

Capítulo 194- Problemas em adutoras

194.1 Introdução

Vamos mostrar três problemas simples em adutoras de água usando Hazen-Williams ou Darcy-Weisbach.

194.2 Fórmula Universal ou de Darcy Weisbach

A fórmula é a seguinte:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

Sendo:

h_f = perda de carga localizada (m)

L = comprimento em metros;

D = diâmetros em metros;

V = velocidade em metro/segundo;

g = aceleração da gravidade 9,8 m/s²;

f = coeficiente de atrito (adimensional)

Escoamento laminar

O escoamento é laminar quando o número de Reynolds for menor que 2100 conforme Jeppson, 1973.

$$Re < 2100$$

Então achamos o valor de f através da equação:

$$f = 64 / Re$$

Entre número de Reynolds de 2100 a 4000 temos um regime de transição. Na prática usamos a fórmula de Colebrook-White para número de Reynolds maior que 4000 como também para número de Reynolds acima de 2100.

A fórmula de Colebrook-White pode ser apresentada de duas maneiras:

$$1/f^{0,5} = 2 \log_{10} [K/(D \cdot 3,7) + 2,52 / Re \cdot f^{0,5}] = 1,14 - 2 \log_{10} [K/D + 9,35/Re \cdot f^{0,5}]$$

Quando o tubo é hidraulicamente rugoso e o movimento é turbulento fazemos Re muito grande e simplificando temos que é independente do número de Reynolds.

$$1/f^{0,5} = 1,14 - 2 \log_{10}(K/D)$$

A fórmula que fornece o valor de f é de Colebrook-White, que só pode ser resolvida por iteração. Vários autores tentaram fazer uma fórmula explícita do coeficiente de atrito f.

No caso a que achamos melhor é a fórmula de P.K. Swamee and A.K. Jain, publicada em 1976 no *Journal Hydraulics Division* da ASCE, pp 657-664 maio, no trabalho intitulado *Explicit Equations for pipe-flows problems*.

A fórmula de Swamee e Jain é a seguinte:

$$f = \frac{1,325}{\dots} \quad (3)$$

$$[\ln(k/3,7 \cdot D + 5,74/ Re^{0,9})]^2$$

Sendo:

f= coeficiente de atrito (número adimensional);
K= rugosidade uniforme equivalente em metros;
D= diâmetro em metros;
Re= número de Reynolds (adimensional) e
ln= logaritmo neperiano.

O importante da *fórmula de Swammee e Jain* é que é direta sem necessidade de iteração. O erro de precisão da fórmula é de 1% (um por cento)

A fórmula vale nos seguintes limites:

$$0,000001 \leq K/D \leq 0,02$$

$$5.000 \leq R \leq 100.000.000$$

A rugosidade uniforme equivalente tem a letra K .

A rugosidade relativa é K / D.

Em redes de distribuição temos elevado número de perdas singulares de difícil avaliação, sendo em geral não consideradas. Estas perdas estão nas conexões, válvulas, registros, falta de alinhamento preciso, presença de defeitos nas juntas, etc. Por isso na França a Dupont recomenda para tubos de ferro fundido em redes de distribuição de água a usar K=0,001 m e quando houver formação de possíveis depósitos a adotar K=0,002 m.

Victor Streeter cita na Tabela (194.1) valores de K comuns:

Tabela 194.1- Valores de K citados por Victor Streeter

Material	Valor de K (mm)
Ferro fundido revestido com cimento	0,125
Ídem sem revestimento	0,25
Tubos de PVC	0,10
Tubos de Concreto	0,30
Tubos de aço c/ revestimento	0,125
Tubos de cobre, latão etc.	0,02

Tabela 194.2- Valores da rugosidade e ou K (mm) para diversos materiais

Características da tubulação	Rugosidade e (mm)		
	Mín.	Usual	Máx.
1. Tubos de aço, juntas soldadas, interior contínuo			
Grandes incrustações ou tuberculizações	2,4	7,0	12,2
Tuberculização geral de 1 a 3 mm	0,9	1,5	2,4
Pintura à brocha, com asfalto, esmalte ou betume	0,3	0,6	0,9
Leve enferrujamento	0,15	0,2	0,3
Revestimento obtido por imersão em asfalto quente	0,06	0,1	0,15
Revestimento com argamassa de cimento obtida por centrifugação	0,05	0,1	0,15
Tubo revestido de esmalte	0,01	0,06	0,3
2. Tubos de concreto			
Superfície obtida por centrifugação	0,15	0,3	0,5
Superfície interna bastante lisa, executada com formas metálicas	0,06	0,1	0,18
3. Tubos de cimento amianto		0,015	0,025
4. Tubos de ferro fundido			
Ferro galvanizado, fundido revestido	0,06	0,15	0,3
Ferro fundido, não revestido, novo	0,25	0,5	1,0
Ferro fundido com corrosão	1,0	1,5	3,0
Ferro fundido com depósito	1	2,0	4,0
5. Latão, cobre, chumbo	0,04	0,007	0,010
6. Tubos de plástico – PVC	0,0015	0,06	-

Fonte: adaptado de LENCASTRE (1996)

Fonte: Heller, et al, 2006

Tabela 194.3- Valores da rugosidade e ou K (mm) para diversos materiais

Material do tubo	Rug. equiv. (m)
-----	-----
Aço comercial	0,00006
Aço galvanizado	0,00016
Aço com ferrugem leve	0,00025
Aço com grandes incrustações	0,007
Aço com cimento centrifugado	0,0001
Aço revestido com asfalto	0,0006
Aço rev. c/esmalte, vinil, epoxi	0,00006
Alumínio	0,000004
Concreto muito rugoso	0,002
Concreto rugoso	0,0005
Concreto liso	0,0001
Concreto muito liso	0,00006
Concreto alisado, centrifugado	0,0003
Concreto liso formas metálicas	0,00012
Ferro fundido asfaltado	0,000122
Ferro galvanizado	0,00015
Ferro fund. não revestido novo	0,0005
Ferro fund. com ferrugem leve	0,0015
Ferro fund. c/cim. centrifugado	0,0001
Fibrocimento	0,0001
Manilha cerâmica	0,0003
Latão, cobre	0,000007
Plásticos	0,00006
Rocha (galeria) não revestida	0,35

Nota: valores extraídos de Assy, Jardim, Lencastre, Quintela, Simon, Tullis.

Fonte: site <http://paginas.terra.com.br/servicos/hidrotec/tabrug.htm>

Diagrama de Moody

Todos se lembram do diagrama de Moody na Figura (194.6) que é usado para achar o valor do coeficiente de atrito f da fórmula de Darcy-Weisbach entrando com a relação K/D e o número de Reynolds.

Uma das aplicações do diagrama de Moody é estimar o valor de f quando não se tem o número de Reynolds. Então entra-se no gráfico com o valor a direita com o valor K/D , por exemplo, $K/D=0,002$ e achamos no lado esquerdo o valor de $f=0,024$.

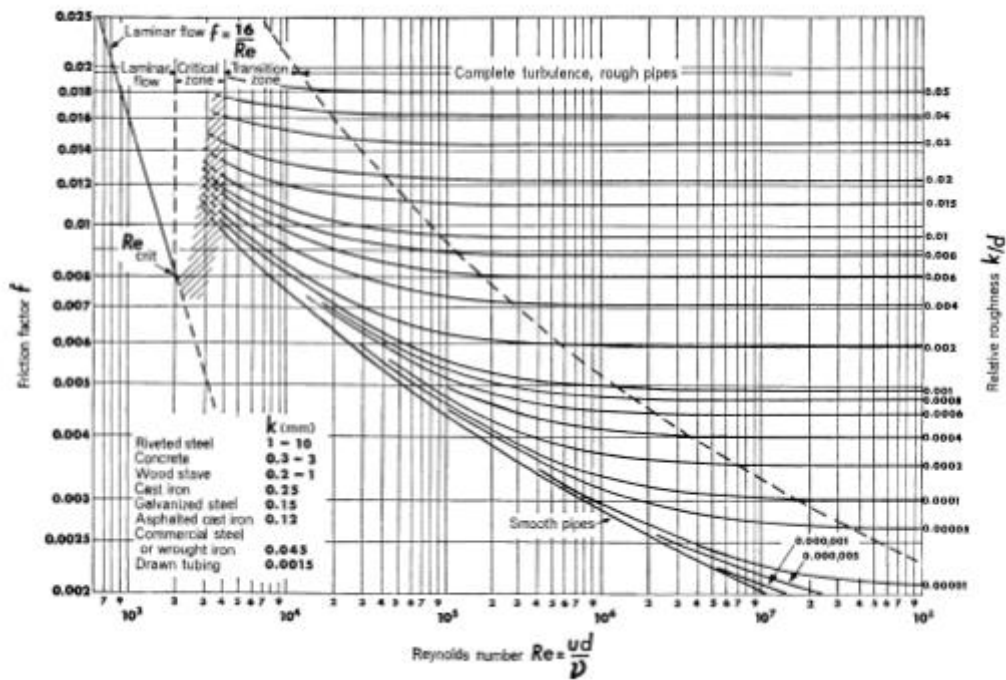


Figura 194.1 Diagrama de Moody

A Tabela (194.13) mostra os valores de K usado na fórmula de Darcy-Weisbach e relembramos que deverá ser consultada sempre a tabela do fabricante e ver os valores para tubos novos e para tubos daqui a 20anos.

Tabela 194.4- Valores do coeficiente K da fórmula de Darcy-Weisbach

Pipe Material	ϵ , ft	ϵ , cm
Steel		
Commercial	0.00015	0.004 6
Corrugated	0.003-0.03	0.09-0.9
Riveted	0.003-0.03	0.09-0.9
Galvanized	0.0002-0.0008	0.006-0.025
Mineral		
Brick sewer	0.001-0.01	0.03-0.3
Cement-asbestos		
Clays		
Concrete		
Wood stave	0.0006-0.003	0.018-0.09
Cast iron	0.00085	0.025
Asphalt coated	0.0004	0.012
Bituminous lined	0.000008	0.000 25
Cement lined	0.000008	0.000 25
Centrifugally spun	0.00001	0.000 31
Drawn tubing	0.000005	0.000 15
Miscellaneous		
Brass	0.000005	0.000 15
Copper		
Glass		
Lead		
Plastic		
Tin		
Galvanized	0.0002-0.0008	0.006-0.025
Wrought iron	0.00015	0.004 6
PVC	Smooth	Smooth

194.3 Fórmula empírica de Hazen-Willians

É ainda muito usada nos Estados Unidos e no Brasil em redes de distribuição a fórmula de Hazen-Willians usada para tubos com diâmetros igual ou maiores que 50mm e menores que 1,80m. A velocidade na tubulação não deverá exceder de 3 m/s.

Para tubos menores que 50mm pode-se usar várias outras fórmulas como a de Flamant.

A grande vantagem da fórmula de Hazen-Willians é que facilita a admissão do coeficiente de rugosidade C que é mais fácil de sugerir que os valores de K da fórmula de Darcy-Weisbach.

$$J = \frac{10,643 \cdot Q^{1,85}}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} \quad (4)$$

Sendo:

J= perda de carga em metro por metro (m/m);

Q= vazão em m³/s;

C= coeficiente de rugosidade da tubulação de Hazen-Willians;

D= diâmetro em metros.

Na Tabela (194.5) estão alguns valores do coeficiente de rugosidade de Hazen Willians

:

Tabela 194.5 Coeficientes de rugosidade de Hazen-Willians

Material	Coeficiente de rugosidade C
Ferro fundido novo	130
Ferro fundido revestido com cimento	130
Aço novo	120
Aço em uso	90
PVC	150
Ferro Fundido em uso	90

A fórmula da perda de carga no trecho do tubo de comprimento L, será:

$$hf = J \cdot L$$

Sendo :

hf= perda de carga no trecho em metros de coluna de água;

J= perda unitária obtida da fórmula (4);

L= comprimento da tubulação (m).

A velocidade na fórmula de Hazen-Willians é a seguinte:

$$V = 0,355 \cdot C \cdot D^{0,63} \cdot J^{0,54} \quad (5)$$

Sendo:

V= velocidade (m/s);

C= coeficiente de rugosidade de Hazen-Willians (adimensional)

D= diâmetro (m);

J= perda de carga unitária (m/m).

A fórmula da vazão de Hazen-Willians é a seguinte:

$$Q = 0,275 \cdot C \cdot D^{2,63} \cdot J^{0,54} \quad (6)$$

Sendo:

Q= vazão (m³/s);

C= coeficiente de rugosidade de Hazen-Willians;

J= perda de carga (m/m).

A fórmula de Hazen-Willians é questionável para altas velocidades e para valores de C muito abaixo de 100. Assim deverá ser limitada a sua aplicação para no máximo 3 (três) m/s.

Hazen-Willians para qualquer seção

Mott, 1994 apresenta uma fórmula de Hazen-Willians que pode ser aplicada em tubos de qualquer seção introduzindo o raio hidráulico.

Para unidades S.I. temos:

$$V = 0,85 \cdot C \cdot R^{0,63} \cdot S^{0,54}$$
$$h_L = L \cdot [Q / (0,85 \cdot A \cdot C \cdot R^{0,63})]^{1,852}$$
$$Q = 0,85 \cdot A \cdot C \cdot R^{0,63} \cdot S^{0,54}$$

Sendo:

V= velocidade média na seção (m/s)

C= coeficiente de Hazen-Willians. Para concreto varia de 100 a 140.

R= raio hidráulico (m) = A/P

A= área molhada (m²)

P= perímetro molhado (m)

L= comprimento da galeria (m)

h_L= perda de carga distribuída no trecho L (m)

194.4 Problemas usuais em adutoras

Cálculo de adutoras de água potável, por gravidade, de condutos de seção circular, usando a fórmula de Darcy-Weisbach e três problemas tipos apresentados na ABNT PNB-591/77, supondo o escoamento turbulento uniforme em tubos comerciais.

Os problemas simples de escoamentos em tubos segundo *Streeter*, são entendidos como aqueles nos quais a perda de carga distribuída, ou devida ao atrito, no tubo é a única perda presente. isto é, não estamos levando em consideração a perda de carga localizada, mas isto poderá ser feito caso, transformemos a perda de carga localizada em comprimento equivalente e façamos a soma com o comprimento real.

Tabela 194.6- Tipo de problemas usuais em adutoras

Tipo de problema	Dados	Obter
I	Q, L, D, v, K	hf
II	hf, L, D, v, K	Q
III	hf, Q, L, v, K	D

Problemas tipos

A ABNT bem como outros livros, indicam basicamente três problemas tipo, dada a escolha da seção.

- No primeiro achamos a **perda de carga total**, que é o problema mais comum.

- No segundo procuramos a **vazão**, dado o diâmetro e a perda de carga total.
- No terceiro procuramos o **diâmetro**, dada a perda de carga total e a vazão. logicamente o diâmetro não será aquele encontrado na prática, mas valerá apenas , obter o valor mais próximo e depois verificar com o problema tipo número um.

Sistema S.I.

Usamos aqui as unidades do sistema internacional, sendo o metro para o comprimento, o m^3/s para a vazão e m/s para a velocidade.

Linha piezométrica

Supomos também que a adutora de água potável que estamos estudando não corta a linha piezométrica.

Em outras palavras, como a velocidade máxima considerada é pequena, nós admitimos que é desprezível o termo cinético da linha de carga ou como os americanos dizem, da linha de energia.

Então, admitimos que coincide a linha piezométrica com a linha de carga. Caso a adutora corte a linha piezométrica, deverá ser feito outro estudo para a resolução do problema, não se aplicando os problemas tipos aqui apresentados.

Temperatura

Considera-se que a temperatura é de 20°C com a viscosidade cinemática correspondente.

Velocidade

Considera-se que a velocidade varia com o diâmetro de acordo com a equação $V=0.8+1,5x D$.

Exemplo 194.1

Problema Tipo I

Tipo de problema	Dados	Obter
I	Q, L, D, v, K	hf

Dados:

$$Q=0,14m^3/s$$

$$D=0,20m$$

$$L=400m$$

$$K=0,25mm$$

$$v=1,007 \times 10^{-6} m^2/s$$

$$H_f=?$$

$$K/D= 0,25/200= 0,00125$$

$$A=PI \times D^2/4= 3,1316 \times 0,20^2/4=0,0314m^2$$

$$Q=A \times V \text{ Portanto } V= Q/A= 0,14m^3/s; 0,0314m^2= 4,46m/s$$

$$Re= V \times D/ v= 4,46 \times 0,20/ 1,007 \times 10^{-6}= 8.857.994$$

A fórmula de *Swammee e Jain* é a seguinte:

$$f = \frac{1,325}{[\ln(k/3,7 \cdot D + 5,74/Re^{0,9})]^2}$$

$$f = \frac{1,325}{[\ln(0,00125/3,7 + 5,74/8857994^{0,9})]^2} = 0,021$$

$$hf = f \times L/D \times V^2/2g = 0,021 \times (400/0,20) \times 4,46^2 / (2 \times 9,81) = 42,58m$$

Exemplo 194.2

Tipo de problema	Dados	Obter
II	hf, L, D, v, K	Q

Dados:

$$H_f = 6,00m$$

$$L = 300m$$

$$D = 0,30m$$

$$v = 1,007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/s$$

$$K = 3mm$$

Obter Q=?

$$Q = -0,955 \times D^2 \times (g \times D \times hf/L)^{0,5} \times \ln[K/(3,7 \times D) + (1,78 \times v) / (D \times (g \times D \times hf/L)^{0,5})]$$

Substituindo os dados do problema teremos:

$$Q = -0,955 \times 0,3^2 \times (9,81 \times 0,30 \times 6,0/300)^{0,5} \times \ln[3/(3,7 \times 300) + (1,78 \times 1,007 \times 10^{-6}) / (0,30 \times (9,81 \times 0,30 \times 6,0/300)^{0,5})] = 0,123 \text{ m}^3/s$$

Exemplo 194.3

Tipo de problema	Dados	Obter
III	hf, Q, L, v, K	D

Dados:

$$H_f = 6,00m$$

$$Q = 0,123 \text{ m}^3/s$$

$$L = 300m$$

$$D = 0,30m$$

$$v = 1,007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/s$$

$$K = 3mm$$

Obter D=?

$$D = 0,66 \times [K^{1,25} \times (L \times Q^2 / g \times hf)^{4,75} + v \times Q^{9,4} \times (L/g \times hf)^{5,2}]^{0,04}$$

$$D = 0,66 \times [0,003^{1,25} \times (300 \times 0,123^2 / 9,81 \times 6,0)^{4,75} + 1,007 \times 10^{-6} \times 0,123^{9,4} \times (300/9,81 \times 6,0)^{5,2}]^{0,04} = 0,30m$$

194.4 Perdas localizadas

As perdas de cargas **localizadas** são também chamadas de perdas **singulares** e são importantes. Ocorrem em curvas, cotovelos, válvulas etc.. Alguns autores desprezam as perdas localizadas quando as mesmas tem menos de 5% do total de perdas.

Alguns aconselham desprezar uma perda localizada quando a distância da tubulação for de aproximadamente 1000 diâmetros.

É muito difícil especificar claramente quando deve ser desprezada ou não. Por exemplo, em bombeamento, as vezes o desprezo das perdas de cargas tem levado a inúmeros erros de dimensionamento de conjuntos motor-bombas centrífugas.

Os russos fizeram uma grande quantidade de pesquisas em perdas singulares as mais incríveis de se imaginar, como mangueira, grelhas etc.. Os americanos traduziram para o inglês e saiu o livro *Handbook of Hydraulic Resistance* de autoria de I.I. Idelchik, 1994.

As perdas localizadas são expressas em função de $v^2/2g$ através do coeficiente de perda de carga K_s , o qual se encontra tabelado no livro citado.

$$h_L = K_s \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

Sendo:

h_L = perda localizada em metros;

V = velocidade média em m/s;

g = aceleração da gravidade 9,81 m/s².

K_s = coeficiente de perda de carga localizada (adimensional)

Comumente a perda de carga localizada é transformada em comprimento equivalente de tubo. Igualando-se as perdas de cargas fornecidas pela perda localizada e pela fórmula de Darcy-Weisbach, e considerando o comprimento equivalente L_e temos:

$$L_e = \frac{K_s \cdot D}{f}$$

Sendo:

L_e = comprimento equivalente em metros;

K_s = coeficiente de perda de carga localizada (adimensional);

D = diâmetro da tubulação em metros;

f = coeficiente de atrito(adimensional).

Vamos citar alguns valores de K_s citados por Walski (1992) e Streeter (1986) conforme Tabela (194.7).

Tabela 194.7- Coeficientes Ks de perda localizada

Tipo de perda localizada	Coeficiente de perda localizada Ks
Válvula de gaveta aberta	0,39
Idem $\frac{3}{4}$ aberta	1,10
Idem $\frac{1}{2}$ aberta	4,8
Idem $\frac{1}{4}$ aberta	27,0
Válvula globo aberta	10,0
Válvula borboleta aberta	1,2
Entrada bem arredondada	0,19
Entrada em projeção	0,78
Entrada suave	0,50
Saída reservatório	1,0
Cotovelo comum	0,9
Cotovelo de raio médio	0,75
Cotovelo de raio longo	0,60
Te comum	1,8
Curva de raio curto	2,2

Em conclusão, qualquer perda localizada pode ser transformada em comprimento equivalente e ser, portanto ser considerado no cálculo do método de Hardy Cross.

194.5 Bibliografia e livros consultados:

- ANALYSIS OF COMPLEX NETWORKS acessado em 16 de abril de 2007
- AWWA MANUAL M32. *Distribution network analysis for water utilities*. 1989, 102p.
- BILLINGS MR. BRUCE et al, *Forecasting Urban Water Demand*, 1996, AWWA;
- CETESB, *Projeto de Sistemas de Distribuição de Água*, 1975;
- CHAPTER 3- *Flow analysis* acessado em 16 de abril de 2007
<http://faculty.washington.edu/markbenj/CEE342/Abbreviated%20Hardy-Cross.pdf>
<http://www.engr.mun.ca/muzychka/Chapter3.pdf>
http://www.mwhsoft.com/page/p_bookstore/cwbsa/Chap5.pdf
- FACULDADE DE HIGIENE E SAUDE PUBLICA DA USP. *Técnica de abastecimento e tratamento de água*. São Paulo,1967.
- HWANG, NED H. C., *Sistemas de Engenharia Hidráulica*, 1984; Prentice/Hall do Brasil;
- IDELCHIK,I.E., *Handbook of Hydraulic Resistance*, 1994, CRC Press;
- JEPPSON,ROLAND W. *Analysis of Flow in Pipe Networks*, 1976, Ann Arbor Science Publisher; 164 páginas.
- MAYS, LARRY W., *Hydrosystems Engineering&Management*, 1992, McGraw-Hill.
- MIGNOSSA, PAULO. *Modelli matematici delle reti di distribuzione idrica*, 19páginas, Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Parma, Italia.
- NETWORKS ANALYSIS acessado em 16 de abril de 2007
- MOTT, ROBERT L. *Applied Fluid Mechanics*. 4a ed. MacMillan, New York, 1994
- SILVESTRE, PASCHOAL. *Hidráulica Geral*, 1983, LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A..
- STEPHENSON, DAVID. *Pipeflow analysis*. 1984, 201páginas, ISBN 0-444-41668-2
- STREETER, VICTOR L. et al, *Mecânica dos Fluidos*, 1982, McGraw-Hil;
- WALSKI,THOMAS M. *Analysis of Water Distribution Systems*, 1992, Krieger Publishing;
- WALSKI,THOMAS M. et al, *Water Distribution Systems: simulation and sizing*, 1990.
- TSUTIYA, MILTON TOMOYUKI. *Abastecimento de água*. EPUSP, 2004, 641páginas.