

**Curso de Hidráulica e Saneamento**

**fevereiro de 2008**

## Apresentação

Este livro denominado Curso de Rede de Água resultou de curso ministrado no SAAE em 2008 com 64h.

Agradeço a Deus, o Grande Arquiteto do Universo a oportunidade de realizar esta tarefa.

**Guarulhos, julho de 2008**

**Engenheiro civil Plínio Tomaz**

## Capítulo 1-Método de Hardy-Cross para redes de água

Um dos maiores matemáticos de Portugal foi sem dúvida Bento de Jesus Caraça (1901-1948). O seu livro “Conceitos Fundamentais da Matemática” editado em Lisboa em 1958 foi meu livro de cabeceira a partir de 1960. Todo jovem deveria ler este livro.

### Alfabeto grego

$\alpha$	Alfa	$\eta$	Eta	$\nu$	Nu	$\tau$	Tau
$\beta$	Beta	$\theta$	Theta	$\xi$	Xi	$\upsilon$	Upsilon
$\gamma$	Gama	$\iota$	Iota	$\omicron$	Omicron	$\phi$	Phi
$\delta$	Delta	$\kappa$	Kappa	$\pi$	Pi	$\chi$	Chi
$\epsilon$	Epsilon	$\lambda$	Lambda	$\rho$	Rho	$\psi$	Psi
$\zeta$	Zeta	$\mu$	Mu	$\sigma$	Sigma	$\omega$	Omega

Maiúscula	Minúscula	Nome	Letra
A	$\alpha$	Alfa	<b>A</b>
B	$\beta$	Beta	<b>B</b>
Γ	$\gamma$	Gama	<b>G</b>
Δ	$\delta$	Delta	<b>D</b>
E	$\epsilon$	Epsilon	<b>E</b>
Z	$\zeta$	Dzeta	<b>Z</b>
H	$\eta$	Eta	<b>H</b>
Θ	$\theta$	Teta	<b>Q</b>
I	$\iota$	Iota	<b>I</b>
K	$\kappa$	Capa	<b>K</b>
Λ	$\lambda$	Lambda	<b>L</b>
M	$\mu$	Mu	<b>M</b>
N	$\nu$	Nu	<b>N</b>
Ξ	$\xi$	Csi	<b>X</b>
O	$\omicron$	Ômicron	<b>O</b>
Π	$\pi$	Pi	<b>P</b>
P	$\rho$	Rho	<b>R</b>
Σ	$\sigma$	Sigma	<b>S</b>
T	$\tau$	Tau	<b>T</b>
Υ	$\upsilon$	Upsilon	<b>U</b>
Φ	$\phi$	Fi	<b>F</b>
X	$\chi$	Qui	<b>C</b>
Ψ	$\psi$	Psi	<b>Y</b>
Ω	$\omega$	Ômega	<b>W</b>

### Algumas unidades úteis

**1 ft<sup>3</sup>=28,316 litros**  
**1 ft= 0,3049m**  
**1m= 3,28084 ft**  
**1 psi= 1 lb/in<sup>2</sup>**  
**1 psi=6894,24 Pa**  
**1Pa= 0,000145 psi**  
**1 Pa= 1 N/m<sup>2</sup>**  
**1 in= 2,54cm**  
**1cm= 0,393701in**  
**1 gal= 3,784 litros**  
**1 litro= 1000cm<sup>3</sup>**  
**1 L/s= 15,83782 gpm**  
**1m<sup>3</sup>=35,31467 ft<sup>3</sup>**  
**1 gpm= 0,00223 ft<sup>3</sup>/s=0,06314 L/s**  
**1 Mpa= 100 mca=10 kg/cm<sup>2</sup>**  
**1psi= 0,00689424 MPa=0,6894 mca**  
**1 psi= 0,070307 kg/cm<sup>2</sup>**  
**1psi= 0,7032 mca**  
**1 kg/cm<sup>2</sup>= 14,232 lb/in<sup>2</sup>= 14,223 psi**  
**1 CV= 736 w**  
**1 HP= 745 w**

## Capítulo 1- Método de Hardy Cross para redes de água

### 1.1 Introdução

Vamos recordar alguns conceitos importantes na distribuição de rede de água potável.

#### Densidade ou massa específica $\rho$

É a relação entre a massa de determinado volume do corpo considerado e a massa de igual volume de água considerado. É representada usualmente pela letra grega  $\rho$  com pronuncia: ro. A água doce a 20°C tem valor  $\rho = 9,998,2 \text{ kg/m}^3$ , mas na prática se usa  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ .

#### Peso específico $\gamma$

O peso específico é representada pela letra grega  $\gamma$  que se pronuncia: gama.

$$\gamma = g \times \rho$$

$$\gamma = 9,81 \times 1000 = 9810 \text{ N/m}^3$$

O valor correto seria  $\gamma = 9792,34 \text{ N/m}^3$ .

#### Viscosidade cinemática $\nu$

A viscosidade cinemática da água a 20°C tem a letra grega  $\nu$  e se pronuncia: ni.

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

#### Equação da continuidade

Baseada nas leis de Newton de conservação de massa, energia e de movimento temos:

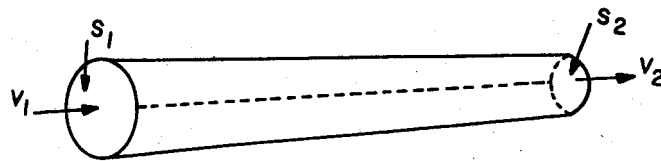
$$Q = A \times V$$

Sendo:

Q= vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

A= área molhada da seção ( $\text{m}^2$ )

V= velocidade media da água na seção ( $\text{m/s}$ )



**Figura 1.1- Equação da continuidade**

Fonte: Lucarelli et al, 1974

Em duas seções 1 e 2 do mesmo tubo se pode escrever:

$$A_1 \times V_1 = A_2 \times V_2$$

#### Exemplo 1.1

Dado um tubo em que a seção 1 tem diâmetro de 0,15m e a seção de saída 2 tem diâmetro de 0,30 e por onde passa a vazão de 0,20 $\text{m}^3/\text{s}$ . Calcular a velocidade da água no ponto 1 e 2.

$$A_1 = \text{PI} \times D_1^2 / 4 = 3,1416 \times 0,15^2 / 4 = 0,01767 \text{ m}^2$$

$$A_2 = \text{PI} \times D_2^2 / 4 = 3,1416 \times 0,30^2 / 4 = 0,0314 \text{ m}^2$$

$$Q=Q_1=Q_2=0,20\text{m}^3/\text{s}$$

$$V_1= Q_1/ A_1= 0,20\text{m}^3/\text{s}/ 0,01767\text{m}^2= 11,3 \text{ m/s}$$

$$V_2= Q_2/ A_2= 0,20\text{m}^3/\text{s} / 0,0314\text{m}^2= 6,4\text{m/s}$$

**Exemplo 1.2**

Seja um nó onde entra  $Q_1=0,034\text{m}^3/\text{s}$  e  $Q_2=0,0246\text{m}^3$ . Sai do nó  $Q_3=0,0269\text{m}^3/\text{s}$ . Qual a vazão no nó  $Q_4$ ?

No nó a somatória das vazões que entram e que saem é igual a zero, considerando um sinal negativo para a saída. Consideramos o líquido incompressível.

$$\Sigma Q_i=0$$

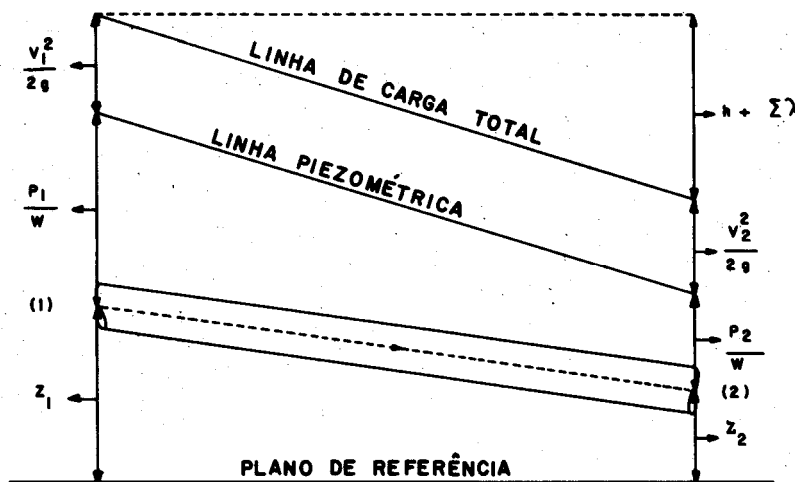
$$Q_1+Q_2-Q_3-Q_4=0$$

$$0,0246+0,034-0,0269-Q_4=0$$

$$Q_4=0,0317\text{m}^3/\text{s}$$

**Equação de Bernouilli**

A equação fundamental da hidráulica é a de Bernouilli que foi deduzida através das Leis de Newton.



**Figura 1.2- Teorema de Bernouilli**

Fonte: Lucarelli et al, 1974

Num determinado trecho de tubulação baseado num nível de referencia vale o seguinte:

$$Z_1+ p_1/\gamma + V_1^2/2g= Z_2 + p_2/\gamma + V_2^2/ 2g + h_L$$

Sendo:

$Z$ = energia de posição que é a cota (m)

$p/\gamma$  = energia de pressão (m)

$V^2/ 2g$ = energia cinética

$h_L$ = perda de energia (m) distribuida e localizada.

**Linha Piezométrica=  $Z + p/\gamma$**

**Linha de energia=linha de carga total=  $Z + p/\gamma + V^2/ 2g$**

## 1.2 Análise de rede de água

Os estudos de vazão, pressão e transientes hidráulicos em redes de água é denominado de análise.

As redes malhadas começaram a ser calculadas a partir de 1936 com os estudos de Hardy Cross. Nota: Hardy Cross nasceu em Virginia, USA em 1885 e morreu em 1959.

- Em 1940 McElroy usou método analógico, com fios elétricos, resistências para simular uma rede de água.
- Em 1950 surgiram os grandes computadores (*mainframe*) e foram feitos alguns cálculos de rede malhada neles (cidade de Dalas no Texas).
- Em 1965 Shamir-Howard desenvolveu o método de Newton-Raphson. Em 1969 o mesmo método foi desenvolvido por Epp-Fowler.
- Em 1970 Wood fez um programa na Universidade de Utah.
- Em 1978 Jepson desenvolveu o famoso Método da Teoria Linear.
- Em 1985 Gessler e Walski desenvolveram o conhecido programa WADISO para o Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos nos anos 1983 a 1987 usando o método de Hardy-Cross com método dos nós.

Posteriormente usou-se a **minimização dos custos (otimização)** nos cálculos. Assim temos a programação linear, programação dinâmica com o uso ou não de **algoritmo genético**.

Vamos nos ater ao **Método de Hardy-Cross**, que com algumas alterações possibilita calcular problemas complicados de redes de água com reservatórios, bombas, boosters, etc.

## 1.3 Método de Hardy Cross

Existem vários métodos para resolver problemas de análise de redes malhadas e o método mais antigo é o atribuído a Hardy Cross que ainda é utilizado.

Era um método bastante prático de ser usado, quando não se dispunham de computadores. Um dos defeitos do método de Hardy Cross é a convergência vagarosa, principalmente quando há bombas ou e boosters.

Todos conhecem o método da correção das vazões que é o método dos Loops de Hardy Cross em 1936, mas esquecem que foram criado dois métodos de cálculos:

➤ método da correção das vazões nos Loops  $\Delta Q$

➤ método da correção ds pressões nos Nós.  $\Delta H$

O método mais conhecido é o método das correções das vazões  $\Delta Q$  nos loops.

O método dos nós pode ser visto em Fair, et al, 1966, Stephenson, 1984 e Waslki et al, 1990

Por curiosidade o programa em fortran Wadiso tem 140 folhas em papel A4 e usa unidades inglesas.

Usei no SAAE o programa Wadiso em várias áreas setorizadas e consegui achar grandes vazamentos conferindo-se as pressões ao longo das malhas. O programa é muito bom com o inconveniente das unidades inglesas. Não consegui o compilador adequado para o programa, pois assim poderia mudar as unidades para as do sistema internacional (SI).

Atualmente existe o programa como o da *Haestad Method* que é muito usado chamado *WaterCAD* (*water distribution modeling and design*) que foi feito por Thomas Walski.

Existe ainda o programa EPANET 2.0 feito pela USEPA que é gratuito e que tem manual em português traduzido pelo LNEC de Portugal em março de 2002.



Podemos ter as unidades inglesas e do sistema internacional (SI).

Numa rede de condutos devem ser satisfeitas basicamente três condições:

**a) Lei das Malhas**

A soma algébrica das quedas de pressão ao longo de cada circuito deve ser nula.

$$\Sigma hf=0$$

**b) Lei dos Nós**

A vazão que chega a um nó deve ser igual à vazão que sai.

$$\Sigma Q=0$$

**c) Lei de Resistência**

A equação de Darcy-Weisbach ou a fórmula de Hazen-Willians possuem uma relação específica entre perda de carga e vazão para cada conduto.

$$hf= r Q^n$$

Sendo:

r= uma função de diâmetro (D) e chamada na prática de resistência,

L=comprimento (m)

C=Coefficiente de Hazen-Willians

f = coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach.

n=2 para fórmula de Darcy-Weisbach e n=1,85 para fórmula de Hazen-Willians.

Para a fórmula de Hazen-Willians a resistência r pode ser calculada da seguinte maneira:

$$hf= r \cdot Q^{1,85}$$

onde

$$r= \frac{10,643 \cdot L}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} \quad (\text{unidades S.I.- Sistema Internacional})$$

L= comprimento (m);

C= coeficiente de rugosidade de Hazen-Willians;

D= diâmetro (m)

r= resistência

hf= perda de carga (m)

Para a fórmula de **Darcy-Weisbach**, o valor da resistência r é dado pela fórmula:

$$hf= r \cdot Q^2$$

$$r= \frac{8 \cdot f \cdot L}{g \cdot D^5 \cdot \pi^2} \quad (\text{Unidades S.I.})$$

Sendo:

r= resistência;

f= coeficiente de atrito (adimensional);

L= comprimento (m);

g= aceleração da gravidade= 9,8 m/s<sup>2</sup>;

D= diâmetro (m).

hf= perda de carga (m)

### 1.4 Série de Taylor

Uma fórmula importante e fantástica na matemática é a série de Taylor que tem a seguinte apresentação:

$$f(x) = f(a) + f'(a) \cdot (x - a) + \frac{f''(a) \cdot (x - a)^2}{2!} + \dots$$

Sendo:

$f(x)$  a função

$f(a)$  o valor da função no ponto  $a$

$f'(a)$  : derivada de  $f(x)$  com o valor de  $a$

$f''(a)$  : derivada segunda de  $f(x)$  com o valor de  $a$

**Dica: o método de Hardy Cross é simplesmente a aplicação da série de Taylor usando somente a primeira derivada.**

$$f(x) = f(a) + f'(a) \cdot (x - a) + \frac{f''(a) \cdot (x - a)^2}{2!} + \dots$$

$$f(x) = f(a) + f'(a) \cdot (x - a)$$

$$\Delta Q = (x - a)$$

$$f(x) = f(a) + f'(a) \cdot \Delta Q$$

Se  $f(x) = 0$

$$\Delta Q = - f(a) / f'(a)$$

### 1.5 Método da correção das vazões nos Loops $\Delta Q$

O método de Hardy Cross admite vazões em cada conduto de modo que a equação da continuidade ( $Q = V \times A$ ) seja satisfeita em todos os nós. Calcula-se uma correção na vazão em cada malha em seqüência até que se consiga um equilíbrio entre as malhas.

Para um tubo qualquer no qual se admite a vazão inicial  $Q_0$ ,

$$Q = Q_0 + \Delta Q \quad (1)$$

onde  $Q$  é a vazão correta e  $\Delta Q$  é a correção. Então, para cada conduto teremos:

$$h_f = rQ^n = r(Q_0 + \Delta Q)^n = r(Q_0^n + n Q_0^{n-1} \Delta Q + \dots)$$

Se  $\Delta Q$  é pequeno em relação a  $Q_0$ , todos os termos da série após o segundo podem ser desprezados. Basicamente é aplicação da fórmula de Taylor.

Para uma malha teremos:

$$\sum h_f = \sum rQ|Q|^{n-1} = \sum r Q_0|Q_0|^{n-1} + \Delta Q \sum r n |Q_0|^{n-1} = 0$$

onde  $\Delta Q$  foi posto fora do sinal de somatória porque é o mesmo para todos os condutos da malha e o sinal de módulo foi usado para levar em conta o sentido de percurso do circuito.

A última equação é resolvida em  $\Delta Q$  para cada malha da rede:

$$\Delta Q = - \frac{\sum r Q_0|Q_0|^{n-1}}{\sum r n |Q_0|^{n-1}} \quad (2)$$

Quando  $\Delta Q$  é aplicado a cada tubo de uma malha, de acordo com a equação (1), o sentido do percurso é importante, isto é, soma-se  $\Delta Q$  às vazões no sentido horário e subtrai-se das vazões no sentido anti-horário.

A seqüência para um procedimento de cálculo aritmético pode ser relacionada nos seguintes itens:

1. Admite-se que a melhor distribuição de vazões que satisfaça a continuidade pelo exame cuidadoso da rede.

2. Para cada conduto de uma malha, calcular a perda de carga e forma a soma

$$\Sigma hf = \Sigma r Q^n$$

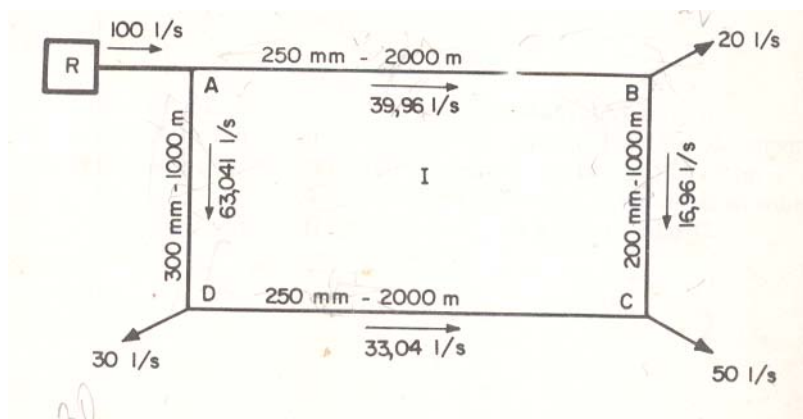
Calcular também  $\Sigma r n | Q |^{n-1}$  para a malha. O quociente indicado na equação (2) fornece a correção que é então somada algebricamente a cada uma das vazões da malha para corrigi-las.

3. Passar para outra malha e repetir o processo de correção do número 2. Continuar para todas as malhas.

4. Repetir os passos 2 e 3 quantas vezes for necessário até que as correções  $\Delta Q$ 's se tornem arbitrariamente pequenas.

### Exemplo 1.3

Vamos dar um exemplo conforme Cetesb, 1975 e Silvestre, 1979 conforme Figura (1.3). Os anéis possuem diâmetro de 200mm a 300mm com comprimento que variam de 1000m e 2000m. Em três nós existem a demanda de 20 L/s a 50L/s. Usar a fórmula de Hazen-Willians com  $C=100$ .



**Figura 1.3-** Esquema da rede de água a ser calculada pelo método de Hardy Cross

**Tabela 1.1- Planilha de cálculo do método de Hardy-Cross pelo método dos loops numa malha simples.**

Trecho	D (mm)	L (m)	Qo (L/s)	Jo (m/km)	ho (m)	ho/Qo	ΔQo (L/s)	QI (L/s)	JI (m/km)	hI (m)	hI/QI	ΔQI (L/s)	Q2 (L/s)
Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Col. 8	Col. 9	Col. 10	Col. 11	Col. 12	Col. 13	Col. 14
A-B	250	2000	40	+4,7	9,4	0,235	-2,96	37,04	4,1	8,2	0,221	-0,165	36,87
B-C	200	1000	20	+3,8	3,8	0,190	-2,96	17,04	2,9	2,9	0,170	-0,165	16,87
D-C	250	2000	-30	-2,8	-5,5	0,183	-2,96	-32,96	-3,2	-6,4	0,194	-0,165	-33,13
D-A	300	1000	-60	-4,0	-4,0	0,067	-2,96	-	-4,5	-4,5	0,071	-0,165	-63,13
					+3,7	0,675				+0,2	0,656		
ΔQo= - 3,7/ (1,85 x 0,675)= -2,96							ΔQI= - 0,2/ (1,85 x 0,656)= -0,165						

Na Tabela (1.1) temos 14 colunas.

Coluna 1= trechos da rede

Coluna 2= diâmetro das tubulações (mm)

Coluna 3= comprimento das tubulações (m)

Coluna 4=Qo= inicialização das vazões nos tramos, sendo sentido horário positivo e antihorário negativo (L/s)

Coluna 5= Cálculo da perda de carga em m/Km de cada trecho. Assim no trecho AB teremos perda de carga total de 4,7m.

Para os outros tramos procede-se assim:

Para a fórmula de Hazen-Willians a resistência r pode ser calculada da seguinte maneira:

$$hf = r \cdot Q^{1,85}$$

onde

$$10,643 \cdot L$$

$$r = \frac{10,643 \cdot L}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}}$$

Para o tubo A-B teremos:

$$10,643 \cdot L$$

$$r = \frac{10,643 \cdot L}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}}$$

$$R_{AB} = (10,643 \times 2000) / (100^{1,85} \times 0,25^{4,87}) = 3631,8$$

$$H_o = R_{AB} \times Q^{1,85} = 3631,8 \times 0,040^{1,85} = 9,4m$$

**Tabela 1.2- Cálculo da perda de carga em cada tramo usando Hazen-Willians**

Trecho	D (mm)	L (m)	Qo (L/s)	r	Ho	Jo (m/km)
A-B	250	2000	40	3631,8	9,4	4,7
B-C	200	1000	20	5383,3	3,9	3,8
D-C	250	2000	-30	3631,8	5,5	-2,8
D-A	300	1000	-60	747,3	4,1	-4

Coluna 6= perda de carga total já calculado no item anterior. Observar que no final da coluna 6 temos a somatória com sinal dos valores ho que é de +3,7m.

Coluna 7= dividimos a perda de carga total no trecho pela vazão em L/s e somamos todos os valores dando a soma igual a 0,675.

Coluna 8= Calcula-se o valor ΔQo= - 3,7/ (1,85 x 0,675)= -2,96. O valor -2,96 L/s será a correção a ser feita em cada trecho.

Coluna 9= é a soma da coluna 4 com a coluna das correções, isto é, a coluna 8. Assim para a primeira linha teremos: 40 L/s -2,96= 37,04 L/s e assim por diante.

Coluna 10= calcula-se para as novas vazões, as novas perdas de cargas. Somam-se os valores das perdas de cargas com sinal e resulta +0,2;

Coluna 11= perda de carga no trecho (m)

Coluna 12=repete-se o que já foi feito na coluna 7, só que com novos valores. A somatória dos h1/Q serão iguais a 0,656

Coluna 13= obtem-se a correção nas vazões  $\Delta Q_1 = -0,2 / (1,85 \times 0,656) = 0,165$

Coluna 14= soma-se a correção -0,165 com 37,04= 36,87 L/s e assim por diante.

### 1.6 Newton-Raphson

Streeter, 1982 mostra como achar a solução de uma equação diferencial usando o método de Newton-Raphson.

Seja um função  $y = F(x)$  com  $x=x_0$  um valor aproximado da raiz.

A raiz  $x=B$  e teremos  $F(x)=0$ . O método é assim:

$$F'(x_0) = F(x_0) / (x_0 - x_1)$$

$$x_1 = x_0 - F(x_0) / F'(x_0)$$

$F'(x_0)$ = derivada da função no ponto  $x_0$ .

Streeter, 1982 muito habilmente para o caso de um **pseudo loop** faz:

$$hf = r \times Q^n$$

Um valor  $\Delta Q$  será:

$$F(x_0) = Q^n$$

$$F'(x_0) = n \times Q^{(n-1)}$$

$$x_1 = x_0 - F(x_0) / F'(x_0)$$

$$\Delta Q = -Q^n / n \times Q^{(n-1)}$$

Para o caso de uma bomba, Streeter, 1982 usa a equação da bomba H no terceiro grau.

$$H = A_0 + A_1 x Q + A_2 x Q^2 + A_3 x Q^3$$

A derivada de H em função de Q será uma perda de carga com sinal negativo  $\Delta Q = \text{Diferença de altura dos reservatórios na malha} - (A_0 + A_1 x Q + A_2 x Q^2 + A_3 x Q^3) / -(0 + 2Q A_2 + 2x A_3 x Q^2)$

Para maiores detalhes deverá ser consultado o livro do Streeter, 1982.

Vamos explicar com mais detalhes a grande vantagem de usar Newton-Raphson para o uso de bombas.

Primeiramente conforme Streeter, 1982 para um trecho 8 da Figura (1.2) onde está inserida uma bomba com a equação do terceiro grau.

$$H = A_0 + A_1 x Q_8 + A_2 x Q_8^2 + A_3 x Q_8^3$$

Usando o conceito de Newton-Raphson teremos que fazer:

$$\Delta Q = -\text{Função} / \text{derivada da função} = -Q^n / n \times Q^{(n-1)}$$

A derivada da função da bomba H será:

$$dH / dQ = A_1 + 2A_2 x Q_8 + 3A_3 x Q_8^2$$

Na correção da vazão conforme Figura (1.2) acrescenta-se a bomba ficando assim

$$\Delta Q_4 = - \{ 135 - 117 - (A_0 + A_1 x Q_8 + A_2 x Q_8^2 + A_3 x Q_8^3) + r_5 Q_5 \text{ ABS}(Q_5)^{n-1} \} / \{ n \cdot r_5 \text{ abs}(Q_5)^{n-1} - [A_1 + 2A_2 x Q_8 + 3A_3 x Q_8^2] \}$$

Sendo:

135= cota do reservatório

117= cota do reservatório no sentido horário

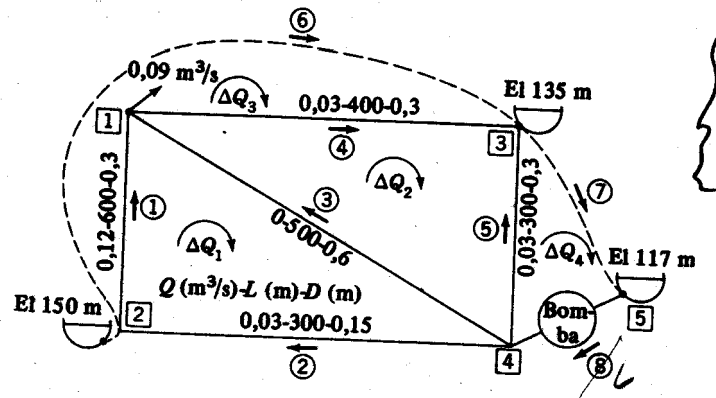


Figura 1.4- Esquema de bombas e falsos loops. Fonte: Streeter, 1982.

**Pseudo loop**

Streeter, 1982 usa o chamado pseudo-anel, como por exemplo o  $\Delta Q_3$  da Figura (1.4) que será.

$$\Delta Q_3 = - \{ 150 - 135 - r_4 Q_4 \text{ abs}(Q_4)^{n-1} - r_1 Q_1 x \text{ abs}(Q_1)^{n-1} \} / \{ nr_4 \text{ abs}(Q_4)^{n-1} + nr_1 \text{ abs}(Q_1)^{n-1} \}$$

### 1.7 Método de correção nas pressões

O método da correção das pressões  $\Delta H$  não é muito conhecido e o conceito é semelhante ao método das correções das vazões.

No método das correções das vazões precisamos de uma inicialização com as vazões em cada trecho e no método de correção das pressões também precisamos de uma inicialização com as pressões em cada nó a não ser que tenhamos um ponto com cota prefixada como um reservatório.

Dada então as pressões calculamos as vazões em cada trecho de tubulação e depois fazemos uma correção  $\Delta H$ .

$$\Delta H = - \frac{n \sum Q}{\sum (Q/H)}$$

As vazões e as perdas de cargas são consideradas positivas quando entram no nó e quando saem são negativas. As entradas são positivas e as saídas negativas. Em cada nó.

O cálculo é feito por iterações até que a diferença de pressão entre o início e o fim de um tubo será zero com certo erro admitido de precisão.

#### Exemplo 1.4

Dada a Figura (1.5) calcular as redes malhadas pelo método das correções das pressões.

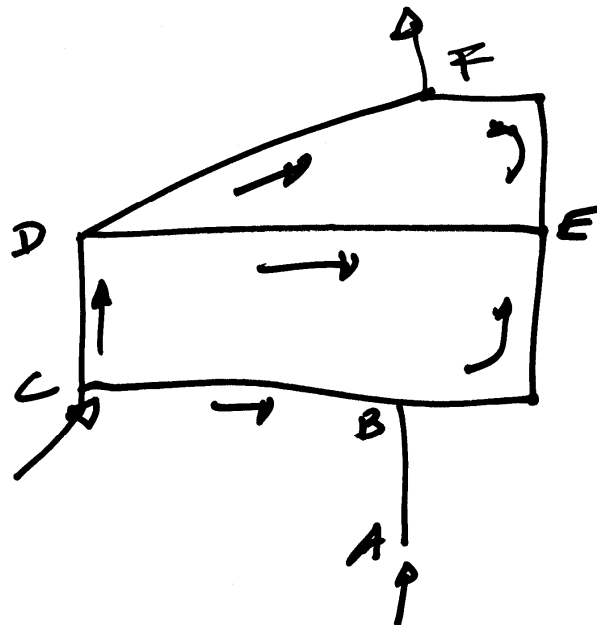


Figura 1.5- Esquema das redes malhadas.

Usaremos o método de Fair et al, 1966 usando as unidades SI.

São dados os comprimentos, os valores de C de Hazen-Willians e o diâmetro da tubulação. Arbitra-se os valores da perda de carga em cada tubulação e obtem-se os valores das vazões e da nova perda de carga e depois se recalcula tudo novamente até chegar a uma precisão desejada.

Dado Ho e o comprimento obtemos  $so = Ho / \text{comprimento (m/m)}$

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

Sendo:

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

Q= vazão em m<sup>3</sup>/s;

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

D= diâmetro em metros.

Obtemos:  $Q_0 = (C^{1,85} \cdot D^{4,87} \cdot J / 10,643)^{(1/1,85)}$

Observar que num determinado trecho a pressão no nó 1 menos a pressão no nó 2 é:  $hf = (H1 - H2)$

São feitas varias iterações.

**Tabela 1.3- Método das correções das pressões de Hardy-Cross**

No	Tubulação	Comprimento (m)	Diâmetro (m)	C	Entrada		Primeiro		Correção	H1
					Ho (m)	so (por 1000)	Qo (m3/s)	Qo/Ho		
B	AB	150	0,305	120	9	0,060000	0,32	0,036	-10,94	-1,94
	BE	300	0,305	120	-15	0,050000	-0,29	-0,019	-10,94	30
	CB	540	0,254	100	15	0,027778	0,11	0,007	-10,94	4,06
					0		0,14	0,023		
					0		-10,94			
					0					
D	CD	180	0,305	120	12	0,066667	0,34	0,028	-6,92	5,08
	DE	660	0,254	100	-18	0,027273	-0,11	-0,006	-6,92	30
	DF	540	0,254	100	-33	0,061111	-0,17	-0,005	-6,92	-39,92
					0		0,06	0,017		
					0		-6,92			
					0					
E	BE	300	0,305	120	15	0,050000	0,29	0,019	-30,00	10,94
	DE	660	0,254	100	18	0,027273	0,11	0,006	-30,00	6,92
	EF	270	0,254	100	-15	0,055556	-0,16	-0,011	-30,00	-45,00
							0,24	0,015		
							-30,00			

**Tabela 1.4- Método das correções das pressões de Hardy-Cross**



							Segundo					
No	Tubulação	Comprimento	Diametro	C	Ho	so	Qo	Qo/Ho	ho	Correção	H1	
		(m)	(m)		(m)	(por 1000)	(m3/s)		(m)		(m)	
<b>B</b>	<b>AB</b>	150	0,305	<b>120</b>	-1,9	<b>0,012941</b>	0,14	0,072	<b>-1,86</b>		<b>-3,80</b>	
	<b>BE</b>	300	0,305	<b>120</b>	4,1	<b>0,013530</b>	-0,14	-0,035	<b>-1,86</b>	-4,17	<b>-1,97</b>	
	<b>CB</b>	540	0,254	<b>100</b>	4,1	<b>0,007516</b>	0,05	0,013	<b>-1,86</b>		<b>2,20</b>	
							<b>0,05</b>	<b>0,050</b>				
							-1,86					
<b>D</b>	<b>CD</b>	180	0,305	<b>120</b>	5,1	<b>0,028206</b>	0,21	0,042	<b>1,83</b>		<b>6,91</b>	
	<b>DE</b>	660	0,254	<b>100</b>	5,1	<b>0,007693</b>	-0,05	-0,011	<b>1,83</b>	-4,17	<b>2,74</b>	
	<b>DF</b>	540	0,254	<b>100</b>	-39,9	<b>0,073931</b>	-0,18	-0,005	<b>1,83</b>		<b>-38,09</b>	
							<b>-0,03</b>	<b>0,027</b>				
							1,83					
<b>E</b>	<b>BE</b>	300	0,305	<b>120</b>	-4,1	<b>0,013534</b>	0,14	0,035	<b>4,17</b>	1,86	<b>1,97</b>	
	<b>DE</b>	660	0,254	<b>100</b>	-5,1	<b>0,007697</b>	0,05	0,011	<b>4,17</b>	-1,83	<b>-2,74</b>	
	<b>EF</b>	270	0,254	<b>100</b>	-45,0	<b>0,166668</b>	-0,29	-0,006	<b>4,17</b>		<b>-40,83</b>	
							-0,09	<b>0,040</b>				
							4,17					

**Tabela 1.5- Método das correções das pressões de Hardy-Cross**

							terceiro					
No	Tubulação	Comprimento	Diametro	C	Ho	so	Qo	Qo/Ho	ho	Correção	H1	
		(m)	(m)		(m)	(por 1000)	(m3/s)		(m)		(m)	
<b>B</b>	<b>AB</b>	150	0,305	<b>120</b>	-2,0	<b>0,013163</b>	0,14	0,071	<b>-1,93</b>		<b>-3,91</b>	
	<b>BE</b>	300	0,305	<b>120</b>	4,1	<b>0,013530</b>	-0,14	-0,035	<b>-1,93</b>	-4,17	<b>-2,04</b>	
	<b>CB</b>	540	0,254	<b>100</b>	4,1	<b>0,007516</b>	0,05	0,013	<b>-1,93</b>		<b>2,13</b>	
							<b>0,05</b>	<b>0,049</b>				
							-1,93					
<b>D</b>	<b>CD</b>	180	0,305	<b>120</b>	5,1	<b>0,028206</b>	0,21	0,042	<b>1,83</b>		<b>6,91</b>	
	<b>DE</b>	660	0,254	<b>100</b>	5,1	<b>0,007693</b>	-0,05	-0,011	<b>1,83</b>	-4,17	<b>2,74</b>	
	<b>DF</b>	540	0,254	<b>100</b>	-39,9	<b>0,073931</b>	-0,18	-0,005	<b>1,83</b>		<b>-38,09</b>	
							<b>-0,03</b>	<b>0,027</b>				
							1,83					
<b>E</b>	<b>BE</b>	300	0,305	<b>120</b>	-4,1	<b>0,013534</b>	0,14	0,035	<b>4,17</b>	1,93	<b>2,04</b>	
	<b>DE</b>	660	0,254	<b>100</b>	-5,1	<b>0,007697</b>	0,05	0,011	<b>4,17</b>	-1,83	<b>-2,74</b>	
	<b>EF</b>	270	0,254	<b>100</b>	-45,0	<b>0,166668</b>	-0,29	-0,006	<b>4,17</b>		<b>-40,83</b>	
							-0,09	<b>0,040</b>				
							4,17					

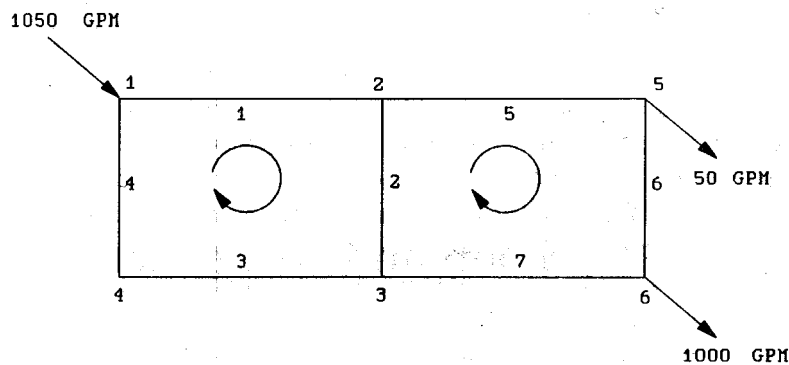
**Tabela 1.6- Método das correções das pressões de Hardy-Cross**

No	Tubulação	Comprimento (m)	Diametro (m)	C	Ho (m)	so (por 1000)	Qo (m3/s)	Qo/Ho	ho (m)	Correção	H1 (m)
							quarto				
B	AB	150	0,305	120	-2,0	0,013628	0,14	0,070	-2,08		-4,12
	BE	300	0,305	120	4,1	0,013530	-0,14	-0,035	-2,08	-4,17	-2,19
	CB	540	0,254	100	4,1	0,007516	0,05	0,013	-2,08		1,98
							0,05	0,048			
							-2,08				
D	CD	180	0,305	120	5,1	0,028206	0,21	0,042	1,83		6,91
	DE	660	0,254	100	5,1	0,007693	-0,05	-0,011	1,83	-4,17	2,74
	DF	540	0,254	100	-39,9	0,073931	-0,18	-0,005	1,83		-38,09
							-0,03	0,027			
							1,83				
E	BE	300	0,305	120	-4,1	0,013534	0,14	0,035	4,17	2,03	2,14
	DE	660	0,254	100	-5,1	0,007697	0,05	0,011	4,17	-1,83	-2,74
	EF	270	0,254	100	-45,0	0,166668	-0,29	-0,006	4,17		-40,83
							-0,09	0,040			
							4,17				

### 1.8 Método de correção nos nós usado por Thomas Walski, 1990

Thomas Walski usou a fórmula de Hazen-Willians no programa Wadiso escrito em Fortran.

O método provém de Hardy Cross feito em 1936 com algumas alterações feitas por Thomas Walski que ainda hoje é usado em inúmeros softwares no mundo.



**Figura 1.6- Esquema de Thomas Walski**

Walski justifica o uso da fórmula de Hazen-Willians que apesar de não ser teoricamente correta como a de Darcy-Weisbach mas tem a facilidade da escolha dos coeficientes de rugosidade de Hazen-Willians muito mais fácil de se estimar do que a rugosidade em mm dos tubos conforme Darcy-Weisbach.

A perda de carga  $h_i$  por Hazen-Willians é dada por:

$$h_i = c_i \cdot Q_i^{1,85} \quad \text{(Equação 1.1)}$$

Sendo:

hi= perda de carga em metros

Qi = vazão em m<sup>3</sup>/s

ci= características da tubulação i

$$c_i = 10,643 \cdot L_i / [C_i^{1,85} \times D_i^{4,87}] \quad \text{(Equação 1.2)}$$

Sendo:

Li= comprimento da tubulação i em metros

Di=diâmetro da tubulação i em metros

Ci= coeficiente de Hazen-Williams (adimensional)

A Equação (1.1) pode ser linearizada com a devida correção:

$$H_i - H_k = c_i Q_{io}^{1,85} + 1,85 c_i Q_{io}^{0,85} q \quad \text{(Equação 1.3)}$$

Sendo:

Hi e Hk= pressões no início da tubulação i e no fim, com Hi > Hk

Qio= vazão estimada na tubulação i (m<sup>3</sup>/s)

$$\text{Podemos definir ainda: } Q_i = Q_{io} + q \quad \text{(Equação 1.4)}$$

A combinação das Equações (1.3) e (1.4) eliminando-se o valor de q será:

$$Q_i = 0,46 Q_{io} + 0,54 (H_i - H_k) / (c_i Q_{io}^{0,85}) \quad \text{Equação 1.5}$$

Sendo: Hi > Hk e Qio > 0.

Para a Figura (1.6) considerando o nó 2 para servir de exemplo, podemos ter:

$$-0,46 Q_{10} - 0,54 (H_1 - H_2) / (c_1 Q_{10}^{0,85}) + 0,46 Q_{20} + 0,54 (H_2 - H_3) / (c_2 Q_{20}^{0,85}) + 0,46 Q_{50} + 0,54 (H_2 - H_5) / (c_5 Q_{50}^{0,85}) + Q_{d2} = 0 \quad \text{(Equação 1.6)}$$

Onde Qd2 é a quantidade de água que sai do nó número 2. Se a estimativa das vazões estimadas são próximas do valor correto das vazões então teremos:

$$-0,46 Q_{10} + 0,46 Q_{20} + 0,46 Q_{50} + 0,46 Q_{d2} = 0 \quad \text{(Equação 1.7)}$$

Isto permite que simplifiquemos a Equação (1.6) ficando:

$$-0,54 (H_1 - H_2) / (c_1 Q_{10}^{0,85}) + 0,54 (H_2 - H_3) / (c_2 Q_{20}^{0,85}) + 0,54 (H_2 - H_5) / (c_5 Q_{50}^{0,85}) = 0 \quad \text{(Equação 1.8)}$$

$$\begin{aligned} & - (1 / (c_1 Q_{10}^{0,85})) H_1 + (1 / c_1 Q_{10}^{0,85} + 1 / c_2 Q_{20}^{0,85} + 1 / c_5 Q_{50}^{0,85}) H_2 \\ & - (1 / (c_2 Q_{20}^{0,85})) H_3 - (1 / (c_5 Q_{50}^{0,85})) H_5 = -Q_{d2} \end{aligned}$$

Note que a equação está linearizada, pois temos uma matriz de coeficientes H1, H2, H3 e H5 e Qd2 para resolver.

Não há necessidade de estimar os valores de H.

Na primeira iteração fazemos o valor de Q em todos os tramos ser igual a 1cfs (28,3 L/s) onde calcularemos os valores de H e depois com o novo valor de Q obtido continuaremos os cálculos.

Teremos matrizes simétricas, positivas.

$$\begin{bmatrix}
 k_3 + k_4 + k_6 & -k_4 & -k_6 & -k_3 & 0 \\
 -k_4 & k_4 + k_5 & 0 & -k_5 & 0 \\
 -k_6 & 0 & k_2 + k_6 & -k_2 & 0 \\
 -k_3 & -k_5 & -k_2 & k_1 + k_2 + k_3 + k_5 & -k_1 \\
 0 & 0 & 0 & -k_1 & k_1
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 H_1 \\
 H_2 \\
 H_3 \\
 H_4 \\
 H_5
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 Q_1 \\
 Q_2 \\
 Q_3 \\
 Q_4 \\
 Q_5
 \end{bmatrix}$$

**Figura 1.7- Esquema da matriz de Thomas Walski**  
 Fonte: Paulo Mignosa, Universita degli Studi di Parma, Italia

### 1.8 Regras práticas: velocidades limites e perdas de carga na tubulação

Existem vários critérios para velocidades limites conforme Tabela (1.7):

**Tabela 1.7- Diversas fórmulas práticas adotadas em redes de distribuição**

Origem da fórmula	Fórmula adotada
Brasil- Plínio Tomaz	$V=0,80 + 1,50 \cdot D$
Estados Unidos	$V=1,00 + 1,68 \cdot D$
Itália	$V=0,68 + 1,61 \cdot D$
Brasil- Azevedo Neto	$V=0,60 + 1,50 \cdot D$

De modo geral as **velocidades aceitáveis vão até 3,5 m/s**. Acima disto acontece muitos problemas devido que com aumento da velocidade, aumenta as perdas de carga exponencialmente e podemos ter problemas de golpes de aríete.

**Tabela 1.8- Vazão e velocidade em função do diâmetro para pré-dimensionamento  $V=0,8 + 1,5. D$**

<b>Diametro</b>	<b>Area</b>	<b>Velocidade</b>	<b>Vazão</b>
<b>o</b>			
<b>(m)</b>	<b>(m<sup>2</sup>)</b>	<b>(m/s)</b>	<b>(m<sup>3</sup>/s)</b>
0,05	0,001964	0,88	0,0017
0,08	0,004418	0,91	0,0040
0,10	0,007854	0,95	0,0075
0,15	0,017672	1,03	0,0181
0,20	0,031416	1,10	0,0346
0,25	0,049088	1,18	0,0577
0,30	0,070686	1,25	0,0884
0,35	0,096212	1,33	0,1275
0,40	0,125664	1,40	0,1759
0,50	0,196350	1,55	0,3043
0,60	0,282744	1,70	0,4807
0,70	0,384846	1,85	0,7120
0,80	0,502656	2,00	1,0053
0,90	0,636174	2,15	1,3678
1,00	0,785400	2,30	1,8064
1,10	0,950334	2,45	2,3283
1,20	1,130976	2,60	2,9405
1,40	1,539384	2,90	4,4642

### 1.9 ABNT NBR 12218/94

A ABNT NBR 12218/1994 de Projetos de Redes de Distribuição de Água Potável para Abastecimento Público.

A tolerância da vazão: 0,1 L/s e a tolerância nas perdas de carga é de 0,05m.

A norma não prevê o método de cálculo das tubulações, mas sugere que de preferência seja usado a fórmula de Darcy-Weisbach (fórmula universal) considerando o envelhecimento dos tubos. O valor da rugosidade equivalente K para redes novas deverá ser maior que  $K=0,1\text{mm}$  e para redes existentes maior que  $K=0,3\text{mm}$ .

Os hidrantes deverão ter 10L/s para áreas residenciais e 20L/s para áreas comerciais, públicas e industriais.

O hidrante pode ser de coluna ou subterrâneo e o diâmetro do mesmo deverá ser de 100mm para áreas de risco e 75mm para áreas de menor risco.

Em comunidades com vazão total inferior a 50 L/s não são necessários instalar hidrantes sendo necessário somente uma tomada de água para caminhões tanque no reservatório.

Os hidrantes devem ser instalados em tubulações com o diâmetro mínimo de 150mm.

Os hidrantes devem ser separados pela distância máxima de 600m contada ao longo dos eixos das ruas.

Deve ser considerado nos cálculos o funcionamento dos hidrantes apenas um de cada vez.

A velocidade mínima nas canalizações é de 0,6m/s e a máxima de 3,5m/s, tudo isto valendo para as demandas iniciais e finais.

O diâmetro mínimo é de 50mm.

A válvula de descarga para tubos inferior a 100mm deverá ser de 50mm e para tubos superiores a 100mm a descarga deverá ser de 100mm.

As zonas de pressão deverão ter pressão estática máxima de 50mca e mínima de 10mca. Serão aceitos pressões maiores que 50mca e menores que 10mca desde que justificadas.

O consumo de água de consumidores especiais deverão estar incluso nas vazões dos nós.

Será estabelecido um setor de medição da água a cada 25km de tubulação.

Pode haver booster na rede de distribuição, mas não pode haver sucção direta da rede para consumo de água.

Deverá ser previsto manual de operação e manutenção.

A norma estabelece dois tipos principais de condutos: principais e secundários.

A norma não fala de ventosas, mas aconselhamos que as mesmas sejam instaladas nos condutos principais.

### 1.10 Dimensionamento prévio

Para ser feito um dimensionamento prévio, a rede tem que ser suposta que não é malhada, isto é, será uma rede espinha de peixe ou uma rede sem loop. Não há outro processo de dimensionar previamente os diâmetros das tubulações a não ser este.

O interessante é que pesquisas feitas na Alemanha para redes de distribuição de água potável, apontaram como a rede mais econômica a rede em espinha de peixe, devendo ser interligadas as pontas com os diâmetros mínimos para que a água circule.

A melhor solução é alcançada através de inúmeras tentativas de maneira que é suposta a rede espinha de peixe.

Alguns critérios seguem a pressão mínima, isto é, 10 m.c.a. e a pressão máxima de 50 m.c.a..

Não deve ser esquecido de se verificar nos cálculos as vazões para os hidrantes, que são bastante grandes em determinadas situações.

Quando queremos levar em conta a confiabilidade de uma rede de água o problema fica mais difícil ainda, pois até o momento não há um método simples.

De modo geral a melhor rede de água será aquela que atende o **mínimo custo**.

**O melhor processo é o da exaustão, isto é, fazer varias tentativas viáveis tecnicamente e ver em qual delas tem o mínimo custo.**

Portanto, até o presente, os engenheiros tem grande grau de liberdade para dimensionar as suas redes de água.

### 1.11 Reservatórios

Para o dimensionamento de reservatórios de sistema de abastecimento de água apesar de existir diversas formulações, a comumente adotada pelos projetistas é a seguinte:

**Volume mínimo do reservatório= 1/3 do volume do dia de maior consumo**

Existem algumas considerações a serem feitas sobre o volume a estabelecer para o reservatório. Um deste problemas é a confiabilidade. Assim se a água que chega a um reservatório provem de três bombeamentos, há sempre a possibilidade de não haver

energia elétrica por umas 3h e de romper uma tubulação que pode levar o conserto de 8h a 12h principalmente se for no período no noturno.

Conforme o caso deve aumentar o volume para cobrir tais incertezas. Cheguei a ver reservatórios executados para três dias de consumo médio devido a adutora passar em região pantanosa e de difícil acesso de manutenção.

### Exercício 1.5

Dimensionar o volume de um reservatório para 67.600hab com quota per capita de 200 litros/habitantexdia e coeficiente do dia de maior consumo  $K_1=1,25$

$$\text{Consumo diário no dia de } > \text{ consumo} = 67.600 \times 200 \times 1,25/1000 = 16.900\text{m}^3$$

$$\text{Volume} = 1/3 \text{ de } 16.900\text{m}^3 = 5.633\text{m}^3$$

### 1.12. Aquedutos

O primeiro livro sobre abastecimento de água de uma cidade escrito no mundo é de autoria por um engenheiro militar romano Sextus Julius Frontinus (36dc. a 104 dC) no ano 97 dC que tomou conta do abastecimento de água de Roma durante os anos de 97dC a 104 dC.

Uma outra curiosidade é que Frontinus foi governador da Britania (atual Inglaterra) onde comandou quatro legiões romanas.

O livro descreve todo o abastecimento de Roma de 94 dC quando a população era de 1.200.000 hab. igual a da cidade de Guarulhos no ano 2005.

Frontinus descreve os 10 grandes aquedutos que chegavam à Roma sendo o maior o aqueduto Márcia que demorou 2 anos para ser construído sendo inaugurado em 146 aC tendo 92.566m sendo 81.371m em túneis, 792m construídos sobre o terreno e 792m construído sobre arcos conforme Tabela (1.9).

Uma outra curiosidade é que os aquedutos foram construídos e idealizados por homens e possuíam nome de mulher. Seria o que o psicanalista Carl Gustave Jung chamaria de “*anima*” do homem o que é muito comum.

O aqueduto do Cabuçu em Guarulhos foi executado entre 1905 e 1907 e tinha 16.600m de comprimento com diâmetro de 1,20m e foi feito em concreto armado. Quase todo ele é apoiado no terreno e somente um pequeno trecho junto a chácara do Biondi no Jardim Palmira é que foi feito em túnel. Existem trechos em sifão que os romanos não faziam. A barragem de concreto arco gravidade da represa do Cabuçu é considerada no Brasil a primeira obra grande de concreto feita entre 1905 e 1907.

**Tabela 1.9- Aquedutos romanos**

Aqueduto	Total (m)	Subterrâneo (m)	Apoiado no terreno (m)	Aqueduto em arco (m)	Ano de construção
Aqua Apia	26.361	26.265	909	6	343 aC
Anio Vetus	64.500	64.169	331	0	272 aC
Aqua Márcia	92.566	81.371	792	10.403	146 aC
Tepula					127 aC
Julia	23.140	12.640	792	9.708	35 aC
Aqua Virgo	23.266	21.406	810	1.050	20 aC
Aqua Alsietena	33.258	32.781	0	537	2 aC
Aqua Augusta	1.200	1.200	0	0	33 aC
Aqua Claudia	69.609	54.345	914	14.350	47 dC
Anio Novus	88.050	73-950	3450+914	9.736	47 dC

	421.950	368.067	8.093		109 dC
Aqua Trajana (Frontinus)					109 dC
Aqua Alexandriana					226 dC

### 1.13 Reservatórios domiciliares

No mundo são poucos os países que usam o reservatório domiciliar, mais conhecido como caixa d'água. Nos Estados Unidos e Europa o abastecimento de água potável é contínuo e *direto*, não havendo necessidade de reservatórios domiciliares. No Brasil o sistema de distribuição interna de água fria é *indireto*, isto é, a água entra pelo cavalete e vai até a caixa d'água e de lá se faz a distribuição para toda a casa.

Pesquisa feita na SABESP em 1995, mostrou que **80% das residências em São Paulo possuem caixas d'água.**

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através da norma de "Instalação predial de água fria" NBR 5626/1998 diz que o "*reservatório para uso doméstico deve ter no mínimo o necessário para 24 horas de consumo normal do edifício, sem considerar o volume de combate a incêndio*". Portanto, o reservatório deverá ser suficiente para no mínimo um dia de consumo. Alguns projetistas adotam 2 dias de consumo ou 2,5 dias (*Macyntire*).

Há dois conceitos importantes no dimensionamento do reservatório: o *suprimento* e a *demanda* (consumo).

O *suprimento* significa as condições de vazão, pressão e continuidade ou não dos serviços de abastecimento de água, que estão a disposição. Pelas normas técnicas NBR 12218/1994 "*a pressão na rede pública deve ser de 10 metros de coluna de água (mca) até 50 mca*". Observamos que atualmente as normas não são recomendações e sim obrigatoriedade. A norma permite que a pressão mínima seja um pouco menor e máxima um pouco maior, desde que haja justificativa técnica e econômica.

O *consumo* ou *demanda* é feito por métodos determinísticos ou probabilísticos. Na verdade procuramos dentro das incertezas do futuro as condições de demanda em que o sistema de instalação de água fria será submetido.

O volume de um reservatório deverá atender quatro diferentes funções, tais como *reserva contra falta de água* dos serviços públicos, *compensação* para atender a demanda, água para *ar condicionado* e água para sistema de *combate a incêndio* com rede de hidrantes ou *sprinklers*.

A escolha do tamanho do reservatório deverá ser estudado com todo bom senso. Uma das funções do reservatório que é a falta d'água, deve ser consultado a população local, sendo escolhido rotineiramente um ou dois dias. Uma regra prática bastante usada para o dimensionamento de reservatórios é prever 60% do consumo diário para o reservatório inferior e 40% para o superior.

Os métodos determinísticos e probabilísticos são aplicados somente em casos especiais, devido a não possuímos as curvas de suprimento e as curvas de consumo em função do tempo.

Uma residência de valor médio consome por habitante cerca de 160 litros/dia. Assim uma residência com 5 habitantes, o consumo diário será de 160 litros/dia/hab x 5 hab = 800 litros/dia. Como não existe caixa d'água de 800 litros, adota-se uma superior, ou seja de 1000 litros. Caso o local onde o usuário resida tenha problemas de rodízios



ou frequentes interrupções devido a arrebentamentos na rede, adota-se dois dias ou mais para previsão de consumo. Assim para dois dias sem água da rede pública, teremos que instalar reservatório com 2000 litros ou duas caixas d'água de 1000 litros.

Existem bairros que não precisam de caixas d'água nos prédios. Em Guarulhos o único bairro que não precisa de reservatórios nos prédios é o Parque Cecap, pois, foi feito cálculo especial conforme recomendação do grande engenheiro-arquiteto brasileiro Vilanova Artigas. O mesmo recomendou a instalação de caixa acoplada a bacia sanitária, como medida de economia de água. *“Para que lavar a rede de esgoto sanitário”*, dizia Artigas, *“nós somos um país pobre e temos que economizar água”*.

Atualmente nos depósitos de materiais encontramos de reservatórios domiciliares de diferentes materiais e volumes que vão de 250 litros a 15.000 litros.

Finalmente devemos lembrar que os reservatórios domiciliares são um ponto de *contaminação* e é por isso que os americanos não se utilizam deles. Os reservatórios devem ser limpos e desinfetados com produto clorado no mínimo uma vez por ano.

#### 1.14 Fórmula Universal ou de Darcy Weisbach

A fórmula é a seguinte:

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

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/s<sup>2</sup>;

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 apresentar 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. Swamnee 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 *Swamnee e Jain* é a seguinte:

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

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 Swamnee 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 (1.10) valores de K comuns:

**Tabela 1.10- 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 1.11- 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 1.12- 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 (1.6) 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  $f=0,024$ .

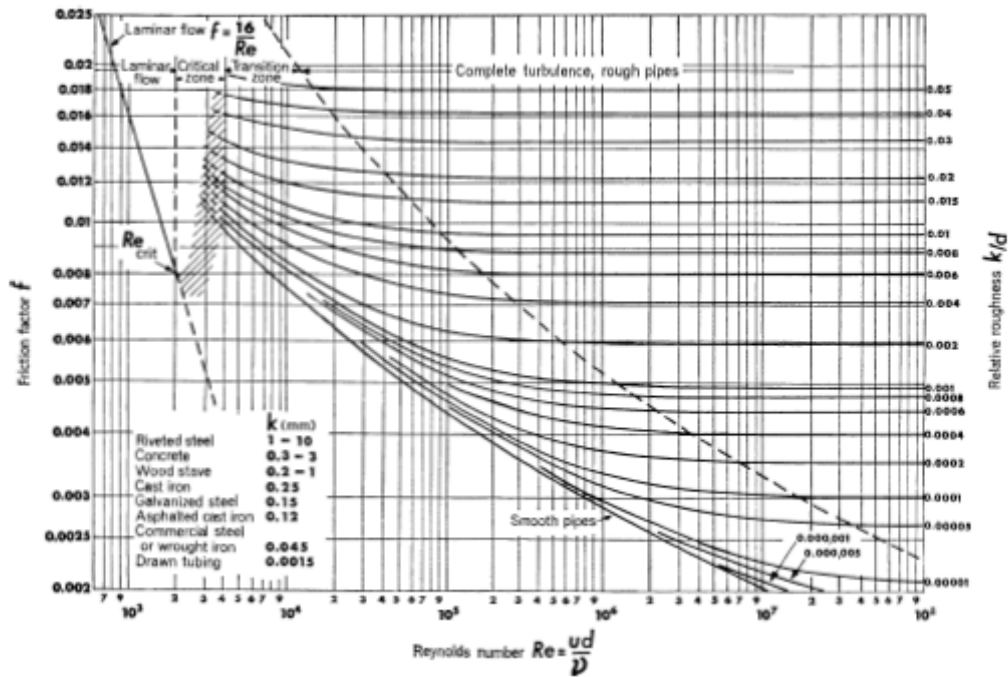


Figura 1.6 Diagrama de Moody

A Tabela (1.13) 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 1.13- Valores do coeficiente K da fórmula de Darcy-Weisbach

Pipe Material	$\epsilon$ , ft	$\epsilon$ , 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

### 1.15 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. 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 m<sup>3</sup>/s;

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

D= diâmetro em metros.

Na Tabela (1.14) estão alguns valores do coeficiente de rugosidade de Hazen Willians

:

**Tabela 1.14- 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 (m<sup>3</sup>/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.

### 1.16 Tubos equivalentes

Uma rede de tubulações inclui tubos em série e tubos em paralelo. Também as curvas, medidores e outros aparelhos, causam um distúrbio local e as perdas localizadas podem então existir em uma tubulação. Tudo isto pode ser combinado ou convertido a um tubo equivalente, para ser usado na rede de tubos a ser analisada.

O conceito de tubo equivalente é útil em simplificar redes de água. Apresentamos aqui um método para achar o tubo equivalente.

Para um tubo genérico vale:

$$h=r \cdot Q^n$$

Sendo:

h=perda de carga

r=resistência

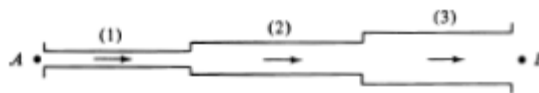
n=coeficiente da fórmula

- n=2 para Darcy-Weisbach e
- n=1,85 para Hazen-Willians

Vamos apresentar as fórmulas básicas usados nos comprimentos equivalentes, isto é, quando podemos substituir um tubo por um outro no diâmetro que nós queremos.

### Tubos em série

Vamos examinar os condutos em série que tem a mesma rugosidade, porém diâmetros diferentes.



**Figura 1.7- Tubos em série**

Para a fórmula para tubos em série de **Hazen-Willians** temos:

$$\frac{L}{D^{4,87}} = \frac{L_1}{D_1^{4,87}} + \frac{L_2}{D_2^{4,87}} + \frac{L_3}{D_3^{4,87}} + \dots \text{ (Hazen-Willians)}$$

Para a fórmula de **Darcy Weisbach** temos:

$$\frac{L}{D^5} = \frac{L_1}{D_1^5} + \frac{L_2}{D_2^5} + \frac{L_3}{D_3^5} + \dots \quad (\text{Darcy Weisbach})$$

**Exercício 1.6**

Calcular o comprimento equivalente L de três tubos em serie cujo diâmetro final seja D=0,35m usando a equação de Darcy-Weisbach

L1= 200m    L2= 250m    L3=300m

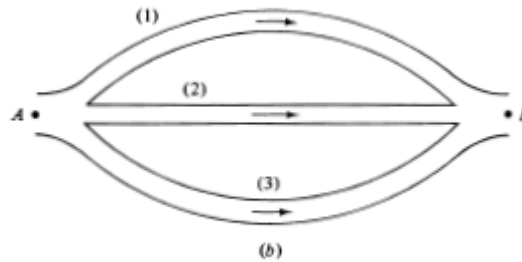
D1=0,30m    D2=0,40m    D3=0,25m

$$\frac{L}{0,35^5} = \frac{200}{0,30^5} + \frac{250}{0,40^5} + \frac{300}{0,25^5}$$

Achamos L= 2173,97m

**Tubos em paralelo**

Vamos examinar tubos em paralelo com diâmetros e comprimentos diferentes, porém, com a mesma rugosidade.



**Figura 1.8- Esquema de redes em paralelo**

Para a fórmula de Hazen-Willians para tubos em paralelo temos:

$$\frac{D^{2,63}}{L^{0,59}} = \frac{D_1^{2,63}}{L_1^{0,59}} + \frac{D_2^{2,63}}{L_2^{0,59}} + \frac{D_3^{2,63}}{L_3^{0,59}} + \dots \quad (\text{Hazen-Willians})$$



**Exemplo 1.7**

Dados:

D1=0,20m D2= 0,25m D3=0,40m

L1= 500m L2= 400m L3=450m

Achar o comprimento do tubo equivalente com D=0,30m usando fórmula de Hazen-Willians.

$$\frac{0,30^{2,63}}{L^{0,59}} = \frac{0,20^{2,63}}{500^{0,59}} + \frac{0,25^{2,63}}{400^{0,59}} + \frac{0,40^{2,63}}{450^{0,59}}$$

Achamos L=65,47m

Para a fórmula de Darcy Weisbach temos:

$$\sqrt{\frac{D^5}{L}} = \sqrt{\frac{D_1^5}{L_1}} + \sqrt{\frac{D_2^5}{L_2}} + \sqrt{\frac{D_3^5}{L_3}} + \dots \text{(Darcy Weisbach)}$$

**1.17 Análise de Sensibilidade**

Os americanos costumam verificar a análise de sensibilidade das redes calculadas. O manual AWWA M32 recomenda para o modelo de redes de distribuição que :

- Aumento da rugosidade C de Hazen-Willians: + 20%
- Diminuição da rugosidade C de Hazez-Willians: - 20%
- Aumento da demanda: 15% a 25%
- Diminuição da demanda: 15% a 25%

Procura-se prever também a localização de demandas grandes de água em diversos locais da rede malhada.

Deverá ser verificada também a capacidade dos reservatórios bem como das bombas centrifugas.

### 1.18 Problemas usuais em adutoras

Cálculo de adutoras de água potável, por gravidade, de condutos de secção 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 1.15- 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 secção.

- 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<sup>3</sup>/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  $V=0.8+1,5x D$ .

**Exercicio 1.8**

**Problema Tipo I**

Tipo de problema	Dados	Obter
<b>I</b>	<b>Q, L, D, v, K</b>	<b>hf</b>

Dados:

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

$D=0,20m$

$L=400m$

$K=0,25mm$

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

$H_f=?$

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

$A=PI \times D^2/4= 3,1416 \times 0,20^2/4=0,0314m^2$

$Q=A \times V$  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 Swamnee e Jain é a seguinte:

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

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

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

**Exercicio 1.9**

Tipo de problema	Dados	Obter
<b>II</b>	<b>hf, L, D, v, K</b>	<b>Q</b>

Dados:

$H_f= 6,00m$

$L=300m$

$D=0,30m$

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

$K= 3mm$

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:

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

**Exercício 1.10**

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

Dados:

Hf= 6,00m

Q=0,123m<sup>3</sup>/s

L=300m

D=0,30m

v= 1,007 x 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s

K= 3mm

Obter D=?

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

$$D=0,66 \times [ 0,003^{1,25} \times (300 \times 0,123^2 / 9,81 \times 6,0)^{4,75} + 1,007 \times 10^{-6} \times 0,0123^{9,4} \times (300/9,81 \times 6,0)^{5,2} ]^{0,04} = 0,30m$$

**1.19 Regras básicas de esqueletização**

Vamos apresentar algumas regras básicas para esqueletização.

a) tubulação de grande diâmetro, como por exemplo, acima de 0,40m deverão fazer parte do modelo adotado;

b) as redes de 150mm e 200mm que abastecem áreas residenciais, e comerciais, são freqüentemente colocadas na esqueletização;

c) tubulações menores que 150mm que tem pouca vazão comparada com outros tubos, não são normalmente incluídas no modelo. A inclusão desta tubulação freqüentemente trás problemas ao modelo adotado. Os casos de áreas isoladas, deverão ser tratados sem a ajuda do modelo.

d) as bombas centrifugas e boosters deverão fazer parte dos modelos. A curva das bombas e boosters são freqüentemente usadas;

e) as bombas podem as vezes entrar no modelo como um reservatório equivalente a altura manométrica;

f) os reservatórios elevado e apoiado, também deverão fazer parte do modelo;

**Calibração do modelo**

Quando se faz um modelo é necessário verificar se o mesmo está de acordo com a realidade. A precisão de um modelo é de 5% a 10%.

Nos Estados Unidos já foram feitos muitos modelos com precisão de 5%.

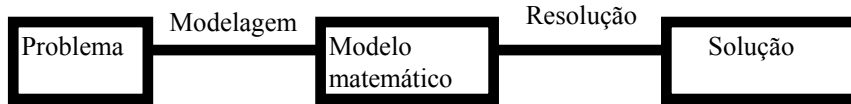
O custo de Calibração de um modelo significa cerca de 10% do custo da rede malhada de água executada.

O modelo pode simular variação de vazões, cargas isoladas etc..

Adotamos aqui o modelo denominado pelos americanos de *Steady-State*, isto é, é escolhida uma situação no caso a pior.

### 1.20 Modelo matemático

A solução de um problema está associado a escolha do modelo matemático que irá ser escolhido, verificando no fim a solução.



**Figura 1.9- Esquema de uma modelagem matemática**

Poderá haver vários erros:

Erro na escolha do modelo matemático:

- vazões concentradas nos nós e não distribuída como é realmente;

Erro de truncamento

- como exemplo o truncamento da serie binomial no método de Hardy Cross.

Erro de arredondamento cometido durante os cálculos

- aritmética de ponto flutuante como por exemplo passar da base decimal para base binária.

- Erros nos dados

- como exemplo, erros nos comprimentos, diâmetros, escolha do C, escolha do K etc.

A solução numérica de uma rede de água (análise) poderão ser facilmente comparadas para grandes redes, onde o problema da quantidade de iterações é importante, devido ao tempo de computador.

Na Tabela (1.16) temos quatro métodos conhecidos sendo o mais antigo o método de Hardy Cross com loops e que é necessário muitas iterações. O método de Newton-Cross que é uma mistura do dois precisa de menos iterações. Este é o método que usaremos neste livro.

O método de Newton-Raphson precisa de bem menos iterações, mas o método da teoria linear é o melhor de todos, pois precisa de pouquíssimas iterações.

**Tabela 1.16- Métodos de cálculos e numero de iterações**

Método de calculo	Ano	Numero de Iterações
Hardy Cross	1936	635
Newton Raphson	1954	24
Newton-Cross	1969	151
Teoria Linear	1972	4

### 1.21 Programa de computador

O programa **Cross.f** foi feito em Fortran 77 GNU. Trata-se do cálculo de redes malhadas ou não, pelo método de Hardy Cross, combinado com a série de Taylor. É previsto reservatórios, bombas ou e boosters, válvulas redutoras de pressão e perdas de carga localizada. O programa básico está no livro de mecânica dos fluidos do Victor L. Streeter e Benjamin Wylie, editora McGraw-Hill, p.454.

O programa é previsto para até 2.000 tramos e 5.000 nós. Podem ser usadas as fórmulas de Hazen-Willians (HW) e Darcy-Weisbach (DW). As unidades podem ser as inglesas (EN), como pés cubico/segundo e pés, como as unidades do Sistema Internacional SI) como o metro cúbico por segundo e metro.

O programa foi adaptado pelo Eng. Plínio Tomaz em 28/03/91.

No resultado, sai as vazões nos tramos com sinal e as cotas piezométricas nos nós.

É necessário entrar com as vazões nos tramos, o que é básico no método de Hardy Cross. É a primeira tentativa.

O programa prevê loops verdadeiros e loops falsos.

Não é necessário calcular previamente a curva da bomba, pois, o programa o faz automaticamente, desde que os pontos sejam espaçados e começando da vazão zero e o numero de pontos deverá ser de 4 (quatro).

Os dados de entrada do programa deverão estar no arquivo texto não documento, denominado cross.dat.

A saída dos dados é na tela ou em arquivo que você determinar fazendo:

**cross.exe > meuarquivo.txt**

O programa pede a unidade que pode ser EN ou SI, o número de tramos, a precisão nas vazões, a viscosidade cinemática que usualmente é  $0,00001007 \text{ m}^2/\text{s}$  e a rugosidade da tubulação.

É pedido também a fórmula da resistência a ser usada **Hazen-Willians (HW)** ou **Darcy Weisbach (DW)**. Pede também o número do tramo, a vazão, o comprimento e o diâmetro da tubulação.

No **pseudo loop PS**, o programa pede o número do tramo ou nó e a diferença de altura de reservatórios de acordo com o sinal.

Para as **bombas (PU)** o programa pede o número do nó da bomba ou boosters, vazão que passa, variação da vazão para curva da bomba e os quatro pontos da curva da bomba a começar pelo primeiro quando  $Q=0$  espaçados conforme a variação de vazão mencionada.

O programa pede também o número de tramos no looping e os referidos tramos nos looping com sinais.

O programa pede também o número do nó e a cota do terreno.

O programa pede também o caminho dos nós e tramos, de modo a atingir todos os nós. Deverá ter sinal quando contrario ao ponteiro dos relógios e positivo no sentido horário. Quando terminar, colocar zero e começar de novo.

Como não está previsto a **válvula redutora de pressão (VPR)**, usei o seguinte artifício e deu certo. Considere a queda de pressão na válvula redutora de pressão, como uma bomba com curva característica da forma de uma reta. Colocamos o sinal positivo.

Quando no looping ou na verificação das cotas colocar o sinal ao contrario do que daria se fosse uma bomba, por exemplo, caso a bomba precisasse do sinal negativo, então teríamos que colocar o sinal positivo.

Para válvula de retenção, deve-se eliminar o tramo e refazer o programa.

O programa também não tem válvulas parcialmente abertas, mas pode ser feito, colocando-se comprimento equivalente.

A perda de carga localizada pode ser transformada em comprimento equivalente.

### 1.22 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/s<sup>2</sup>.

$K_s$ = 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 (1.17).

**Tabela 1.17- 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.



### 1.23 Método das secções

O método das secções é destinado a conferir uma rede malhada e não é destinado ao dimensionamento da rede. O método é extremamente simples e funciona mesmo.

Fair et al, 1966 apresentou o método das secções que tive oportunidade de usar em Guarulhos quando queria conferir o equilíbrio de vazões de uma rede de distribuição bastante complicada conforme Figura (1.10).

O método é o seguinte:

1. Corte a rede numa série de linhas aproximadamente paralelas e espaçadas por igual,
2. Estime a quantidade de água a ser usada além da linha e confira com o número de tubulares e capacidade de cada tubo para ver se eles são suficientes para atender aquela área escolhida.

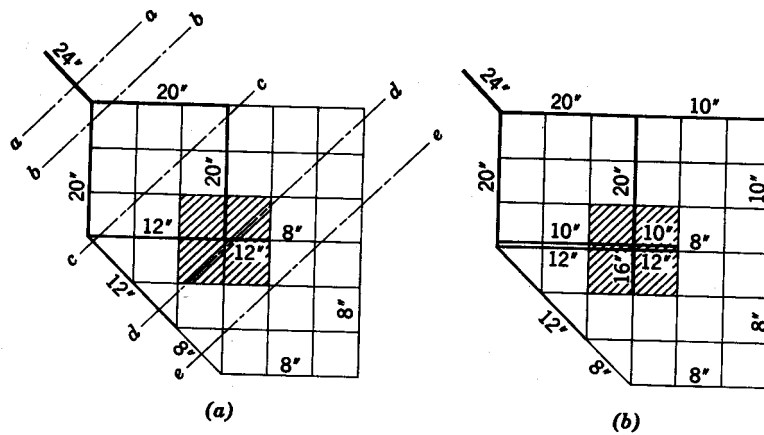


Figura 1.10- Aplicação do método das secções  
Fonte: Fair et al, 1966

### 1.24 Método do seccionamento fictício

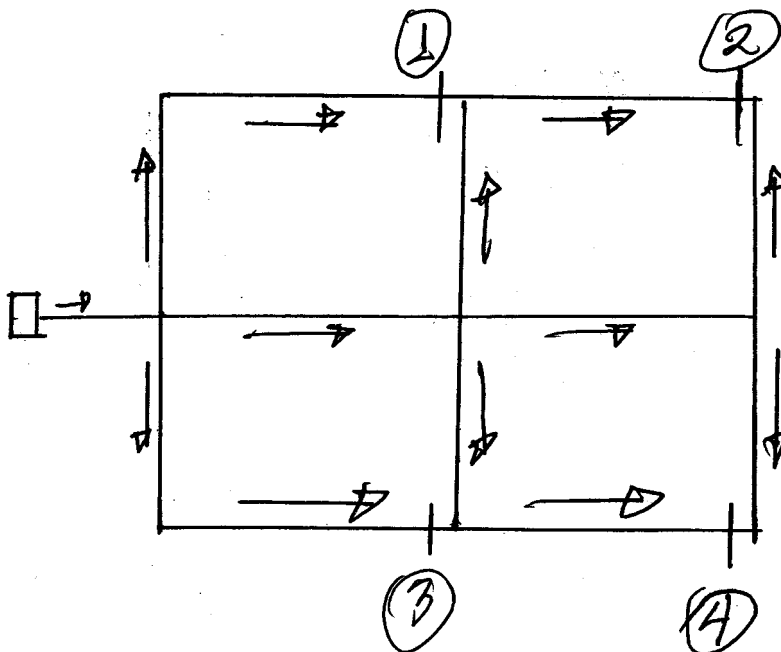
A desvantagem do método das seções fictícias é que só é aplicado para pequenas redes onde se consegue achar uma vazão distribuída por metro linear como por exemplo,  $q_n=0,005 \text{ L/s x m}$ .

Trata-se de uma rede malhada que é seccionada formando redes espinhas de peixe, calculam-se as pressões e vazões e verificam-se os resultados nos locais onde foram feitos os seccionamentos conforme Figura (1.11).

É um método bastante simples, pois pode ser usado facilmente usando planilha Excel da Microsoft.

O método está muito bem explicado no livro Técnica de abastecimento e tratamento de água elaborado em 1967 pela Faculdade de Higiene e Saúde Pública da USP.

Quando há vazões concentradas nos nós como é usual, o método não funciona e daí a sua pouca utilização na prática. Para bombas na rede ou perto de reservatórios o método também não dá para ser aplicado.



**Figura 1.11- Croquis de redes usando método do seccionamento fictício**

#### Exemplo 1.11

Dado a população de 1300hab, quota per capita de 200 L/diaxhab e coeficiente  $K_1=1,20$ ,  $K_2=1,25$  com comprimento total  $L=1080\text{m}$ . Calcular a rede da Figura (1.8).

A vazão específica de distribuição  $q_m$  será:

$$q_m = (1300 \text{ hab} \times 200 \text{ L/hab/dia} \times 1,20 \times 1,50) / (86400 \times 1080) = 0,0050 \text{ L/s x m}$$

Deve ser calculada as pressões vinda de dois lugares nas quatro cortes fictícios da rede malhada e verificar se a diferença não passa de 10%.

No ponto (1) chega a água de dois lugares diferentes causando uma pressão  $P_1$  e outra  $P_2$  de maneira que quando  $(P_1 - P_2) / P_1 < 0,10$  o problema é aceitável. Assim vamos ajustando as vazões até a solução final.

### 1.25 Distância entre condutos principais

Em redes espinhas de peixe ou grelha interessa as vezes calcular a distância L entre as redes conforme Figura (1.12).

#### Exemplo 1.12

Dado anéis de 200mm e redes de PVC com vazão máxima de 3L/s.

$$Q_d = 150 \text{ hab} \times \text{ha} \times 200 \text{ Lxha/dia} \times 1,2 \times 1,5 / 86400 = 0,625 \text{ L/s} \times \text{ha}$$

$$[(L \times d)/2] \times Q_d / 10000 = Q_{\text{max}}$$

$$d = Q_{\text{max}} \times 2 \times 10000 / (L \times Q_d)$$

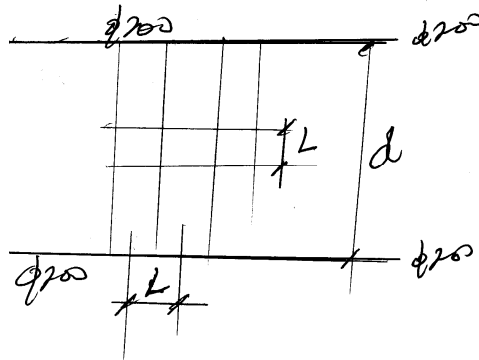


Figura 1.12- Distância d máxima

Sendo:

$$L=100,$$

$$Q_{\text{max}}=3 \text{ L/s}$$

$$Q_d=0,625 \text{ L/sx ha}$$

$$d = (3 \times 2 \times 100000 / (100 \times 0,625)) = 960$$

#### Exemplo 1.13

Qual o comprimento máximo que uma rede de PVC com vazão  $Q_{\text{max}}=3 \text{ L/s}$  pode atingir conforme Figura (1.13).

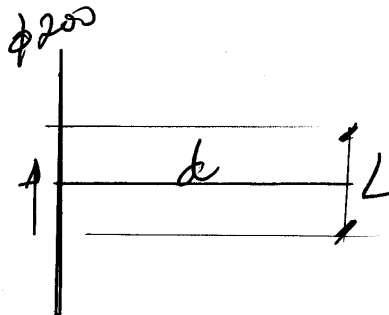


Figura 1.13- Distância d máxima

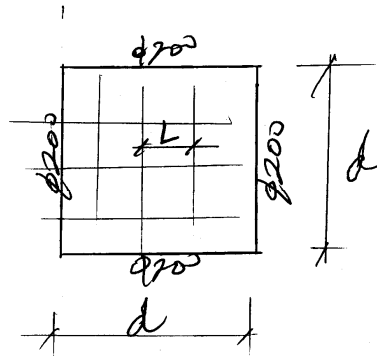
$$d \times L \times Q_d / 10000 = Q_{\text{max}}$$

$$d = Q_{\text{max}} \times 10000 / (Q_d \times L)$$

Sendo  $L=100\text{m}$   
 $Q_d=0,625 \text{ L/sx ha}$   
 $d= Q_{\text{max}} \times 10000 / ( Q_d \times L)$   
 $d= 3 \times 10000 / ( 0,625 \times 100)= 480\text{m}$

**Exemplo 1.14**

Dada uma rede malhada com rede secundaria espaçada de 100m. Queremos saber a máxima distância  $d$  que podemos fazer conforme Figura (1.14).



**Figura 1.14- Distância  $d$  máxima**

$$d \times d \times Q_d / 10000 = ( d/L -1) \times 4 \times Q_{\text{max}}$$

$$d^2 \times Q_d / 10000 = ( d/L -1) \times 4 \times Q_{\text{max}}$$

$L=100\text{m}$

$Q_d= 0,625 \text{ L/sx ha}= 0,000625\text{m}^3/\text{s} \times \text{ha}$

$Q_{\text{max}}= 3 \text{ L/s}= 0,003\text{m}^3/\text{s}$

$$d^2 \times Q_d / 10000 = ( d/L -1) \times 4 \times Q_{\text{max}}$$

$$d^2 \times 0,000625 = ( d/100 -1) \times 4 \times 0,003 \times 10000$$

$$d^2 \times 0,000625 = ( d/100 -1) \times 120$$

$$d^2 \times 0,000625 = 1,2d -120$$

$$d^2 \times 0,000625 = 1,2d -120$$

$$d^2 \times 0,000625 - 1,2d +120=0$$

Temos uma equação do segundo grau por tentativas achamos  $d=1814\text{m}$

### 1.26 Qual fórmula usar: Hazen-Willians ou Darcy-Weisbach?

Em redes malhadas ou espinha de peixe é indiferente usar uma fórmula ou outra e portanto, os especialistas preferem usar a mais simples, isto é, Hazen-Willians.

Uma das causas é a experiência e o uso do coeficiente C. É mais fácil acertar as previsões para o coeficiente C de Hazen-Willians do que para o valor de K para a fórmula de Darcy-Weisbach.

Cheguei a checar em varias redes de água em Guarulhos qual é o coeficiente de Hazen-Willians para tubulação de ferro fundido. Para isto fiz os cálculos de pressões e vazões em todas as redes e simulei em programa de computador uma vazão determinada em varias hidrantes.

Depois na prática medi a vazão e a pressão de cada hidrante e aplicando teoria de Thomas Walski achei o coeficiente de Hazen-Willians. Devido a esta facilidade do conhecimento do coeficiente C de Hazen-Willians é que ainda é muita usada no Brasil e no mundo, principalmente em redes.

Existem tantas imprecisões na escolha das previsões populações e da demanda que as vezes a precisão da formula de Darcy-Weisbach não ajuda em nada, a não ser em adutoras de grandes diâmetros e grandes velocidades.

### Espinha de peixe

A maneira mais prática de calcular que eu usei muito no SAAE de Guarulhos, foi calcular a rede como espinha de peixe e depois unir os diâmetros dos anéis de 200mm formando redes malhadas.

### 1.27 Colapso

Uma tubulação pode ter sobrepressão e subpressão. A subpressão quando atinge valores abaixo de -8m causa o colapso da tubulação.

De onde surgiu o **-8m** ?

Para a pressão de vapor de água a 20°C é igual a 2,3m e a pressão atmosférica é igual a 10,3m

$$10,3\text{m} - 2,3\text{m} = 8,00\text{m} \text{ (pressão subatmosférica admissivel)}$$

Um tubo não pode ter pressão interna menor que -8,00m.

### 1.28 Colapso de tubo de aço

Para tubos de ao a fórmula de Stewart conforme a antiga ABNT 591/77.

$$P_2 - P_1 = 3.529.060 \times (e/D)^3$$

Sendo:

P<sub>2</sub>= pressão externa (kgf/cm<sup>2</sup>)

P<sub>1</sub>= pressão interna (kgf/cm<sup>2</sup>)

D=diâmetro (mm)

e= espessura do aço (mm)

Conforme Azevedo Neto os tubos de aço devem ter uma espessura mínima para evitar o colapso do mesmo conforme Tabela (1.12).

**Tabela 1.18- Espessura mínima do tubo de aço conforme o diâmetro para evitar o colapso.**

Diâmetro do tubo (mm)	Espessura da parede do tubo de aço (polegadas)
700 a 900	1/4
1000 a 1100	5/16
1200 a 1400	3/8
1500 a 1600	7/16
1700 a 1800	1/2

**Exemplo 1.15**

Dado um tubo de aço com diâmetro D=1400mm e espessura do aço de 3/8" (9,5mm).  
 Achar a pressão de colapso.

$$P_2 - P_1 = 3.529.060 \times (9,5/1400)^3 = 1,10 \text{ kgf/cm}^2$$

**1.29 Espessura mínima dos tubos de aço**

$$e = (p \times D) / (2 \times T)$$

Sendo:

e= espessura da parede (cm)

D=diâmetro (cm)

T= 1000 kgf/cm<sup>2</sup> para o aço soldado e T=1400 kgf/cm<sup>2</sup> aço costurado

**1.30 Dilatação térmica do tubo de aço**

A dilatação térmica longitudinal do aço é dada pela equação:

$$\Delta L = L \times C \times \Delta t$$

Sendo:

$\Delta L$ = variação do comprimento do tubo (m)

L= comprimento do tubo (m)

C= coeficiente de dilatação linear do aço de 11 a 12 x 10<sup>-6</sup> m/°C

$\Delta t$ = variação da temperatura (°C)

**Exemplo 1.16**

Um tubo de aço exposto ao sol tem L=300m e sobre uma variação de temperatura de  $\Delta t = 20^\circ\text{C}$ . Calcular a variação de comprimento.

$$\Delta L = L \times C \times \Delta t$$

$$\Delta L = 300 \times 12 \times 10^{-6} \times 20 = 0,072\text{m}$$

**1.31 Tensão longitudinal do aço**

A tensão longitudinal no tubo de aço causada por uma diferença de temperatura  $\Delta t$  será:

$$T = E \times C \times \Delta t$$

Sendo:

T= tensão longitudinal do aço (kgf/cm<sup>2</sup>)

E= módulo de elasticidade do aço= 2 a 2,2 x 10<sup>6</sup> kgf/cm<sup>2</sup>

C= coeficiente de dilatação linear do aço de 11 a 12 x 10<sup>-6</sup> m/°C

$\Delta t$ = variação da temperatura (°C)

### Exemplo 1.17

Calcular a tensão longitudinal para um tubo de aço com variação de temperatura de 20°C

$$T = E \times C \times \Delta t$$
$$T = 2,2 \times 10^6 \times 20 \times 12 \times 10^{-6} = 528 \text{ kgf/cm}^2$$

### 1.32 Colapso de tubo de PVC de esgoto

Objetivo: determinar a pressão externa uniforme máxima que um tubo de PVC suporta. Os estudos estão em catálogo antigo da Tigre.

A fórmula que está aplicada aqui é para quando a espessura do tubo é menor que 0,1D ou 0,15D

N é também chamado de constante de achatamento. Quando N=2 temos duas dobras, quando N=3 temos três dobras e quando N=4 temos quatro dobras no achatamento

O valor de P em kgf/cm<sup>2</sup> é a pressão limite

Para a relação de Poisson 1/M adotamos 1/M = 0,30 o que nos fornece para o valor de M=3,33

O valor do módulo da elasticidade para tubos de PVC a 20 graus centígrados variável de 25000 a 30000 kgf/cm<sup>2</sup>.

É importante observar que nos catálogos modernos esta fórmula por incrível que parece não foi localizada.

A fórmula vale para qualquer tubo de PVC podendo ser para esgoto ou para água. No caso aqui estamos usando em tubos de PVC marca Tigre de esgotos sanitários com diâmetro variando de 75mm a 400mm que a gama de diâmetros existentes atualmente.

M=3,33 sendo: 1/M é a relação de Poisson que é igual a 0,3 a 0,3

$$P = E \times \left( \frac{\pi^4}{N^4 \times (N^2 - 1)} \right) \times \left( \frac{D}{2 \times L} \right)^4 + (N^2 - 1) \times \left( \frac{M^2}{12 \times (M^2 - 1)} \right) \times (2,0 \times E/D)^2 \times (2 \times E/D)$$

P = Pressão de colapso em tubos de PVC de esgoto (kg/cm<sup>2</sup>)

### 1.33 Programa Fortran

No site <http://www.geocities.com/Athens/olympus/5564> achamos os arquivos:

g77exe.zip  
g77lib.zip  
g77doc.zip

Deverá ser arranjado o arquivo unzip.exe

Nota importante: todos os três arquivos acima deverão ser instalados na raiz, ou seja, no C: do microcomputador.

Depois entrando no Windows em “program” ache “acessórios” e depois o “prompt do comando DOS”.

Entrando no prompt do DOS faz-se:

```
unsip de g77exe.zip  
unzip g77lib.zip  
unzip g77doc.zip
```

O programa g77 é um compilador gratuito do Fortran.

Existe um arquivo em acrobat reader que é um guia tem 122 páginas e contém as explicações das funções do Fortran

Fazendo **cross>exercício1.txt** teremos a saída em arquivo exercício.txt que pode ser aberto e impresso usando o **Wordpad**.

#### Exemplo 1.18

Base: livro do Victor Streter, 1982, página 452

Vamos resolver o problema da Figura (1.6). Temos a entrada de dados, a saída de dados na tela do monitor e o programa em fortran **cross.f**.

Fizemos o programa em fortran de forma não formatada para facilitar a entrada para aqueles não acostumados com o Fortran.

O arquivo **cross.dat** que é a **entrada de dados** em Fortran não é um documento ponto.doc, que este contém muitas informações escondidas que não podem aparecer no programa de entrada do Fortran. Trata-se de programa em MSDOS feito por editor de texto especial que não coloca os caracteres especiais escondidos do word comum.

A bomba é fornecida pela Tabela (1.19), notando duas coisas fundamentais:

- Vazão zero (*shut-off*)
- Espaçamento da vazão

**Tabela 1.19- Vazões e pressões tirados da curva da bomba**

Q(m <sup>3</sup> /s)	0	0,03	0,06	0,09
H(m)	30	29	26	20



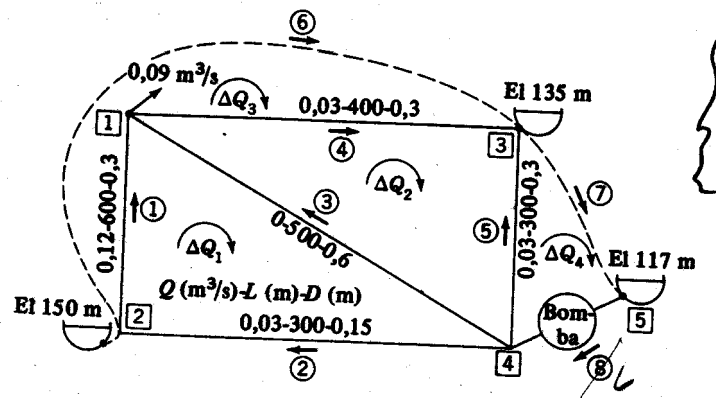


Figura 1.15- Esquema de um rede malhada com bombas e reservatórios

Entrada de dados em arquivo cross.dat da Figura (1.12). Notar que a entrada de dados não é formatada, como é usual em alguns programas em Fortran.

```
'SI' 30 0.001 0.000001007 100.0 5
'HW' 1 0.120 600 0.3 100 0.0 0.0
'HW' 2 0.030 300 0.15 100 0.0 0
'HW' 3 0.000 500 0.6 100 0 0
'HW' 4 0.030 400 0.3 100 0 0
'HW' 5 0.030 300 0.3 100 0 0
'PS' 6 0 15.0 0 0 0 0
'PS' 7 0 18.0 0 0 0 0
'PU' 8 0.06 0.03 30.0 29.0 26.0 20.0
'&&' 0 0 0 0 0 0
'PT' 3 2 1 -3 3 4 -5 3 3 6 -4
'PT' -1 3 5 7 8 0 0 0 0 0 0
'&&' 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
'PT' 5 117.00
'&&' 0 0
'PT' 5 8 4 2 2 1 1 4 3 0 0
'&&' 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
'PT' 1 100.0
'PT' 2 150.0
'PT' 3 135.0
'PT' 4 100.00
'PT' 5 117.0
'&&' 0 0
```

Entrada de dados em arquivo cross.dat da Figura (1.12). Notar que a entrada de dados não é formatada, como é usual em alguns programas em Fortran.  
Abaixo daremos algumas explicações que não deverão constar da entrada de dados já feita acima. Usamos no programa Fortran **ponto ao invés de virgula**.

Nota: SI é sistema internacional  
Nota: HW é que iremos usar a fórmula de Hazen-Williams  
Nota: 30 é o número de iterações máximas que consideramos  
Nota: 0,001 é a tolerância na vazão em m<sup>3</sup>/s  
Nota: 0,000001 é a viscosidade cinemática  
Nota: 100 é o valor da rugosidade de Hazen-Williams  
Nota: 5 é o número de cotas no terreno  
'SI' 30 0.001 0.000001 100.0 5

Nota: 1 é o número do tramo  
Nota: 0,120 é a vazão em m<sup>3</sup>/s  
Nota: 600,00 é a distância em metros  
Nota: 0,30m é o diâmetro da tubulação em metros  
Nota: 100 é o valor da rugosidade no tramo  
Nota: 0 reservado  
Nota: 0 reservado  
'HW' 1 0.120 600.0 0.30 100.0 0 0  
'HW' 2 0.030 300.0 0.15 100.0 0 0  
'HW' 3 0.000 500.0 0.6 100.0 0 0  
'HW' 4 0.030 400.0 0.30 100.0 0 0  
'HW' 5 0.030 300.0 0.30 100.0 0 0

Nota: **PS** quer dizer **Pseudo-Loop**  
Nota: 6 é o número do pseudo-loop  
Nota: 0 vago  
Nota: 15,0 é o desnível no loop 150-135=15m  
Nota> os quatro valores de 0 estão vagos

'PS' 6 0 15.0 0 0 0 0  
'PS' 7 0 18.0 0 0 0 0

Nota: **PU** quer dizer **pump**, ou seja, bombas em português  
Nota: 8 é o número da posição da bomba na rede  
Nota: São os pontos que precisamos para calcular os valores A.B.C da bomba.  
Nota: 0,06 e 0,03 são as vazões em m<sup>3</sup>/s da curva da bomba  
Nota: 30,00m é a pressão em shut-off, isto é, quando a vazão é igual a zero.  
Nota: 29,0 26, 20,00 são valores da altura manométrica  
'PU' 8 0.06 0.03 30.0 29.0 26.0 20.0  
Nota: para término usar '&&' e não esquecer que temos 7 valores 0  
'&&' 0 0 0 0 0 0 0

Nota: PT é um carácter com duas letras e no caso coloquei as iniciais do meu nome.  
Nota: o número 3 significa o número de tramos que são três  
Nota: os tramos estão com sinal: 2 1 -3

Nota: terminado o numero 3 significa que temos mais três tramos 4 -5 3

Nota: o numero 3 indica novamente que temos três tramos 6 -4 -1

Nota: o numero 3 indica mais três tramos que são 5 7 8

Nota: importante que em cada linha temos que ter 11 números e se não tiver números preencher com zeros espaçados.

'PT' 3 2 1 -3 3 4 -5 3 3 6 -4

'PT' -1 3 5 7 8 0 0 0 0 0 0

Nota: é o final e notar que temos 11 zeros

'&&' 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

Nota: 5 é o número da cota

Nota: 117,00 é o valor da cota

'PT' 5 117.00

Nota: é o término e temos dois zeros espaçados aleatoriamente

'&&' 0 0

Nota: 5 é o início da sequência. Depois teremos 8 que é a bomba, depois 4 que é o nó. Depois teremos tramo 2, depois nó 2 e assim por diante até atingir toda a rede.

Nota: terminar com zeros até completar 11 números

'PT' 5 8 4 2 2 1 1 4 3 0 0

Nota: temos 11 zeros

'&&' 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

Nota: 1 número do nó e a cota admitida 100,00m

'PT' 1 100.0

'PT' 2 150.0

'PT' 3 135.0

'PT' 4 100.0

'PT' 5 117.0

Nota: final com 2 zeros

'&&' 0 0

Saida de dados na arquivo saida1.txt

O arquivo cross.dat deverá ser feito com o WORDPAD que tem no Windows. Não pode ser feito usando o WORD.

O arquivo cross.dat de entrada dos dados entra automaticamente no programa cross.exe

A saída padrão é na tela, mas para sair em arquivo fazemos assim:

**Cross>saida1.txt**

SI 30 0.00100000005 1.00700004E-006 100.5

ESPEC. UNIDADES S.I., VISCOSIDADE EM M\*\*2/SEC= 0.0000010

TOLERANCIA NA VAZAO =0.001 NO DE ITERACOES= 30

TUBO Q(CFS OU M\*\*3/S) L(FT OU M) D(FT OU M) HW OU RUG

1	0.120	600.0	0.300	100.00000
2	0.030	300.0	0.150	100.00000
3	0.000	500.0	0.600	100.00000
4	0.030	400.0	0.300	100.00000
5	0.030	300.0	0.300	100.00000

6 DIFERENCA DE NIVEL DE RESERVATORIOS= 15.00

7 DIFERENCA DE NIVEL DE RESERVATORIOS= 18.00

8 CURVA BOMBA, DQ= 0.030 H= 30.0 29.0 26.0 20.0

COEF.DA BOMBA IGUAL= 30.000 -11.111 -555.556 -6172.840

IND=

3 2 1 -3 3 4 -5 3 3 6 -4

-1 3 5 7 8 0 0 0 0 0 0

0

ITERACAO NO. 1 SOMA DAS CORR. DA VAZAO= 0.1385

ITERACAO NO. 2 SOMA DAS CORR. DA VAZAO= 0.1040

ITERACAO NO. 3 SOMA DAS CORR. DA VAZAO= 0.0372

ITERACAO NO. 4 SOMA DAS CORR. DA VAZAO= 0.0034

ITERACAO NO. 5 SOMA DAS CORR. DA VAZAO= 0.0006

TRAMO VAZAO VELOCIDADE PERDA PERDA/1000

1	0.143	2.03	12.26	20.44
2	-0.034	-1.91	-12.36	-41.19
3	0.027	0.09	0.02	0.03
4	0.080	1.13	2.78	6.95
5	0.094	1.33	2.79	9.31

IX=

5 8 4 2 2 1 1 4 3 0 0 0

NUMERO DO NO COTA TERRENO

1	100.000
2	150.000
3	135.000
4	100.000
5	117.000

NO' COTA PIEZ. COTA TERR. PRESSAO EM COLUNA DAGUA

1	137.811	100.000	37.811
2	150.044	150.000	0.044

3	135.044	135.000	0.044
4	137.797	100.000	37.797
5	117.000	117.000	0.000

Programa cross.f em fortran

C\*\*\*\*\*

C PROGRAMA CROSS.F

C OBJETIVO CALCULO DE REDES MALHADAS OU NAO, PELO METODO DE HARDY

C CROSS,COMBINADO COM O METODO DE NEWTON-RAPHSON.CALCULA

C COM RESERVATORIOS,BOMBAS OU E BOOSTERS,VALVULA REDUTORA

C DE PRESSAO E PERDA DE CARGA LOCALIZADA

C BIBLIOGRAFIA LIVRO DE MECANICA DOS FLUIDOS DO VICTOR L.STREETER E

C E. BENJAMIN WYLIE , SETIMA EDICAO DA MCGRAW-HILL

C PAGINA 454.NO LIVRO HA VARIOS EXEMPLOS.

C NOTA: mudei nesta versao para entrada nao formatada

C assim ficara mais facil

C VERSAO:2 25/7/93

C RESULTADO VAZoes NOS TRAMOS E COM SINAL.COTA PIEZOMETRICA DOS NOS

C NOTA 1 NECESSARIO ENTRAR COM AS VAZoes NOS TRAMOS.

C NECESSARIO LOOP VERDADEIRO E AS VEZES O LOOP FALSO

C NAO E' NECESSARIO CALCULAR PREVIAMENTE A CURVA DA BOMBA

C POIS, O PROGRAMA O FAZ AUTOMATICAMENTE,DESDE QUE OS PONTOS

C SEJA ESPACADOS E COMECANDO DA VAZAO ZERO E O NUMERO DE

C PONTOS DEVERA' SER DE 4(QUATRO).

C NOTA 2 TRAMOS: 2000

C NOS: 5000

C NUMERO DE TRAMOS EM UM LOOP:100

C NOTA 3 FORMULAS USADAS: HAZEN WILLIAMS(HW) E DARCY WEISBACH(DW)

C UNIDADES SI:SISTEMA INTERNACIONAL METRO CUBICO/SEGUNDO, METRO

C ES: NORMAS INGLESAS PES CUBICO/SEGUNDO, PES

C ENG PLINIO TOMAZ 28/03/91

C COMPILADOR G77 gratuito

C g77 cross.f -o cross.exe

C ENTRADA OS DADOS ESTAO NO ARQUIVO TEXTO EM CODIGO ASCII CROSS.DAT

C SAIDA NA TELA

C ENTRADA

C UNIDADE, NUMERO DE TRAMOS,PRECISAO, VISCOSIDADE  
CINEMATICA,RUGOSIDADE  
C FORMULA,NUMERO DO TRAMO,VAZAO,COMPRIMENTO,DIAMETRO  
C PS, NUMERO DO TRAMO OU NO', DIFERENCA DE ALTURA DE  
RESERVATORIOS  
C PU, NUMERO DO NO DA BOMBA OU BOOSTERS,VAZAO QUE  
PASSA,VARIACAO DA VAZAO  
C PARA A CURVA DA BOMBA, OS QUATROS PONTOS DA CURVA DA  
BOMBA A COMECAO  
C PELO PRIMEIRO QUANDO Q=0 ESPACADOS CONFORME A VARIACAO DE  
VAZAO JA'  
C VISTA ACIMA.  
C && FINALIZA A ENTRADA ACIMA  
C NUMERO DE TRAMOS NO LOOPING E OS REFERIDOS TRAMOS NOS  
LOOPING COM SINAIS  
C && FINALIZA A ENTRADA ACIMA  
C NUMERO DO NO',COTA DO RESERVATORIO  
C && FINALIZA A ENTRADA ACIMA  
C CAMINHO DE NO'S E TRAMOS, NOS E TRAMOS DE MODO A ATINGIR  
TODOS OS  
C OS NO'S.DEVERA' TER SINAL QUANDO CONTRARIO AO PONTEIRO DOS  
RELOGIOS  
C E POSITIVO NO SENTIDO HORARIO. QUANDO TERMINAR, COLOCAR  
ZERO E COMECAR  
C OUTRA SEQUENCIA DE NOS E TRAMOS E ASSIM POR DIANTE.  
C && FINALIZA A ENTRADA ACIMA  
C NOTA 4 COMO NAO ESTA' PREVISTO VPR OU SEJA VALVULA  
REDUTORA DE PRESSAO  
C USEI O SEGUINTE ARTIFICIO E DEU CERTO !: CONSIDERE A QUEDA DE  
C PRESSAO DA VALVULA COMO UMA BOMBA COM CURVA  
CARACTERISTICA DA  
C FORMA DE UMA RETA.COLOCAMOS O SINAL POSITIVO.  
C QUANDO NO LOOPING OU NA VERIFICACAO DAS COTAS COLOCAR O  
SINAL  
C AO CONTRARIO DO QUE DARIA SE FOSSE UMA BOMBA. POR EXEMPLO,  
CASO  
C A BOMBA PRECISASSE DO SINAL NEGATIVO, ENTAO TERIAMOS QUE  
COLOCAR  
C O SINAL POSITIVO. FIZ UM TESTE DO EXERCICIO DA PAGINA 462  
ALTERANDO  
C O TRAMO 9 E SUBDIVIDINDO EM DOIS TRAMOS UM SENDO 9 E OUTRO 23  
E  
C COLOCANDO A "BOMBA" DE NUMERO 22 E OS PONTOS 20 E 21 A  
MONTANTE  
C E A JUZANTE RESPECTIVAMENTE.  
C NOTA 5 O PROGRAMA NAO PREVE VALVULA DE RETENCAO, MAS PODE  
SER FEITO  
C REFAZENDO O PROGRAMA NOVAMENTE,ELIMINANDO O TRAMO.

```

C NOTA 6 O PROGRAMA NAO TEM VALVULAS PARCIALMENTE
ABERTAS,MAS PODE SER
C FEITO, COLOCANDO-SE COMPRIMENTO DE TUBULACAO EQUIVALENTE.
C NOTA 7 QUALQUER PERDA LOCALIZADA,PODE SER TRANSFORMADA
EM COMPRIMENTO
C EQUIVALENTE.
C NOTA 8 O PROGRAMA FOI APORTUGUESADO
C NOTA 9 FOI ACRESCIDO VELOCIDADE,PERDA DE CARGA,COTAS DO
TERRENO E PRESSAO
C NOTA 10 PARA CALCULO DE PERDAS LOCALIZADAS,USAR O
PROGRAMA MINORLOS.FOR
C FEITO POR NOS,ONDE A PERDA LOCALIZADA ENTRA COM
FORMULA
C  $H=RESISTENCIA*Q**2$ ,QUE E' PARABOLA PASSANDO PELA ORIGEM.

C*****
*
C HARDY CROSS LOOP BALANCING INCLUDING MULTIPLI RESERVOIRS &
PUMPS(PU)
C HAZEN-WILLIANS(HW) OR DARCY-WEISBACH(DW) MAY BE USED FOR
PIPES
C ENGLISH(EN) OR SI UNITS(SI) MAY BE USED,POSITIVE DH IN ELEMENT IS
C HEAD DROP
REAL*4 Q,H,TOL,DEF,G,QQ,EN,DDQ,HDQ,REY,DQ,VNU
REAL*4 X1,X2,X3,X4,X5,S,DH,HH,SS,ELEM,R,EX,UNITS
REAL*4 BB
INTEGER*4 IX,ITYPE,I,NTY,KP,J,IND,IP,I1,I2,K,N,KK
CHARACTER*2 IE,ID,ITY,NT
INTEGER*4 N_TRAMOS,N_TRAMOS_LOOP,ELEMENTOS,NCOTAS
INTEGER*4 NUM_COTA
REAL*4
FLAGUE,TOLERANCIA,AREA,PERDA,MULTIPLICADOR,COTATERRENO

PARAMETER(N_TRAMOS=2000,N_TRAMOS_LOOP=100,ELEMENTOS=10000)
PARAMETER(FLAGUE=-1000.,TOLERANCIA=0.0001)

DIMENSION ITY(4),ID(2),ITYPE(N_TRAMOS),ELEM(ELEMENTOS)
$,IND(ELEMENTOS),Q(N_TRAMOS),H(ELEMENTOS),S(N_TRAMOS_LOOP),
$IX(ELEMENTOS)
DIMENSION
AREA(N_TRAMOS),PERDA(N_TRAMOS),MULTIPLICADOR(N_TRAMOS)
DIMENSION COTATERRENO(ELEMENTOS),NUM_COTA(ELEMENTOS)
DATA ITY /'HW','DW','PS','PU'/, IE/'&&'/,ID/'EN','SI'/
10 DO 12 J=1,ELEMENTOS
IF (J.LE. N_TRAMOS) ITYPE(J)=5
IF (J.LE. N_TRAMOS) H(J)=FLAGUE
IF (J.LE. ELEMENTOS) IX(J)=0
12 IND(J)=0
    
```

```
C READ PARAMETERS FOR PROBLEM AND ELEMENT DATA
  OPEN(5,FILE='CROSS.DAT',STATUS='OLD')
  READ(5,*) NT, KK, TOL, VNU, DEF, NCOTAS
  WRITE(*,*) NT, KK, TOL, VNU, DEF, NCOTAS
C   KK=NUMERO DE ITERACOES   TOL=TOLERANCIA NA VAZAO
C   VNU=VISCOSIDADE CINEMATICA DEF=RUGOSIDADE
C   NCOTAS=NUMERO DE NOS PARA AS COTAS DO TERRENO
15  FORMAT( A2,I8,F10.4,F10.7,F10.5,I8)
    IF (NT .EQ. ID(2)) GOTO 20
    WRITE(6,18) VNU
18  FORMAT(' ESPEC. UNIDADE INGLESA,VISCOSIDADE EM
FT**2/SEC=',F10.7)
    UNITS=4.727
    G=32.174
    GOTO 22
20  WRITE(6,21) VNU
21  FORMAT(' ESPEC. UNIDADES S.I.,VISCOSIDADE EM M**2/SEC=',F10.7)
    UNITS=10.674
    G=9.806
22  WRITE(6,24) TOL, KK
24  FORMAT(' TOLERANCIA NA VAZAO =',F5.3,' NO DE ITERACOES=',
  $I5 // ' TUBO Q(CFS OU M**3/S) L(FT OU M) D(FT OU M) HW OU RUG')
26  READ(5,*) NT, I, QQ, X1, X2, X3, X4, X5
C   I= NUMERO DO NO   QQ=VAZAO COM SINAL   X1=COMPRIMENTO
X2=DIAMETRO
C   X3=RUGOSIDADE
30  FORMAT(A2,3X,I5,3F10.3,F10.5,2F10.3)
    IF (NT .EQ. IE) GOTO 68
    Q(I)=QQ
    IF (X2 .NE. 0) THEN
      MULTIPLICADOR(I)=1000./X1 ! PARA CALCULAR PERDA DE CARGA POR
1000
    END IF
    DO 32 NTY=1,4
      IF (NT .EQ. ITY(NTY)) GOTO 33
32  CONTINUE
33  ITYPE(I)=NTY
    KP=4*(I-1)+1
    GOTO (41,42,53,64),NTY
41  IF (X3 .EQ. 0.) X3=DEF ! RUGOSIDADE
    ELEM(KP)=UNITS*X1/(X3**1.852*X2**4.8704)
    AREA(I)=0.7854*X2*X2 !AREA, X2=DIAMETRO
    EX=1.852
    GOTO 43
42  IF (X3 .EQ. 0.) X3=DEF
    EX=2.
    ELEM(KP)=X1/(2.*G*X2**5*0.7854*0.7854) !RESISTENCIA DW
    AREA(I)=0.7854*X2*X2 !AREA DA SECCAO TRANSVERSAL
```



```
ELEM(KP+1)=1./(0.7854*X2*VNU)
ELEM(KP+2)=X3/(3.7*X2)
43 WRITE(6,45) I,Q(I),X1,X2,X3
45 FORMAT (I5,F18.3,F12.1,F12.3,F14.5)
EN=EX-1.
GOTO 26
53 ELEM(KP)=X1
WRITE(6,55) I,X1
55 FORMAT( I5,' DIFERENCA DE NIVEL DE RESERVATORIOS=',F10.2)
GOTO 26
64 ELEM(KP)=X2
ELEM(KP+3)=(X5-3.*(X4-X3)-X2)/(6.*X1**3)
ELEM(KP+2)=(X4-2.*X3+X2)/(2.*X1**2)-ELEM(KP+3)*3.*X1
ELEM(KP+1)=(X3-X2)/X1-ELEM(KP+2)*X1-ELEM(KP+3)*X1*X1
WRITE(6,66) I,X1,X2,X3,X4,X5,(ELEM(KP+J-1),J=1,4)
66 FORMAT( I5,' CURVA BOMBA,DQ=',F7.3,' H=',4F8.1/5X,
$' COEF.DA BOMBA IGUAL=',4F11.3)
GOTO 26
C READ LOOP INDEXING DATA ,IND=NC, PIPES, PIPE,PIPE, ETC CLOCKWISE
+CC-
68 I1=1
70 I2=I1+10 ! Mudei de 14 para 10 para ter na linha no maximo 11
READ(5,*) NT,(IND(I),I=I1,I2)
75 FORMAT( A2,2X,15I4)
IF ( NT .EQ. IE) GOTO 78
I1=I2+1
GOTO 70
78 IF (I1 .EQ. 1) GOTO 140
WRITE(6,79) (IND(I),I=1,I1)
79 FORMAT(' IND=/'(11I4))
C BALANCE ALL LOOPS
DO 130 K=1, KK
DDQ=0.
IP=1
80 I1=IND(IP)
IF (I1 .LE. 0) GOTO 124
DH=0.
HDQ=0.
DO 110 J=1, I1
I=IND(IP+J)
IF (I) 81,110,82
81 S(J)=-1.
I=-I
GOTO 83
82 S(J)=1.
83 NTY=ITYPE(I)
KP=4*(I-1)+1
GOTO (91,92,103,104),NTY
```

```
91 R=ELEM(KP)
   PERDA(I)=R*Q(I)*ABS(Q(I)**EN
   GOTO 95
92 REY=ELEM(KP+1)*ABS(Q(I))
   IF (REY .LT. 1.) REY=1.
   IF (REY-2000.) 93,94,94
93 R=ELEM(KP)*64./REY
   PERDA(I)=R*Q(I)*ABS(Q(I)**EN
   GOTO 95
C   TEMOS ABAIXO RESISTENCIA=ELEM(KP)* F CALCULADO POR
SWAMEE
94 R=ELEM(KP)*1.325/(ALOG(ELEM(KP+2)+5.74/REY**0.9))**2

   PERDA(I)=R*Q(I)*ABS(Q(I)**EN !INTRODUZI AS PERDAS AQUI

95 DH=DH+S(J)*R*Q(I)*ABS(Q(I)**EN
   HDQ=HDQ+EX*R*ABS(Q(I)**EN
   GOTO 110
103 DH=DH+S(J)*ELEM(KP)
   GOTO 110
104 DH=DH-S(J)*(ELEM(KP)+Q(I)*(ELEM(KP+1)+Q(I)*(ELEM(KP+2)+Q(I)*
   $ELEM(KP+3))))
   HDQ=HDQ-(ELEM(KP+1)+2.*ELEM(KP+2)*Q(I)+3.*ELEM(KP+3)*Q(I)**2)
110 CONTINUE
   IF (ABS(HDQ) .LT. TOLERANCIA) HDQ=1.
   DQ=-DH/HDQ
   DDQ=DDQ+ABS(DQ)
   DO 120 J=1,I1
   I=IABS(IND(IP+J))
   IF (ITYPE(I) .EQ. 3) GOTO 120
   Q(I)=Q(I)+S(J)*DQ
120 CONTINUE
   IP=IP+I1+1
   GOTO 80
124 WRITE(6,125) K,DDQ
125 FORMAT(' ITERACAO N0.',I4,' SOMA DAS CORR. DA VAZAO=',F10.4)
   IF (DDQ .LT. TOL) GOTO 140
130 CONTINUE
140 WRITE(6,141)
141 FORMAT(' TRAMO VAZAO VELOCIDADE PERDA PERDA/1000')
   DO 150 I=1,N_TRAMOS
   NTY=ITYPE(I)
   GOTO(142,142,150,150),NTY
142 WRITE(6,143) I,Q(I),Q(I)/AREA(I),PERDA(I),
   $MULTIPLICADOR(I)*PERDA(I)
143 FORMAT(I5,F10.3,3F10.2)
150 CONTINUE
```

```
C READ DATA FOR HGL COMPUTATION ,IX=JUNC, ELEMENT
,JUNC.ELEM,JUNC.ETC
152 READ(5,*) NT,K,HH
155 FORMAT(A2,I8,F10.3)
    IF(NT .EQ. IE) GOTO 160
    H(K)=HH
    GOTO 152
C*****
160 I1=1
162 I2=I1+10 ! mudei 14 para 10 para termos 11 em cada linha
    READ(5,*) NT,(IX(K),K=I1,I2)
    IF (NT .EQ. IE) GOTO 170
    I1=I2+1
    GOTO 162
170 WRITE(6,171) (IX(I),I=1,I1)
171 FORMAT(' IX='/(15I4))

C*****
*
C  LEITURA DO NUMERO DO NO E DA COTA DO TERRENO
    I=1
    700 CONTINUE
        READ(5,*) NT,J,BB !COTAS DO TERRENO
        NUM_COTA(I)=J
        I=I+1
    503  FORMAT(I8,F10.3)
        IF (NT .EQ. IE) GOTO 710
        COTATERRENO(J)=BB
        GOTO 700
    710 CLOSE(5) ! FECHA O ARQUIVO
        WRITE(6,*) 'NUMERO DO NO   COTA TERRENO'
        DO I=1,NCOTAS
            J=NUM_COTA(I)
            WRITE(6,510) J,COTATERRENO(J) !IMPRIME NA TELA OS NOS E COTAS
TERR.
    510  FORMAT(I8,20X,F10.3)
        END DO
C*****
    IP=1
    180 DO 200 J=1,(ELEMENTOS-2),2
        IF (J .EQ. 1) I1=IX(IP)
        I=IX(IP+J)
        N=IX(IP+J+1)
        IF (I) 181,199,182
    181 SS=-1.
        I=-I
        GOTO 183
    182 SS=1.
```

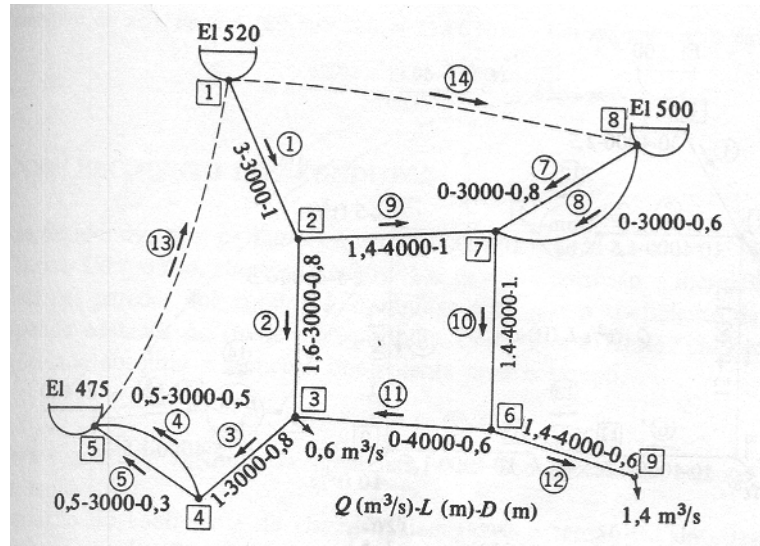
```

183 NTY=ITYPE(I)
    KP=4*(I-1)+1
    GOTO (184,185,189,190,199),NTY
184 R=ELEM(KP)
    GOTO 188
185 REY=ELEM(KP+1)*ABS(Q(I))
    IF (REY .LT. 1. ) REY=1.
    IF (REY-2000.) 186,187,187
186 R=ELEM(KP)*64./REY
    GOTO 188
187 R=ELEM(KP)*1.325/(ALOG(ELEM(KP+2)+5.74/REY**0.9))**2
188 H(N)=H(I1)-SS*R*Q(I)*ABS(Q(I))**EN
    GOTO 199
189 H(N)=H(I1)-SS*ELEM(KP)
    GOTO 199
190 H(N)=H(I1)+SS*(ELEM(KP)+Q(I)*(ELEM(KP+1)+Q(I)*(ELEM(KP+2)+Q(I)*
    $ELEM(KP+3))))
199 IF (IX(J+IP+3) .EQ. 0) GOTO 210
    IF (IX(J+IP+2) .EQ. 0) GOTO 205
200 I1=N
205 IP=IP+J+3
    GOTO 180
210 WRITE(6,215)
215 FORMAT(' NO" COTA PIEZ. COTA TERR. PRESSAO EM COLUNA
DAGUA')
    DO 220 N=1,N_TRAMOS
    IF (H(N) .EQ. FLAGUE) GOTO 220
    WRITE(6,520) N,H(N),COTATERRENO(N),H(N)-COTATERRENO(N)
520 FORMAT(I8,3F10.3)
220 CONTINUE
99 STOP 'TERMINADO O PROGRAMA CROSS.EXE-VERSAO 3'
    END
C*****
    
```

Observar que o Streeter usa a curva de uma equação do terceiro grau de uma bomba na forma:

$$H = A_0 + A_1 Q + A_2 x Q^2 + A_3 x Q^3$$

**Exemplo 1.19** da página 461 do livro do Victor Streeter



**Figura 1.16- Esquema de um rede malhada com bombas e reservatórios**  
 Fonte: Streeter, 1982

Dados: arquivo cross.dat que pode ser aberto com o Worldpad  
 Figura (1.16)

```
'SI' 30 0.001 0.000001007 0.0005 9
'DW' 1 3. 3000.0 1.0 0.0005 0 0
'DW' 2 1.6 3000.0 0.8 0.0005 0 0
'DW' 3 1.0 3000.0 0.5 0.0005 0 0
'DW' 4 0.5 3000.0 0.5 0.0005 0 0
'DW' 5 0.5 3000.0 0.3 0.0005 0 0
'DW' 7 0. 3000.0 0.8 0.0005 0 0
'DW' 8 0. 3000.0 0.6 0.0005 0 0
'DW' 9 1.4 4000.0 1.0 0.0005 0 0
'DW' 10 1.4 4000. 1.0 0.0005 0 0
'DW' 11 0. 4000. 0.6 0.0005 0 0
'DW' 12 1.4 4000. 0.6 0.0005 0 0

'PS' 13 0 -45.0 0 0 0 0
'PS' 14 0 20.0 0 0 0 0
'&&' 0 0 0 0 0 0
'PT' 5 1 2 3 4 13 4 9 10 11 -2
'PT' 2 -7 8 2 -4 5 4 14 7 -9 -1
'&&' 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
'PT' 1 520
'&&' 0 0
'PT' 1 1 2 2 3 3 4 4 5 0 3
```

```
'PT' -11 6 12 9 0 2 9 7 -8 8 0
'&&' 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
'PT' 1 520
'PT' 2 400
'PT' 3 400
'PT' 4 400
'PT' 5 475
'PT' 6 400
'PT' 7 400
'PT' 8 500
'PT' 9 300
'&&' 0 0
```

Fim

Saída em arquivo exercicio2.txt aberto com Wordpad  
 SI 30 0.00100000005 1.00700004E-006 0.000500000024 9  
 ESPEC. UNIDADES S.I., VISCOSIDADE EM M\*\*2/SEC= 0.0000010  
 TOLERANCIA NA VAZAO =0.001 NO DE ITERACOES= 30

```
TUBO Q(CFS OU M**3/S) L(FT OU M) D(FT OU M) HW OU RUG
1 3.000 3000.0 1.000 0.00050
2 1.600 3000.0 0.800 0.00050
3 1.000 3000.0 0.500 0.00050
4 0.500 3000.0 0.500 0.00050
5 0.500 3000.0 0.300 0.00050
7 0.000 3000.0 0.800 0.00050
8 0.000 3000.0 0.600 0.00050
9 1.400 4000.0 1.000 0.00050
10 1.400 4000.0 1.000 0.00050
11 0.000 4000.0 0.600 0.00050
12 1.400 4000.0 0.600 0.00050
13 DIFERENCA DE NIVEL DE RESERVATORIOS= -45.00
14 DIFERENCA DE NIVEL DE RESERVATORIOS= 20.00
IND=
5 1 2 3 4 13 4 9 10 11 -2
2 -7 8 2 -4 5 4 14 7 -9 -1
0
ITERACAO N0. 1 SOMA DAS CORR. DA VAZAO= 1.2056
ITERACAO N0. 2 SOMA DAS CORR. DA VAZAO= 0.6128
ITERACAO N0. 3 SOMA DAS CORR. DA VAZAO= 0.3400
ITERACAO N0. 4 SOMA DAS CORR. DA VAZAO= 0.1510
ITERACAO N0. 5 SOMA DAS CORR. DA VAZAO= 0.0590
ITERACAO N0. 6 SOMA DAS CORR. DA VAZAO= 0.0203
ITERACAO N0. 7 SOMA DAS CORR. DA VAZAO= 0.0064
ITERACAO N0. 8 SOMA DAS CORR. DA VAZAO= 0.0020
ITERACAO N0. 9 SOMA DAS CORR. DA VAZAO= 0.0006
TRAMO VAZAO VELOCIDADE PERDA PERDA/1000
```

1	1.925	2.45	15.59	5.20
2	0.977	1.94	12.93	4.31
3	0.251	1.28	10.10	3.37
4	0.199	1.01	6.39	2.13
5	0.052	0.73	6.40	2.13
7	0.222	0.44	0.70	0.23
8	0.104	0.37	0.71	0.24
9	0.948	1.21	5.11	1.28
10	1.274	1.62	9.18	2.29
11	-0.126	-0.44	-1.35	-0.34
12	1.400	4.95	0.00	0.00

IX=

1	1	2	2	3	3	4	4	5	0	3	-11	6	12	9
0	2	9	7	-8	8	0	0							

NUMERO DO NO COTA TERRENO

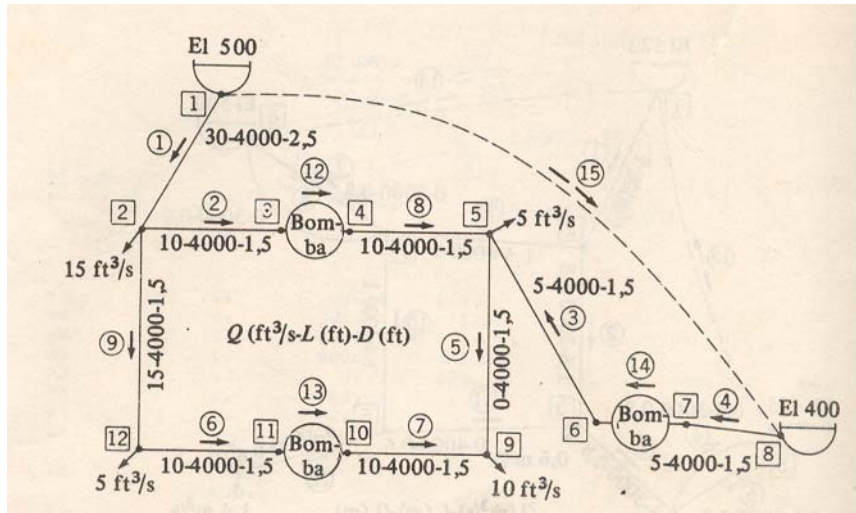
1	520.000
2	400.000
3	400.000
4	400.000
5	475.000
6	400.000
7	400.000
8	500.000
9	300.000

NO' COTA PIEZ. COTA TERR. PRESSAO EM COLUNA DAGUA

1	520.000	520.000	0.000
2	504.411	400.000	104.411
3	491.478	400.000	91.478
4	481.389	400.000	81.389
5	474.992	475.000	-0.008
6	490.123	400.000	90.123
7	499.297	400.000	99.297
8	500.001	500.000	0.001
9	332.153	300.000	32.153

Fim

**Exemplo 1.20** página 462 Mecânica dos fluidos do Victor L. Streeter e E. Benjamin Wylie



**Figura 1.17-** Esquema de um rede malhada com bombas e reservatórios  
Fonte: Streeter, 1982

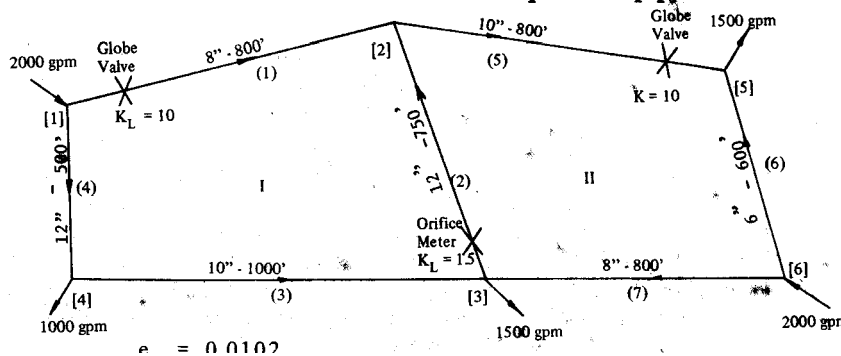


### 1.34 Método da Teoria Linear

O método da teoria linear para análise de redes de água foi desenvolvido por Roland W. **Jeppson** no seu livro *Analysis of flow in pipe networks* em 1976. Stephenson, 1984 informa que Wood e Charles em 1972 propuzeram um método de converter equações para equações lineares.

O método da teoria linear tem diferenças entre os métodos de Hardy-Cross e Newton-Raphson.

A grande vantagem do método da teoria linear é que não precisa de inicialização, isto é, de valores admitidos antecipadamente e converge em aproximadamente 4 a 10 iterações. Stephenson, 1984 alerta que quando a diferença de pressão é muito baixa em um tramo teremos problema de convergência mesmo no método da teoria linear, da mesma maneira que temos no método de Hardy-Cross.



**Figura 1.18- Esquema de aplicação do método da teoria linear**

Basicamente o método da teoria linear é a montagem de um sistema de equações não lineares que através de um **artifício são linearizadas**. O sistema de equações lineares é então resolvido por cálculo de matrizes, usando o método de Gauss ou de **Gauss-Jordan**.

O método só pode ser feito através de microcomputadores, sendo praticamente impossível a resolução do mesmo sem o computador.

Vamos mostrar de uma maneira bem simplificada o que fez Jeppson, 1976.

Stephenson, 1984 mostra que no método da teoria linear a relação envolvendo número de trechos (i), número de nós (j) e número de loops (m) será constante:

$$i = j + m - 1$$

A rede malhada da Figura (1.15) tem 6 nós e isto nos dará 5 equações da continuidade independentes que são facilmente montadas assim:

Vazão que entra e vazão que sai

Quando a vazão entra é positivo;

Quando a vazão sai do nó é negativo:

$$\begin{aligned} Q_1 + Q_4 &= 2000 \text{ gmp} = 2000 \times 9,99223 \text{ ft}^3/\text{s} = 4,45 \\ -Q_1 - Q_2 + Q_5 &= 0 \\ Q_2 - Q_3 - Q_7 &= -3,34 \\ Q_3 - Q_4 &= -2,23 \\ -Q_5 - Q_6 &= 3,34 \end{aligned}$$

Temos sete variáveis e somente 5 equações. Portanto, faltam duas equações. As duas equações são montadas aplicando o seguinte truque:

$$H_f = R \times Q^n = [R \times Q^{n-1}] \times Q = R_1 \times Q$$

Sendo:

$$R_1 = [R \times Q^{n-1}]$$

Um dos truques de inicialização de Jepsom é usar a **vazão unitária 1**. Assim como se a vazão fosse 1, cálculos todos os valores de R para cada tramo. Isto também foi idéia de Wood e Charles em 1972 conforme Stephenson, 1984.

Stephenson, 1984 como inicialização a velocidade unitária 1m/s para todos os trechos de tubulações. Uma outra alternativa é estimar que em todos os trechos de tubulação haja para inicialização um regime laminar.

Assim teremos no tramo 1  $R_1=4,71$  no tramo 2  $R_2=0,402$  e assim por diante.

Fazendo procedemos achamos mais duas equações necessárias do loop que são:

Sentido horário: positivo

Sentido anti-horário: negativo

$$4,71 Q_1 - 0,402 Q_2 - 1,37 Q_3 - 0,264 Q_4 = 0$$

$$1,14 Q_5 - 11,3 Q_6 + 3,35 Q_7 + 0,402 Q_2 = 0$$

Temos portanto 7 incógnitas e 7 equações. Para resolver precisamos usar sistema de matrizes Gauss- Jordan, por exemplo.

Achamos então os valores de  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6$  e  $Q_7$ .

Usando estes valores como iniciais recalculamos tudo de novo:

$$H_f = R \times Q^n = [R \times Q^{n-1}] \times Q = R_1 \times Q$$

Até ponto em que a vazão obtida é praticamente igual a vazão anterior num erro que toleramos.

Em três ou quatro iterações o problema está resolvido, sem termos uma inicialização como o método de Hardy-Cross.

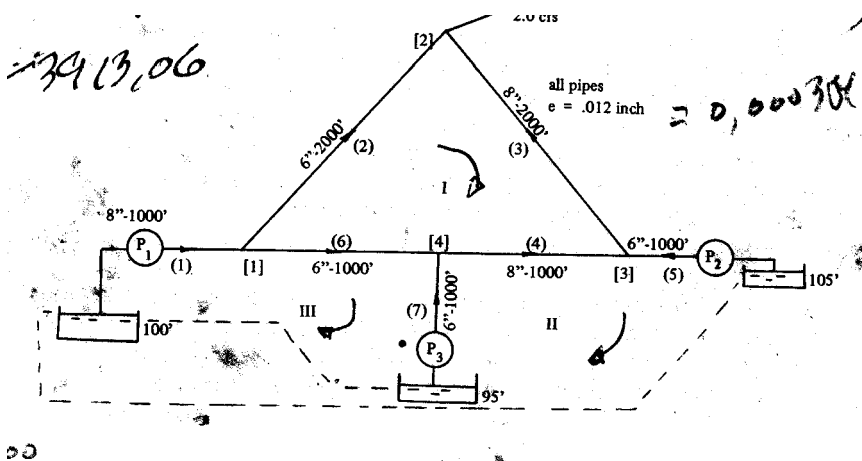


Figura 1.19- Esquema de rede conforme Jepsom

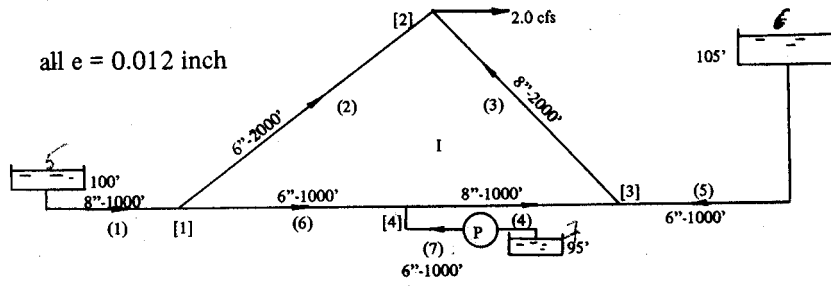


Figura 1.20- Esquema de rede conforme Jepson

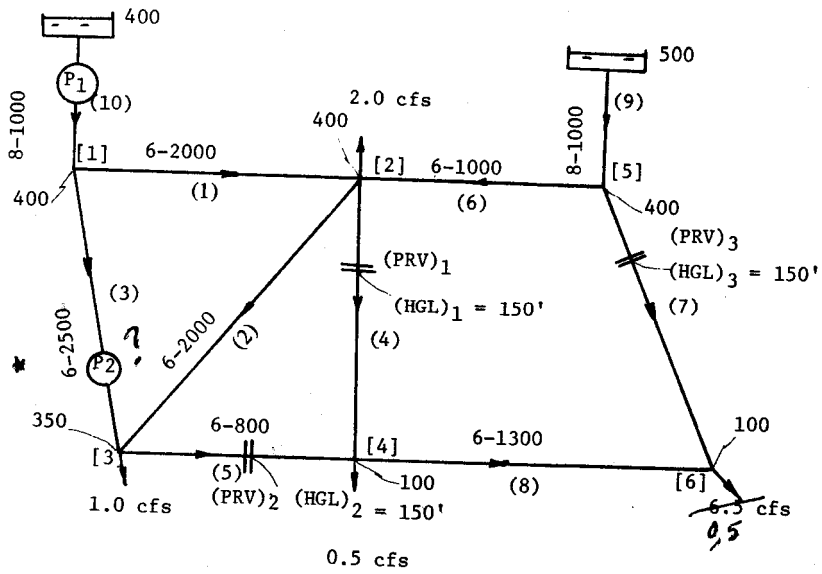


Figura 1.21- Esquema de rede conforme Jepson

### 1.35 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](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*, 19 páginas, Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Parma, Italia.
- NETWORKS ANALYSIS acessado em 16 de abril de 2007
- SILVESTRE, PASCHOAL. *Hidráulica Geral*, 1983, LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A..
- STEPHENSON, DAVID. *Pipeflow analysis*. 1984, 201 páginas, ISBN 0-444-41668-2
- STREETER, VICTOR L. et al, *Mecânica dos Fluidos*, 1982, McGraw-Hill;
- 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, 641 páginas.

### Exemplo 1.21

Tomamos um exemplo de rede malhada de Cross feito por Silvestre p.104. Vamos calcular pelo programa em Fortran denominado cross.exe com entrada de dado cross.dat e saída em texto cross4.txt.

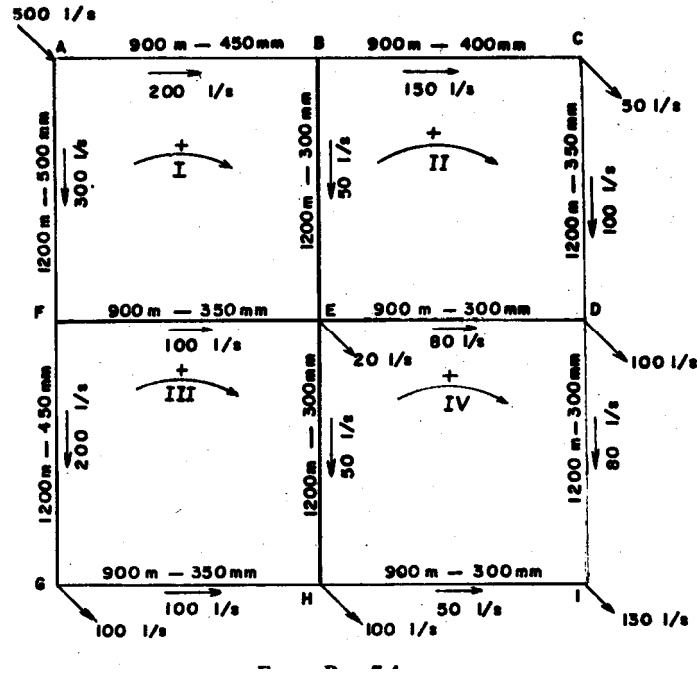


Figura 1.22- Esquema das redes malhadas

Entrada de dados com o arquivo cross.dat

Cross4.dat (original)

```
'SI' 30 0.001 0.000001007 100.0 9
'HW' 1 0.2 900.0 0.45 100. 0 0
'HW' 2 0.1 900.0 0.35 100. 0 0
'HW' 3 0.1 900.0 0.35 100.0 0 0
'HW' 4 0.15 900.0 0.40 100.0 0 0
'HW' 5 0.08 900.0 0.30 100.0 0 0
'HW' 6 0.05 900.0 0.30 100.0 0 0
'HW' 7 0.3 1200.0 0.50 100.0 0 0
'HW' 8 0.05 1200.0 0.30 100.0 0 0
'HW' 9 0.1 1200.0 0.35 100.0 0 0
'HW' 10 0.2 1200. 0.45 100.0 0 0
'HW' 11 0.05 1200. 0.30 100.0 0 0
'HW' 12 0.08 1200. 0.30 100.0 0 0
'&&' 0 0 0 0 0 0 0

'PT' 4 1 8 -2 -7 4 4 9 -5 -8 4
'PT' 2 11 -3 -10 4 5 12 -6 -11 0 0
'&&' 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

'PT' 1 960
'&&' 0 0
'PT' 1 1 2 4 3 9 6 12 9 6 8
'PT' 11 5 2 4 10 7 3 0 0 0 0
'&&' 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

'PT' 1 900.00
'PT' 2 900.00
'PT' 3 900.00
'PT' 4 900.00
'PT' 5 900.00
'PT' 6 900.00
'PT' 7 900.00
'PT' 8 900.00
'PT' 9 900.00
'&&' 0 0
```

## Saida dos cálculos com o arquivo R4.txt fazendo cross>r4.txt

### R4.txt (original)

```

SI 30 0.001000000005 1.007000004E-006 100. 9
ESPEC. UNIDADES S.I.,VISCOSIDADE EM M**2/SEC= 0.0000010
TOLERANCIA NA VAZAO =0.001 NO DE ITERACOES= 30

TUBO Q(CFS OU M**3/S) L(FT OU M) D(FT OU M) HW OU RUG
1 0.200 900.0 0.450 100.00000
2 0.100 900.0 0.350 100.00000
3 0.100 900.0 0.350 100.00000
4 0.150 900.0 0.400 100.00000
5 0.080 900.0 0.300 100.00000
6 0.050 900.0 0.300 100.00000
7 0.300 1200.0 0.500 100.00000
8 0.050 1200.0 0.300 100.00000
9 0.100 1200.0 0.350 100.00000
10 0.200 1200.0 0.450 100.00000
11 0.050 1200.0 0.300 100.00000
12 0.080 1200.0 0.300 100.00000

IND=
4 1 8 -2 -7 4 4 9 -5 -8 4
2 11 -3 -10 4 5 12 -6 -11 0 0
0

ITERACAO NO. 1 SOMA DAS CORR. DA VAZAO= 0.0384
ITERACAO NO. 2 SOMA DAS CORR. DA VAZAO= 0.0116
ITERACAO NO. 3 SOMA DAS CORR. DA VAZAO= 0.0053
ITERACAO NO. 4 SOMA DAS CORR. DA VAZAO= 0.0021
ITERACAO NO. 5 SOMA DAS CORR. DA VAZAO= 0.0008

TRAMO VAZAO VELOCIDADE PERDA PERDA/1000
1 0.214 1.34 5.34 5.93
2 0.091 0.95 3.77 4.18
3 0.095 0.99 4.03 4.48
4 0.148 1.18 4.78 5.31
5 0.068 0.97 4.64 5.16
6 0.064 0.91 4.11 4.57
7 0.286 1.46 7.29 6.08
8 0.066 0.93 5.76 4.80
9 0.098 1.02 5.69 4.74
10 0.195 1.23 5.99 4.99
11 0.069 0.98 6.29 5.24
12 0.066 0.93 5.81 4.84

IX=
1 1 2 4 3 9 6 12 9 -6 8 -11 5 -2 4
-7 1 0 8 -3 7 -10 4 0 2 8 5 0 0 0
0 0 0 0

NUMERO DO NO COTA TERRENO
1 900.000
2 900.000
3 900.000
4 900.000
5 900.000
6 900.000
7 900.000
8 900.000
9 900.000

NO' COTA PIEZ. COTA TERR. PRESSAO EM COLUNA DAGUA
1 959.942 900.000 59.942
2 954.680 900.000 54.680
3 949.912 900.000 49.912
4 952.615 900.000 52.615
5 948.891 900.000 48.891
6 944.246 900.000 44.246
    
```

7	946.617	900.000	46.617
8	942.575	900.000	42.575
9	938.452	900.000	38.452