085^{0,54} = 0,014475 \text{ m}^3/\text{s} = 14,47 \cdot \ell / \text{s},$$

vazão insuficiente para as necessidades de $19,4 \ell / \text{s}$ (cerca de 30% abaixo).

Entretanto, pela quantidade de parâmetros "avaliados" e pela facilidade de medir a vazão em uma configuração como essa (basta fechar a saída do reservatório vazio e medir o tempo para encher determinado volume), deve-se proceder a uma avaliação de bom senso sobre o quê e quando fazer.

Se fosse escolhida a fórmula explicitada para v :

$$v = 0,355 \text{ CD}^{0,63} J^{0,54}, \text{ logo}$$

$v = 0,355 \times 100 \times 0,150^{0,63} \times 0,0085^{0,54} = 0,81856 \text{ m/s}$, velocidade insuficiente, porque menor que a necessária ($< 1,0978 \text{ m/s}$). Uma das soluções para aumentar a vazão seria a limpeza da tubulação, aumentando o valor de C .

Exercício 8.4 - Para a adução de água da Represa do Guarapiranga para a Estação de Tratamento do Alto de Boa Vista, em São Paulo, foram construídas várias linhas paralelas, com tubos de ferro fundido com 1 m de diâmetro nominal e 5 900 m de comprimento em cada linha. Cada linha deve conduzir 1 000 ℓ / s sob bombeamento. As cotas dos níveis de água na tomada e na chegada da ETA são aproximadamente iguais.

Estimar as perdas de carga para as seguintes épocas: inicial, após 10, após 20 e após 30 anos de funcionamento, admitindo que não haverá limpeza da tubulação.

Solução:

O problema é resolvido para uma linha, já que são todas iguais. São

conhecidos os diâmetros e as vazões (logo a velocidade também). É incógnita a perda de carga, que será função do coeficiente de rugosidade. Pela Tab. 8.4 resultam os coeficientes C ao longo dos anos, relacionados no quadro a seguir. Pela fórmula explicitada para J : $J = 10,643 Q^{1,85} C^{-1,85} D^{-4,87}$;

para $C = 130$, vem que: $J = 10,643 \times 1,01^{1,85} \times 130^{-1,85} \times 1,0^{-4,87} = 0,0013069 \text{ m/m}$

o que resulta em uma perda de carga total de $5.900 \times 0,0013069 = 7,71 \text{ m}$;

para $C = 100$ $J = 10,643 \times 1,01^{1,85} \times 100^{-1,85} \times 1,0^{-4,87} = 0,0021236 \text{ m/m}$

e uma perda de carga total de $5.900 \text{ m} \times 0,0021236 \text{ m/m} = 12,53 \text{ m}$;

e assim por diante. A tabela a seguir mostra os resultados, e portanto a variação de altura manométrica que as bombas deverão vencer para que vazão não se altere ao longo desse período:

Idade	Valor de C	h_f (m)
Inicial	130	7,71
10 anos	113	9,99
20 anos	100	12,53
30 anos	90	15,22

O uso da Tab. 8.7 leva aos mesmos resultados, a partir de $C = 100$.

8.2.11 —Fórmulas empíricas para encanamentos de pequeno diâmetro

A fórmula de Hazen-Williams tem sido preconizada para tubulações de 50 mm de diâmetro, ou maiores.

Para canos de pequeno diâmetro (1/2 a 2 polegadas) Fair-Whipple-Hsiao (1930), após um grande número de experiências, conduzidas segundo a técnica mais avançada e sob um controle perfeito, propuseram fórmulas especiais do tipo da fórmula de Hazen-Williams, que têm sido aceitas e recomendadas como as mais satisfatórias.

Foram experimentados tubos de cobre, latão, metal *admiralty*, aço galvanizado, ferro galvanizado, aço e ferro nu, tanto para água fria como para água quente.

As investigações de Fair-Whipple-Hsiao tiveram grande oportunidade, bem como reconhecida utilidade, de levar a fórmulas seguras para o dimensionamento das pequenas canalizações, incluindo as que conduzem água quente.

O saudoso engenheiro Eduardo Eurico de Oliveira, no estudo que fez de um projeto de regulamento para as instalações domiciliares de abastecimento de água do Rio de Janeiro, já havia recomendado a fórmula de Fair-Whipple-Hsiao, tendo qualificado os trabalhos experimentais dos seus autores como a "melhor orientação prática".

Para encanamentos de aço galvanizado e água fria, a fórmula é a seguinte:

$$J = 0,002021 \frac{Q^{1,88}}{D^{4,88}} \text{ ou } Q = 27,113 \times J^{0,532} \times D^{2,596}$$

Para tubos de cobre ou latão e água fria, as fórmulas de Fair-Whipple-Hsiao

são:

$$J = 0,000874 \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}},$$

ou

$$Q = 55,934 D^{2,714} J^{0,571}$$

e para água quente $Q = 63,281 D^{2,714} J^{0,571}$ ou $J = 0,000704 \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}}$

com Q (m³/s), D (m) e J (m/m).

A norma brasileira para instalações prediais recomenda as fórmulas de Fair-Whipple-Hsiao nas seguintes formas:

Para tubos hidraulicamente rugosos (aço carbono galvanizado ou não):

$$J = 19,8 \cdot 10^6 \cdot Q^{1,88} \cdot D^{-4,88}$$

Para tubos hidraulicamente lisos (plástico, cobre ou ligas de cobre):

$$J = 8,63 \cdot 10^6 \cdot Q^{1,75} \cdot D^{-4,75}$$

sendo J em kPa/m, Q em ℓ /s e D em mm.

Outra fórmula que também é usada para tubulações de pequeno diâmetro é a de Flamant (1892):

$$\frac{DJ}{4} = b \sqrt{\frac{v}{D}}$$

ou $J = 4b \cdot v^{1,75} \cdot D^{-1,25}$ com v (m/s), D (m) e J (m/m)

sendo:

$b = 0,00023$ para canos de ferro ou de aço usados

$b = 0,000185$ para canos de ferro e aço novos

$b = 0,000140$ para canos de chumbo

$b = 0,000130$ para canos de cobre

$b = 0,000120$ para canos de plástico (PVC, etc.)

A Tab. 8.8 é para $b = 0,00023$. Para outros materiais basta multiplicar J por ($b/0,00023$).

Tabela 8.8 — Fórmula de Flamant (1892)									
Tubos de pequenos diâmetros - ferro e aço galvanizado									
Q (l/s)	19 mm (3/4")		25 mm (1")		32 mm (1 1/4")		38 mm (1 1/2")		J (m/m)
	v (m/s)	J (m/m)	v (m/s)	J (m/m)	v (m/s)	J (m/m)	v (m/s)	J (m/m)	
0,02	0,071	0,0012	0,041	0,0003	0,025	0,0001	0,018	0,00005	
0,04	0,141	0,0041	0,081	0,0011	0,050	0,0003	0,035	0,00015	
0,06	0,212	0,0084	0,122	0,0023	0,075	0,0007	0,053	0,00031	
0,08	0,282	0,0139	0,163	0,0038	0,099	0,0012	0,071	0,00052	
0,10	0,353	0,0206	0,204	0,0056	0,124	0,0017	0,088	0,00077	
0,12	0,423	0,0283	0,244	0,0077	0,149	0,0024	0,106	0,00105	
0,14	0,494	0,0371	0,285	0,0101	0,174	0,0031	0,123	0,00138	
0,16	0,564	0,0469	0,326	0,0127	0,199	0,0039	0,141	0,00174	
0,18	0,635	0,0576	0,367	0,0156	0,224	0,0048	0,159	0,00214	

Q (l/s)	19 mm (3/4")		25 mm (1")		32 mm (1 1/4")		38 mm (1 1/2")	
	v (m/s)	J (m/m)	v (m/s)	J (m/m)	v (m/s)	J (m/m)	v (m/s)	J (m/m)
0,20	0,705	0,0693	0,407	0,0188	0,249	0,0058	0,176	0,00257
0,22	0,776	0,0818	0,448	0,0222	0,274	0,0069	0,194	0,00304
0,24	0,846	0,0953	0,489	0,0259	0,298	0,0080	0,212	0,00354
0,26	0,917	0,1096	0,530	0,0298	0,323	0,0092	0,229	0,00407
0,28	0,988	0,1248	0,570	0,0339	0,348	0,0105	0,247	0,00464
0,30	1,058	0,1408	0,611	0,0382	0,373	0,0118	0,265	0,00523
0,32	1,129	0,1577	0,652	0,0428	0,398	0,0133	0,282	0,00586
0,34	1,199	0,1753	0,693	0,0476	0,423	0,0147	0,300	0,00652
0,36	1,270	0,1938	0,733	0,0526	0,448	0,0163	0,317	0,00720
0,38	1,340	0,2130	0,774	0,0578	0,472	0,0179	0,335	0,00792
0,40	1,411	0,2330	0,815	0,0633	0,497	0,0196	0,353	0,00866
0,42	1,481	0,2538	0,856	0,0689	0,522	0,0213	0,370	0,00943
0,44	1,552	0,2753	0,896	0,0748	0,547	0,0231	0,388	0,01023
0,46	1,622	0,2976	0,937	0,0808	0,572	0,0250	0,406	0,01106
0,48	1,693	0,3206	0,978	0,0871	0,597	0,0269	0,423	0,01191
0,50	1,763*	0,3443	1,019	0,0935	0,622	0,0289	0,441	0,01280
0,55	1,940	0,4068	1,120	0,1105	0,684	0,0342	0,485	0,01512
0,60	2,116	0,4737	1,222	0,1286	0,746	0,0398	0,526	0,01760
0,65	2,293	0,5449	1,324	0,1480	0,808	0,0458	0,573	0,02025
0,70	2,469	0,6204	1,426	0,1685	0,870	0,0522	0,617	0,02306
0,75	2,645	0,7000	1,528	0,1901	0,933	0,0588	0,661	0,02601
0,80	2,822	0,7837	1,630	0,2128	0,995	0,0659	0,705	0,02913
0,85	2,998	0,8714	1,732	0,2366	1,057	0,0733	0,749	0,03239
0,90	3,174	0,9631	1,833	0,2615	1,119	0,0810	0,794	0,03579
0,95			1,935	0,2875	1,181	0,0890	0,838	0,03934
1,00			2,037*	0,3145	1,243	0,0974	0,882	0,04304
1,10			2,241	0,3716	1,368	0,1150	0,970	0,05085
1,20			2,445	0,4327	1,492	0,1339	1,058	0,05921
1,30			2,648	0,4978	1,616	0,1541	1,146	0,06812
1,40			2,852	0,5667	1,741	0,1754	1,234	0,07755
1,50			3,956	0,6394	1,865	0,1979	1,323	0,08750
1,60					1,989	0,2216	1,411	0,09797
1,70					2,114	0,2464	1,499	0,10893
1,80					2,238	0,2723	1,587	0,12039
1,90					2,362	0,2994	1,675	0,13234
2,00					2,487*	0,3275	1,763	0,14477
2,10					2,611	0,3567	1,852	0,15767
2,20					2,735	0,3869	1,940	0,17104
2,30					2,860	0,4182	2,028	0,18488
2,40					2,984	0,4505	2,116	0,19917
2,50					3,108	0,4839	2,204	0,21392
2,60							2,293	0,22912
2,70							2,381	0,24476
2,80							2,469	0,26085
2,90							2,557	0,27737
3,00							2,645*	0,29432
3,10							2,733	0,31171
3,20							2,822	0,32951
3,30							2,910	0,34774
3,40							2,998	0,36639
3,50							3,086	0,38546

* Limite: $v_{\max} < 14 \sqrt{D}$ (D - m)

8.3 – O MÉTODO CIENTÍFICO. A “FÓRMULA UNIVERSAL”

As abordagens científicas referentes às relações físicas que regem o escoamento em tubulações datam de meados do século XVIII, com Chezy e depois no século XIX com Darcy e Weisbach, conforme abordado no item 7.7, resultando na fórmula

$$h_f = f \frac{L \cdot v^2}{D \cdot 2g} \quad \text{equação (7)}$$

8.3.1 – Considerações sobre a fórmula

Convém observar que na fórmula [eq. 7], o coeficiente de atrito f não tem dimensões, sendo função do número de Reynolds. Como L/D é uma relação entre duas quantidades de dimensões lineares, ela também constitui um número adimensional.

Portanto essa equação exprime o fato de a perda de carga em determinado encanamento ser igual ao produto de um número puro pela carga de velocidade ($v^2/2g$).

A fórmula de Darcy-Weisbach é aplicável aos problemas de escoamento de qualquer líquido (água, óleos, gasolina, etc.) em encanamentos. Com restrições, ela se aplica também às questões que envolvem o movimento de fluidos aeriformes, como se verá adiante.

A fórmula [eq. 7] também pode ser apresentada em função da vazão Q (m^3/s), fazendo-se a substituição de

$$v^2 = \frac{Q^2}{A^2} = \frac{Q^2}{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)^2} \quad \therefore \quad h_f = f \frac{LQ^2}{\left(\frac{2g\pi^2}{16}\right) D^5} \quad \therefore$$

$$h_f = 0,0827 \frac{f L Q^2}{D^5} \quad \text{equação (8)}$$

A perda de pressão em kgf/m^2 (encanamento horizontal) seria:

$$p_1 - p_2 = 0,0827 \frac{f L Q^2}{D^5} \quad \text{equação (9)}$$

sendo: p_1 = pressão inicial, em kgf/m^2

p_2 = pressão final, em kgf/m^2

γ = peso específico do fluido, em kgf/m^3

8.3.2 O coeficiente de atrito f

O coeficiente de atrito f , sem dimensões, é função do número de Reynolds e da rugosidade relativa. A espessura ou altura e das asperezas (rugosidade) dos tubos pode ser avaliada determinando-se valores para e/D .

Nos problemas de escoamento de fluidos em canalizações, considera-se como valor de e a rugosidade equivalente, isto é, a rugosidade correspondente ao mesmo valor de f que se teria para asperezas constituídas por grãos de areia, tais como os experimentados por Nikuradse, com valores elevados do número de Reynolds (ver 8.3.6).

O número de Reynolds qualifica o regime de escoamento em laminar, turbulento ou numa forma de transição.

Para os encanamentos, o escoamento em regime laminar ocorre e é estável para valores do número de Reynolds inferiores a 2 000. Com valores superiores a 4 000, o escoamento se aproxima do regime turbulento (ver item 7.2).

Entre esses dois valores, encontra-se a denominada zona crítica.

O regime completamente turbulento só é atingido com valores ainda mais elevados do número de Reynolds, existindo, portanto, uma segunda zona intermediária, conhecida como zona de transição (Fig. 8.3).

Os valores do coeficiente de atrito (f) são obtidos em função do número de Reynolds e da rugosidade relativa, tendo-se em vista o regime de escoamento.

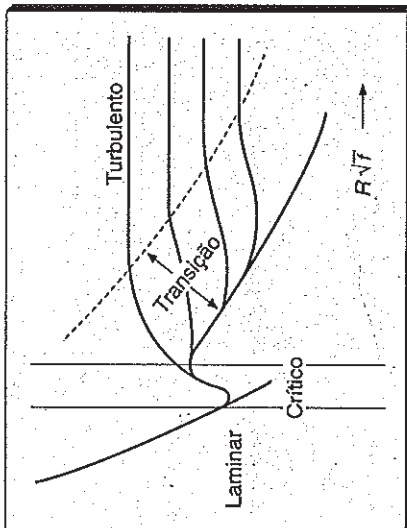


Figura 8.3

8.3.3 – Natureza da perda de carga

O fato de algumas vezes designar-se a perda de carga por perda por atrito, ou, ainda, por resistência oferecida pelo encanamento ao escoamento, tem levado a interpretações não muito corretas. A perda de carga não deve ser suposta ou imaginada como sendo uma espécie de atrito semelhante ao que se verifica quando dois sólidos em contato se deslocam um sobre o outro.

Ao contrário, não há movimento ou deslocamento do fluido em contato com as paredes dos tubos, mesmo porque, junto a essas paredes, estabelece-se uma camada aderente estacionária.

No regime de escoamento laminar, o que se verifica é tão somente uma deformação contínua da massa fluída, sendo a viscosidade ou atrito interno do fluido responsável pela perda de carga.

No caso do escoamento turbulento, o movimento é agitado, complexo e de difícil descrição. As partículas no seu movimento irregular ocupam as mais variadas posições numa seção do tubo; verifica-se, continuamente, a mistura de toda a massa fluída. A resistência ao escoamento turbulento é devida ao efeito combinado das forças relativas à inércia e à viscosidade do fluido.

8.3.4 Camada limite, zona de turbulência e filme laminar

Quando um fluido escoar sobre uma superfície, observa-se a existência de uma camada de fluido contígua a essa superfície, onde se verifica a variação de velocidade do fluido para a superfície. Essa camada foi concebida por Ludwig

Prandtl (1904) e notada pela primeira vez por Hele-Shaw, tendo sido designada por *camada limite*.

A Fig. 8.4 mostra o escoamento de um fluido ao longo de uma chapa. A partir da aresta inicial da chapa, constitui-se uma camada de escoamento laminar (camada limite) que vai aumentando em espessura até um ponto crítico. À medida que aumenta a espessura da camada limite, decresce a sua estabilidade, até um ponto T , de transição, onde se rompe o seu equilíbrio.

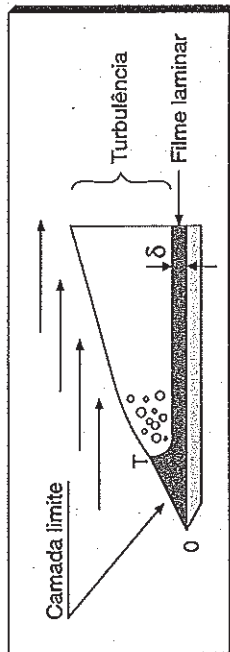


Figura 8.4

A partir desse ponto crítico, a espessura da camada laminar se reduz a um valor δ , que se mantém aproximadamente constante (subcamada laminar ou filme laminar). No ponto T , tem início uma camada turbulenta, cuja espessura vai aumentando rapidamente.

A espessura da camada limite pode ser definida como sendo a dimensão correspondente a 99% do seu limite assintótico. É nessa camada que se verifica a maior parte da deformação viscosa.

No caso dos encanamentos, também prevalecem condições análogas à descrita. Se o escoamento na tubulação for laminar, o fluido percorrerá uma distância relativamente grande, até que o perfil normal das velocidades seja atingido, isto porque é necessário que a camada limite (mostrada na Fig. 8.4, de O a T) continue a se expandir até atingir as vizinhanças do eixo do tubo.

Tratando-se de escoamento turbulento, o ponto crítico T ocorre a uma pequena distância da entrada; a partir desse ponto, a espessura da camada turbulenta

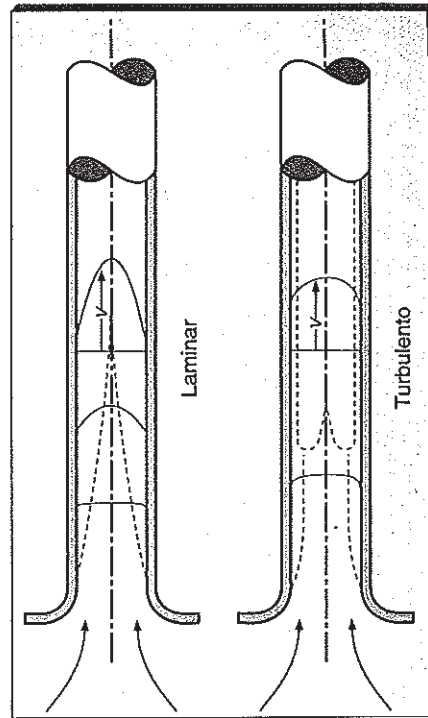


Figura 8.5

aumenta tão rapidamente que o perfil normal de velocidade é obtido a uma distância relativamente curta (Fig. 8.5).

Nota-se portanto que, no escoamento de fluidos em canalizações, existe sempre uma camada laminar, mesmo no caso de regimes turbulentos. A espessura dessa camada depende do número de Reynolds, sendo mais fina para os valores mais elevados de Re .

A camada laminar é de grande importância nas questões relativas à rugosidade dos tubos, assim como nos problemas referentes ao escoamento de calor.

8.3.5 - Tubos lisos e tubos rugosos

Na realidade, não existe uma superfície perfeitamente lisa; qualquer superfície examinada sob um bom microscópio mostra uma certa rugosidade. Entretanto, diz-se que uma superfície é *aerodinamicamente lisa*, quando as asperezas que caracterizam a sua rugosidade não se projetam além da camada laminar (Fig. 8.6)

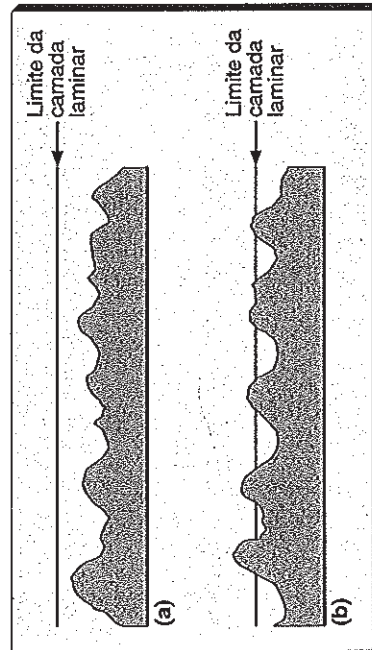


Figura 8.6

Quando as superfícies são de tal forma rugosas que apresentam protuberâncias que ultrapassem o filme laminar e se projetam na zona turbulenta, elas provocam o aumento desta, resultando daí uma perda mais elevada para o escoamento.

Se as rugosidades forem muito menores que a espessura da camada, não afetarão a resistência ao escoamento; todas as superfícies que apresentarem essas condições poderão ser consideradas igualmente lisas. É por isso que, na prática, tubos feitos com certos materiais, tais como vidro, chumbo e latão, podem apresentar as mesmas perdas de carga, perdas essas idênticas às que seriam obtidas no caso de superfícies lisas ideais. Conclui-se, também, que não há interesse em se fazer com que as superfícies internas dos tubos sejam mais lisas do que um certo limite.

Define-se como *rugosidade absoluta* e a medida das saliências da parede do tubo, ou seja, se houver protuberâncias de 1 mm, essa é a rugosidade absoluta. A *rugosidade relativa* é a divisão da rugosidade absoluta pelo diâmetro do tubo: e/D . O problema prático que surge da aplicação desses conceitos é que a rugosidade absoluta nunca é única, sendo as saliências dos tubos de diversos tamanhos e distribuições, e esse número acaba sendo obtido por uma conta de trás para frente, onde se chega a um valor médio para a rugosidade absoluta, o que acaba tendo precisão científica só para as condições de medição.

8.3.6 – Experiências de Nikuradse

Em 1933, J. Nikuradse divulgou, na Alemanha, os resultados de uma série de investigações que marcaram um passo decisivo na moderna mecânica dos fluidos.

Utilizando tubos de três tamanhos diferentes, Nikuradse produziu nos mesmos uma rugosidade artificial, cimentando, na superfície interna, grãos de areia de tamanho conhecido e, obtendo a mesma rugosidade relativa para os três tubos. Pôde, então, verificar que, para um determinado valor do número de Reynolds (R_e), o coeficiente de resistência (f) era idêntico para as três tubulações. As experiências foram repetidas para cinco valores da rugosidade relativa. Elas vieram provar que é válido o conceito de rugosidade relativa e que é correta a expressão

$$f = \varphi \left(R_e \cdot \frac{e}{D} \right)$$

para o tipo de rugosidade ensaiado.

Experiências mais recentes conduzidas pelo Instituto Tecnológico de Illinois, com tubos de rugosidade artificial (rosas), vieram mostrar que f é também uma função da disposição, arranjo ou espaçamento das asperezas, assim como da sua forma.

8.3.7 – Regime laminar, $R_e < 2\,000$

O escoamento é calmo, regular; os filetes, retílineos. O perfil das velocidades tem a forma parabólica; a velocidade máxima no centro é igual a duas vezes a velocidade média (Fig. 8.7).

Para o escoamento laminar, aplica-se a equação conhecida como de Hagen-Poiseuille.

$$h_f = \frac{128 \cdot \nu L Q}{\pi D^4 g}$$

equação (10)

determinada, experimentalmente, por Hagen (1839) e, independentemente, por Poiseuille (1840). A sua dedução analítica foi feita posteriormente por Wiedermann, em 1856.

Verifica-se que, para o escoamento laminar, a perda de carga é proporcional à primeira potência da velocidade. Substituindo-se na equação (10) o valor

$$Q = Av = \frac{\pi D^2}{4} \nu$$

resulta:

$$h_f = \frac{64\nu Lv}{2gD^2} = \frac{64\nu}{Dv} \frac{Lv^2}{D^2g}$$

Comparando-se a expressão acima com a fórmula de Darcy-Weisbach (equação 7), verifica-se que

$$f = \frac{64\nu}{Dv}, \quad \therefore \quad f = \frac{64}{R_e}$$

equação (11)

Observa-se que essa fórmula não envolve fatores empíricos ou coeficientes

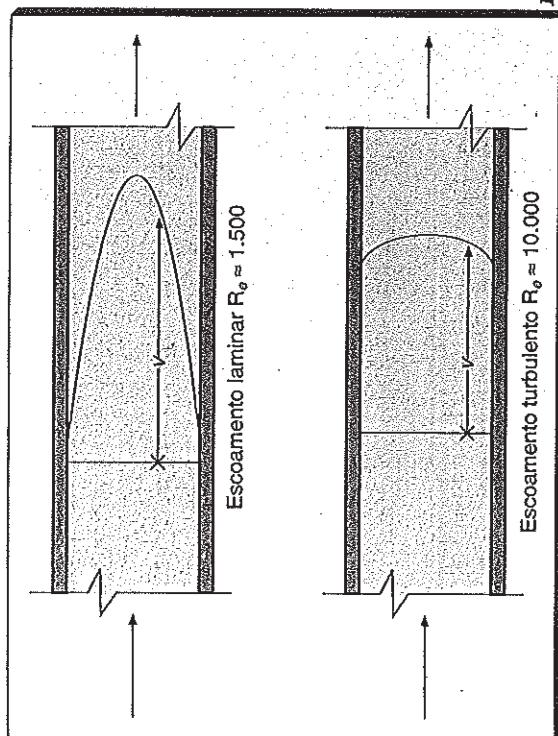


Figura 8.7

experimentais de qualquer natureza; só inclui dados relativos às propriedades do fluido (viscosidade, peso específico).

A equação (11) mostra, ainda, que a perda por atrito nesse caso é independente da rugosidade das paredes dos tubos. A experiência comprova esse fato.

O regime laminar raramente ocorre na prática, exceção feita para o escoamento de certos fluidos bastante viscosos, tais como determinados óleos pesados, melações e caldas, ou, então, para o caso de tubos capilares ou escoamento em meios porosos. O escoamento do sangue nos tecidos do organismo constitui um exemplo interessante.

A eq. (10) também pode ser escrita:

$$J = 32 \frac{\mu \cdot \nu}{\rho g \cdot D^2} \quad \text{outra forma da fórmula de Poiseuille.}$$

8.3.8 – Regime turbulento

O escoamento é agitado e o comportamento com tubos lisos é diverso daquele que se verifica com tubos rugosos.

Em 1930, Theodore Von Kármán estabeleceu uma fórmula teórica, relacionando os valores de f e de R_e para os tubos lisos

$$\frac{J}{\sqrt{f}} = 2 \log (R_e \sqrt{f}) - 0,8$$

equação (12)

Essa equação é válida para os tubos lisos e para qualquer valor de R_e , compreendido entre o valor crítico e ∞ ($f = 0$). É teoricamente correta e os seus resultados têm sido comprovados experimentalmente.

Para os tubos rugosos funcionando na zona de turbulência completa, Nikuradse encontrou

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,74 + 2 \log \frac{D}{2e} \quad \text{equação (13)}$$

Os valores de f obtidos para tubos rugosos são maiores do que os obtidos pela Eq. (12).

Convém notar que a Equação (13) não inclui o número de Reynolds e que, portanto, para um certa canalização de determinado diâmetro D , o valor de f dependerá apenas da rugosidade.

Para a região compreendida entre as condições precedentes, isto é, entre o caso de tubos lisos e a zona de turbulência completa, C. F. Colebrook propôs, em 1938, uma equação semi-empírica, ou seja,

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left[\frac{e}{3,7D} + \frac{2,51}{R_e \sqrt{f}} \right] \quad \text{equação (14)}$$

Essa equação tende para a equação (12) dos tubos lisos quando " $e/3,7D$ " torna-se muito pequeno, assim como tende para a Eq. (13) quando se reduz o valor de " $2,51/R_e \sqrt{f}$ ".

Nessas condições, quando a espessura do filme laminar for grande, comparada à altura das projeções rugosas, a perda no encanamento será a mesma que resultaria se a canalização fosse muito lisa.

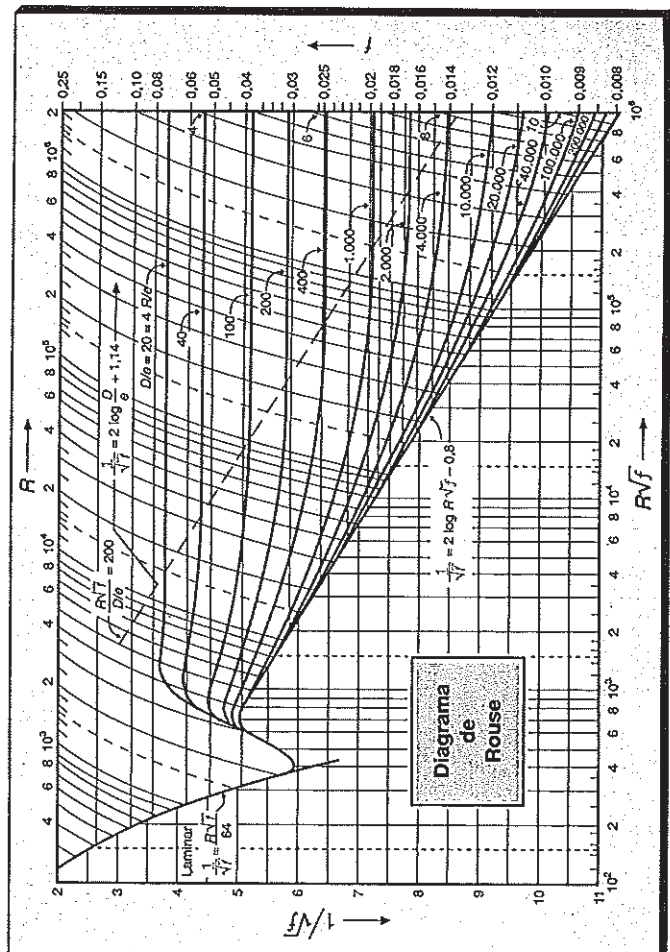


Figura 8.8 - Diagrama de Rouse

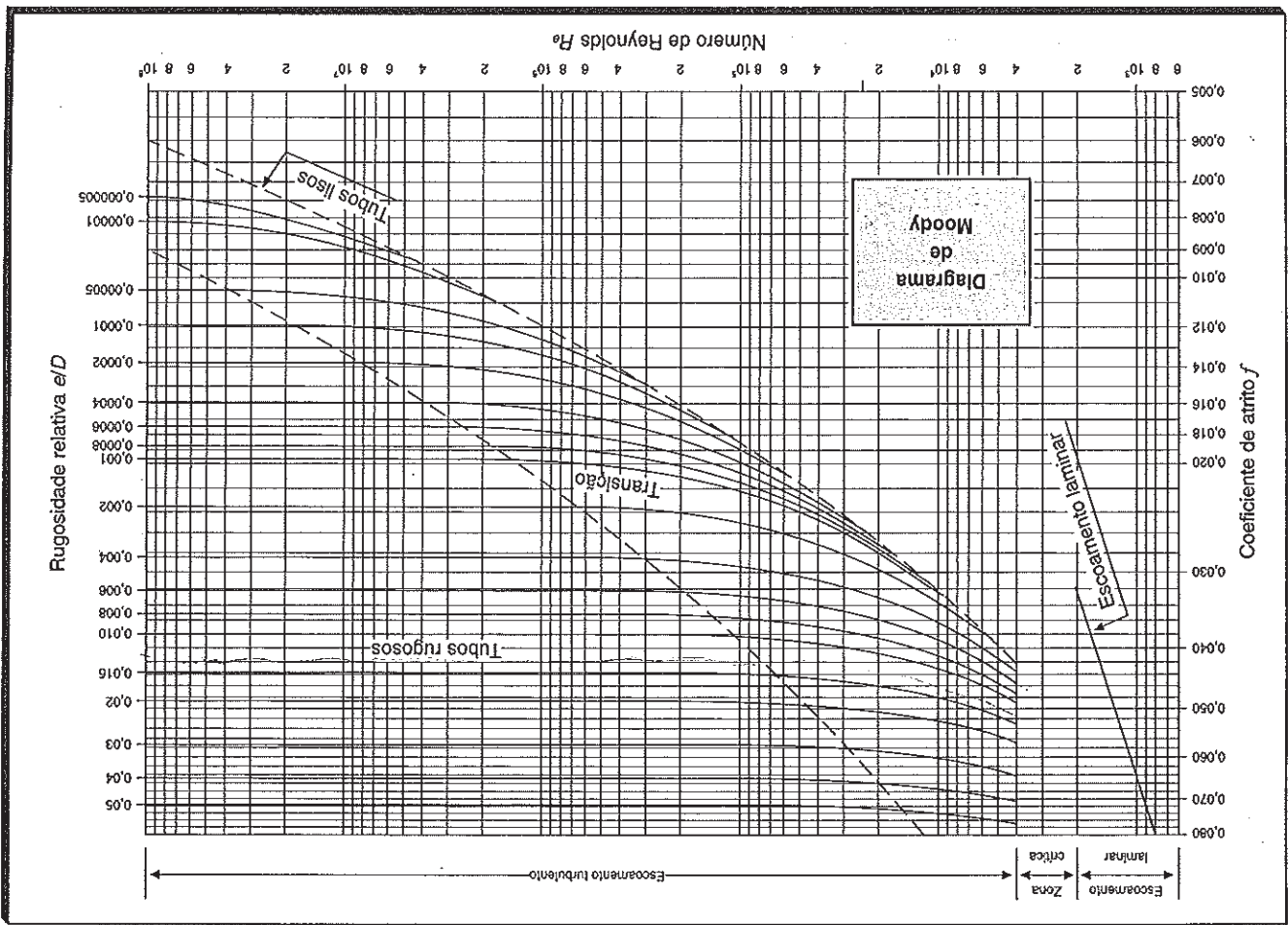


Figura 8.9 - Diagrama de Moody

8.3.9 — Diagramas de Stanton, Rouse e Moody

A equação de Colebrook pode ser convenientemente representada num diagrama, tomando-se, nos eixos, valores de f (ou de $1/\sqrt{f}$ e $R_e \sqrt{f}$) e os valores de D/e aparecem como uma família de curvas [Harpa de Nikuradse (Fig. 8.3)].

Diagramas desse tipo foram publicados por Hunter Rouse e L. F. Moody. Outro diagrama semelhante foi originalmente divulgado por Stanton.

Na Fig. 8.8, encontra-se o diagrama de Rouse, e na Fig. 8.9 o de Moody, de grande utilidade na solução geral dos problemas de escoamento em tubos.

Ao final deste capítulo (item 8.4), está apresentada a Tab. 8.14 (b), com o resultado dos cálculos pela fórmula Universal (Colebrook), para os diâmetros comerciais e velocidade usuais e para diferentes valores de rugosidade absoluta e .

8.3.10 — Problemas tipo: sua solução com o emprego dos diagramas de Rouse e Moody

O Quadro 8.6 auxilia o encaminhamento dos vários tipos de problemas. Consideram-se como conhecidos os dados complementares relativos à natureza e condições do fluido que permitam conhecer a sua viscosidade (ν), bem como as características da tubulação: comprimento (L), material, estado e aspereza (e).

Exercício 8.5 — (Problema-tipo I);

Uma tubulação de aço rebatido, com 0,30 m de diâmetro e 300 m de comprimento, conduz 130 ℓ/s de água a 15,5°C. A rugosidade do tubo é 0,003 m. Determinar a velocidade média e a perda de carga.

Solução:

A viscosidade cinemática da água a 15,5°C = 0,000001132 m^2/s (Tab. 8.10)

$$\nu = \frac{Q}{A} = \frac{0,130}{0,0707} = 1,84 m/s \quad R_e = \frac{vD}{\nu} = \frac{1,84 \times 0,30}{0,000001132} \approx 490\,000 = 4,9 \times 10^5$$

$$\frac{e}{D} = \frac{0,003}{0,3} = 0,01, \text{ e pelo diagrama: } f = 0,038 \text{ (Moody)}$$

$$h_f = f \frac{Lv^2}{D2g} = \frac{0,038 \times 300 \times 1,84^2}{0,30 \times 2 \times 9,8} \quad \therefore h_f = 6,55 m$$

Exercício 8.6 — (Problema-tipo II)

Dois reservatórios estão ligados por uma canalização de ferro fundido ($e = 0,000260$ m) com 0,15 m de diâmetro e 360 m de extensão. Determinar a velocidade e a vazão no momento em que a diferença de nível entre os dois reservatórios igualar-se a 9,30 m. Admitir a temperatura da água como sendo de 26,5°C.

Solução:

Pela Tabela 8.10, tira-se a viscosidade ν da água a essa temperatura: $\nu = 0,000000866$ m^2/s

Problema tipo	Dados	Incógnitas	1º Passo	2º Passo	3º Passo	4º Passo	5º Passo
I	D, Q	h_f, ν	Calcular $v = \frac{Q}{A}$	Calcular $R_e = \frac{vD}{\nu}$	Determinar $\frac{e}{D}$	Com valores de R_e e de e/D , encontrar f no diagrama (Moody)	Calcular $h_f = \frac{fLv^2}{D2g}$ (Darcy)
II	D, h_f	ν, Q	Calcular $R_e \sqrt{f} = \sqrt{\frac{2gh_f D^3}{Lv^2}}$	Determinar $\frac{e}{D}$	Com os valores de $R_e \sqrt{f}$ e de $\frac{e}{D}$ encontrar f no diagrama (Rouse)	Calcular $v = \sqrt{\frac{h_f D 2g}{fL}}$	Calcular $Q = Av$
III	h_f, Q	D, ν	Assumir um primeiro valor de $f: f_1$	Com f_1 calcular $D_1 = \sqrt{\frac{f_1 L Q^2}{8 h_f g}}$	Calcular $R_e = \frac{4Q}{\pi D_1 \nu}$	Determinar $\frac{D_1}{e}$	Com esses valores, encontrar no diagrama um novo valor para $f: f_2$ repetir as operações até que $f_{n+1} = f_n$ (Moody)
IV	h_f, ν	D, Q	Assumir um primeiro valor para $f: f_1$	Com f_1 calcular $D_1 = \frac{f_1 L v^2}{h_f 2g}$	Calcular $R_e = \frac{v}{\nu D_1}$	Determinar $\frac{D_1}{e}$	Com esses valores, encontrar no diagrama um novo valor para $f: f_2$ repetir as operações até que $f_{n+1} = f_n$ (Moody)
V	ν, Q	D, h_f	Calcular $A = \frac{Q}{v}$	Conhecido D , recal no tipo I	—	—	—
VI	ν, D	h_f, Q	Calcular $Q = Av$	Conhecido Q , recal no tipo I	—	—	—

$$\text{então: } R_e \sqrt{f} = \sqrt{\frac{2gh_r D^3}{Lv^2}} = \sqrt{\frac{2 \times 9,8 \times 9,3 \times 0,15^3}{360 \times 0,00000866^2}}$$

$$R_e \sqrt{f} = 47\,800 \approx 4,8 \times 10^4 \quad \text{e} \quad \frac{D}{e} = \frac{0,15}{0,000260} \approx 580$$

pelo diagrama: $f = 0,023$ (Rouse)

$$v = \sqrt{\frac{h_r D_2 g}{f L}} = \sqrt{\frac{9,30 \times 0,15 \times 2 \times 9,8}{0,023 \times 360}} \quad \therefore \quad v = 1,80 \text{ m/s}$$

$$Q = Av = 0,01777 \times 1,80 = 0,031 \text{ m}^3/\text{s}$$

Exercício 8.7 — (Problema-tipo III)

Determinar o diâmetro necessário para que um encanamento de aço ($e = 0,000046$ m) conduza 19 l/s de querosene a 10°C ($\nu = 0,00000278 \text{ m}^2/\text{s}$), com uma perda de carga que não exceda 6 m em $1\,200$ m de extensão. Calcular velocidade e perda de carga para o diâmetro adotado.

Solução:

Assumindo $f_1 = 0,03$,

$$D_1 = \sqrt[5]{\frac{f_1 L Q^2}{h_r \pi^2 g}} = \sqrt[5]{\frac{0,03 \times 8 \times 1\,200 \times 0,019^2}{6 \times \pi^2 \times 9,8}} \quad \therefore \quad D_1 = 0,179 \text{ m}$$

$$R_{e1} = \frac{4Q}{\pi D_1 v} = \frac{4 \times 0,019}{\pi \times 0,179 \times 0,00000278} \quad \therefore \quad R_{e1} = 48\,600 \approx 4,9 \cdot 10^4$$

$$\frac{e}{D_1} = \frac{0,000046}{0,179} \approx 0,000257 \text{ e, pelo diagrama: } f_2 = 0,022 \text{ (Moody)}$$

$$D_2 = \sqrt[5]{\frac{0,022 \times 8 \times 1\,200 \times 0,019^2}{6 \times \pi^2 \times 9,8}} = 0,168 \text{ m}$$

$$R_{e2} = \frac{4 \times 0,019}{\pi \times 0,168 \times 0,00000278} \approx 52\,000 = 5,2 \cdot 10^4$$

$$\frac{e}{D_2} = \frac{0,000046}{0,168} \approx 0,00027 \text{ e, pelo diagrama: } f_3 \approx 0,022 \text{ (Moody)}$$

Portanto o diâmetro $0,168$ m seria suficiente. Entretanto o diâmetro comercial mais próximo é $0,20$ m, este será o adotado. A velocidade resultará, então,

$$v = \frac{0,019}{0,0314} = 0,605 \text{ m/s} \quad \text{e} \quad hf = 2,58 \text{ m}$$

Exercício 8.8 — (Problema-tipo IV)

Uma canalização nova de aço com 150 m de comprimento transporta gasolina a 10°C ($\nu = 0,00000710 \text{ m}^2/\text{s}$) de um tanque para outro, com uma velocidade média de $1,44$ m/s. A rugosidade dos tubos pode ser admitida igual a $0,000061$ m. Determinar o diâmetro e a vazão da linha, conhecida a diferença de nível entre os dois depósitos, que é de $1,86$ m.

Solução:

Admitindo inicialmente

$$f_1 = 0,025 \Rightarrow D_1 = \frac{f_1 L v^2}{h_r 2g} = \frac{0,025 \times 150 \times 1,44^2}{1,86 \times 2 \times 9,8} = 0,214 \text{ m}$$

$$\text{e: } R_{e1} = \frac{v D_1}{\nu} = \frac{1,44 \times 0,214}{0,00000710} \approx 435\,000 \approx 4,4 \times 10^5$$

$$\frac{e}{D_1} = \frac{0,000061}{0,214} \approx 0,000285 \text{ e, pelo diagrama: } f_2 = 0,017 \text{ (Moody)}$$

$$D_2 = \frac{0,017 \times 150 \times 1,44^2}{1,86 \times 2 \times 9,8} = 0,145 \text{ m e } R_{e2} = \frac{v D_2}{\nu} = \frac{1,44 \times 0,145}{0,00000710} = 2,9 \times 10^5$$

$$\frac{e}{D_2} = \frac{0,000061}{0,145} \approx 0,00042 \text{ e, pelo diagrama: } f_3 = 0,018 \text{ (Moody)}$$

$$D_3 = \frac{0,018 \times 150 \times 1,44^2}{1,86 \times 2 \times 9,8} = 0,153 \text{ m}$$

ou seja, muito próximo do diâmetro comercial de 150 mm, resultado que será aceito.

A vazão será:

$$Q = Av = 0,0177 \times 1,44 = 0,0255 \text{ m}^3/\text{s} \approx 25,5 \text{ l/s}$$

8.3.11 — Observações sobre o emprego da fórmula Universal

O emprego da fórmula Universal tem-se ampliado, embora ainda não exista um conhecimento satisfatório a respeito da variação dos valores dos coeficientes de rugosidade (e). Muitos engenheiros não se sentem seguros, principalmente quando consideram o caso de tubulações sujeitas à tuberculização ou a incrustações internas.

A maioria dos dados divulgados sobre esses coeficientes corresponde a tubos novos ou a canalizações não sujeitas ao fenômeno do "envelhecimento", e por isso muitos técnicos têm sido levados a cometer enganos na avaliação do comportamento hidráulico de tubulações.

As Tabs. 8.9 e 8.11 que se apresentam a seguir revelam a grande variabilidade de valores para o coeficiente e , mostrando ao mesmo tempo os valores sugeridos.

Na prática, essas incertezas sobre as temperaturas a adotar e as rugosidades reais a encontrar anulam em grande parte as vantagens teóricas do uso das fórmulas "científicas" sobre as empíricas, pois a ordem de grandeza das imprecisões remetem ambos os métodos a uma mesma faixa de soluções.

A norma NBR12 215 (NB 591) da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) prefere o uso da fórmula "Universal" para o cálculo de adutoras em sistemas de distribuição de água. Esse é um assunto que transcende os objetivos de uma normalização técnica e que deve ficar a critério do projetista, uma vez que a metodologia de trabalho e de cálculo é da alçada do engenheiro autor do projeto e, como visto anteriormente, na prática as imprecisões do uso de fórmulas empíricas não alteram a ordem de grandeza em relação às imprecisões dos parâmetros a adotar na fórmula Universal; e o uso das fórmulas empíricas é mais ágil.

Tabela 8.9 — Rugosidade dos tubos (valores de e em metros)* (ver também a Tab. 8.11)		
Material	Tubos novos	Tubos velhos**
Aço galvanizado	0,00015 a 0,00020	0,0046
Aço rebitado	0,0010 a 0,0030	0,0060
Aço revestido	0,0004	0,0005 a 0,0012
Aço soldado	0,00004 a 0,00006	0,0024
Chumbo	lisos	lisos
Cimento-amianto	0,000025	lisos
Cobre ou latão	lisos	lisos
Concreto bem acabado	0,0003 a 0,0010	
Concreto ordinário	0,0010 a 0,0020	
Ferro forjado	0,0004 a 0,0006	0,0024
Ferro fundido	0,00025 a 0,00050	0,0030 a 0,0050
Ferro fundido com revestimento asfáltico	0,00012	0,0021
Madeira em aduelas	0,0002 a 0,0010	
Manilhas cerâmicas	0,0006	0,0030
Vidro	lisos***	lisos***
Plástico	lisos	lisos

* Para os tubos lisos, o valor de e é 0,00001 ou menos

** Dados indicados por R. W. Powell

*** Correspondem aos maiores valores de D/e

Tabela 8.10 — Viscosidade cinemática da água (v)				
Temperatura °C		Viscosidade cinemática m ² /s	Temperatura °C	Viscosidade cinemática m ² /s
0		0,000001792	20	0,000001007
2		0,000001673	22	0,000000960
4		0,000001567	24	0,000000917
6		0,000001473	26	0,000000876
8		0,000001386	28	0,000000839
10		0,000001308	30	0,000000804
12		0,000001237	32	0,000000772
14		0,000001172	34	0,000000741
16		0,000001112	36	0,000000713
18		0,000001059	38	0,000000687

Veja também a Quadro 1.12

Tabela 8.11 — Coeficientes de rugosidade "e" em mm para a fórmula Universal Valores recomendados para projeto (pesquisa da literatura internacional). Tubos em serviço (J. M. Azevedo Netto)									
Autores	Tubos de aço com revestimento especial ou esmalte	Tubos de concreto	Tubos de ferro fundido e ferro dúctil	Sem revestimento especial	Com revestimento especial	Tubos de cimento-amianto	Ferro galvanizado	Tubos lisos chumbo, cobre, latão etc.	Tubos cerâmicos
• Câmara Sindical Nacional (SCNHP) França	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	—	—	—
• Dégremont, M. Technique de l'eau (1978)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	—	—	—
• Lamont, Peter, IWASA, 3 ^o Cong. (1955)	0,06	0,06	0,125	0,25	0,125	0,025	0,125	—	1,0
• Manual of British Water Engineering Practice, IWE, (1961)	0,125	0,04	0,125	—	0,03	—	—	—	—
• Chemical Engineers Handbook, R. H. Perry, 4 ^a Ed., (1963)	0,05	0,3	—	0,26	—	0,15	—	—	—
• Internal Flow, British Hydromechanics Research Association	0,025 a 0,50	0,1	—	—	—	—	0,06 a 0,24	< 0,03	3,0
• Piping Handbook, King e Crocker (1967)	0,05	—	—	—	—	—	—	—	—
• R. W. Powell (citado Azevedo Netto) (1951)	0,03 a 0,09	0,3 a 3,0	0,12	0,06 a 0,12	—	—	—	—	—
• Hydraulic Institute (1979)	0,05	0,3 a 1,0	—	2,1	—	—	—	—	—
• A. Lencastre	0,06 a 0,15	—	—	0,14	—	—	—	—	—
• Linsley & Franzini (1978)	—	0,3 a 3,0	—	0,26	—	—	0,15	—	—
• PNB 591 (1977)	0,08 a 0,12	0,08 a 0,66	0,14 a 0,20	—	0,14 a 0,20	0,05	0,15	—	—
• Azevedo Netto	0,125	0,30	0,125	0,25	0,125	0,05	0,15	—	—
• PNB 591 (1977)	0,08 a 0,12	0,08 a 0,66	0,14 a 0,20	—	0,14 a 0,20	0,05	0,15	—	—
• Azevedo Netto	0,125	0,30	0,125	0,25	0,125	0,05	0,15	—	—

Obs.: A experiência francesa recomenda a adoção de e = 0,1 mm para tubos e para tubos não sujeitos à corrosão e incrustação e e = 2 mm para tubos sujeitos a essas fenômenos de deterioração.

Tabela 8.12 — Viscosidade cinemática de alguns fluidos (v)			
Fluido	Temperatura °C	Peso específico kg*/m³	Viscosidade cinemática m²/s
Gasolina	5	737	0,00000757
	10	733	0,00000710
	15	728	0,00000681
	20	725	0,00000648
	25	720	0,00000621
	30	716	0,00000596
Óleo combustível	5	865	0,00000598
	10	861	0,00000516
	15	858	0,00000448
	20	855	0,00000394
	25	852	0,00000352
	30	849	0,00000313
Ar (Pressão atmosférica)	5	1,266	0,0000137
	10	1,244	0,0000141
	15	1,222	0,0000146
	20	1,201	0,0000151
	25	1,181	0,0000155
	30	1,162	0,0000160

8.3.12 — Envelhecimento dos tubos

As tubulações, especialmente as de ferro e as de aço, estão sujeitas ao fenômeno do envelhecimento. Em geral, após algum tempo, os tubos vão se tornando mais rugosos em consequência de efeitos da corrosão ou da incrustação nas paredes internas.

Para levar em conta o aumento da rugosidade com o tempo, Colebrook e White estabeleceram uma relação linear que pode ser expressa por

$$e = e_0 + \alpha \cdot t,$$

onde: e_0 = altura das rugosidades nos tubos novos (m);

e = altura das rugosidades nos tubos após t anos (m);

t = tempo, em anos;

α = taxa de crescimento das asperezas, em m/ano.

Tratando-se de canalizações de água, a taxa de crescimento α depende consideravelmente da qualidade da água e, portanto, varia com as condições locais.

Para algumas partes dos Estados Unidos foram determinados valores para α . De acordo com as investigações feitas, os valores variam de 0,0006 a 0,0006 m/ano para a região dos Grandes Lagos e Bacia do Mississippi e de 0,0004 a 0,002 m/ano para a parte leste dos EUA.

Segundo a experiência inglesa, na falta de dados experimentais seguros, o envelhecimento dos tubos de ferro fundido pode ser estimado para as condições médias, aplicando-se a seguinte expressão:

$$2 \log \alpha = 6,6 - pH, \quad \text{onde o coeficiente } \alpha \text{ é dado em mm/ano.}$$

Essa expressão evidencia a importância da pH da água no fenômeno da corrosão.

Tabela 8.13 — pH da água $\times \alpha$ (mm/ano)	
5,5	0,00305
6,0	0,00203
6,5	0,00113
7,0	0,00063
7,5	0,00038
8,0	0,00020
8,5	0,00011
9,0	0,00006

Também é justo considerar variações em função do tipo de aço ou de ferro fundido considerado. Por outro lado, os fenômenos de corrosão relacionados com a diferença de eletronegatividade dos terrenos cruzados pela tubulação, correntes elétricas parasitas, etc., normalmente combatidos pela proteção externa do tubo e pela proteção catódica, não apresentam relação direta com o aumento da rugosidade das tubulações.

Outros critérios existem e são igualmente válidos, como os de Langelier, entretanto nenhum superará o estudo real das características da água, a observação de situações correlatas na região em estudo e o acompanhamento da tubulação em questão ao longo dos anos.

8.3.13 — Condições de entrada nas canalizações

As fórmulas apresentadas para o escoamento em regime laminar (eq.11) e em regime turbulento (eq.13) e (eq.14) não são válidas para a parte inicial dos encanamentos. No caso de regime laminar, por exemplo, em um encanamento que parta de um reservatório, se a entrada na canalização for bem feita, de modo a evitar contrações, todas as partículas do fluido tenderão inicialmente a escoar com a mesma velocidade, exceto aquelas de uma camada muito fina, junto às paredes. Nesse primeiro instante, o perfil das velocidades é uma reta e a energia cinética é dada por $v^2/2g$.

À medida que o escoamento vai se processando ao longo da tubulação, as partículas mais próximas das paredes vão sendo retardadas, enquanto que as mais centrais vão tendo o seu movimento acelerado até que seja atingido o perfil de equilíbrio (parábola), como se vê na Fig. 8.5.

A distância necessária para se atingir na prática as condições de equilíbrio pode ser estimada pela relação:

$$x = 0,58 R_D \quad \text{e geralmente supera 50 diâmetros.}$$

A perda suplementar nesse trecho é, aproximadamente, igual a $[1,16 \cdot v^2/2g]$

No caso do escoamento turbulento, o equilíbrio se estabelece a uma distância muito menor, a cerca de 10 a 30 diâmetros da entrada no encanamento:

$$x = 0,8 R_c^{0,25D}$$