

## CAPÍTULO 8- ESTUDO DE PERDA DE CARGA.SISTEMA ELEVATÓRIO.

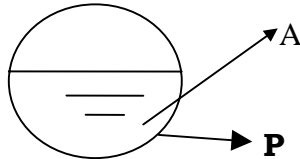
### FÓRMULAS PRÁTICAS DE CÁLCULOS DE PERDA DE CARGA.

#### 8.1-Definições:

a)RAIO HIDRÁULICO(Rh):

É a relação entre a seção(área)transversal molhada A e o perímetro molhado (o perímetro da seção em contato com o fluido).

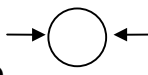


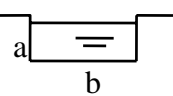
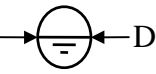
$$Rh = \frac{\text{Área molhada}}{\text{Perímetro molhado}} = \frac{A}{P}$$



b)DIÂMETRO HIDRÁULICO(Dh):

$$Dh = 4Rh = \frac{4A}{P} = \frac{4(\text{Área molhada})}{\text{Perímetro molhado}}$$

Na tabela a seguir são fornecidos os elementos hidráulicos dos condutos mais comumente utilizados na prática.

SEÇÃO	Área	P	Rh	Dh
	$\pi \frac{D^2}{4}$	$\pi D$	$\frac{D}{4}$	D
	$a^2$	$4a$	$\frac{a}{4}$	A
	$ab$	$2(a + b)$	$\frac{ab}{2(a + b)}$	$\frac{2ab}{a + b}$
	$ab$	$2a + b$	$\frac{ab}{2a + b}$	$\frac{4ab}{2a + b}$
	$\pi \frac{D^2}{8}$	$\pi \frac{D}{2}$	$\frac{D}{4}$	D

#### 8.2-Estudo da Perda de Carga

As perdas de carga podem ser divididas em:

- a)Perda de carga Distribuída (hf) - são aquelas que ocorrem ao longo das tubulações.
- b)Perda de Carga Localizadas ou singulares (hs)-são aquelas causadas por presença de válvulas,

mudanças de direção, variações da seção de escoamento, etc.

A soma das perdas distribuídas e localizadas ,constituí a perda de carga total que será simbolizada por  $H_p$ :

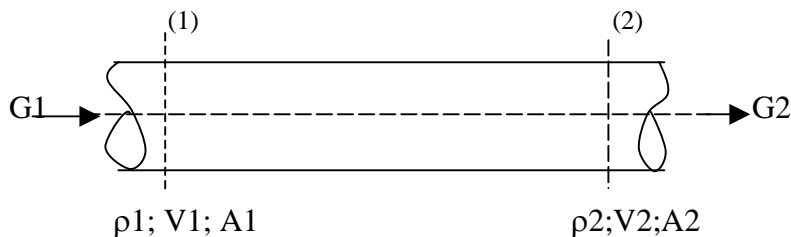
$$H_p = h_f + h_s$$

### 8.2.1- Estudo da Perda de Carga Distribuída

Hipóteses de Validade

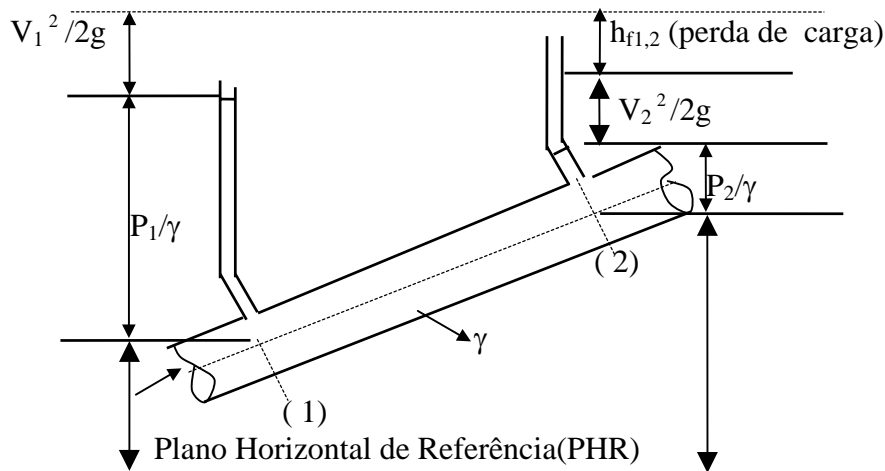
- Regime permanente e fluido incompressível
- Regime dinamicamente estabelecido
- Sem presença de máquina

#### 8.2.1.1-Equação da Continuidade



$$G_1 = G_2 \rightarrow \rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2. \text{ Para } \rho_1 = \rho_2 \text{ tem-se : } V_1 \cdot A_1 = V_2 A_2 \text{ ou } Q_1 = Q_2 \text{ e se } A_1 = A_2 \rightarrow V_1 = V_2 \text{ (condutos cilíndricos)}$$

#### 8.2.1. 2-Equação de Bernoulli(representação gráfica dos componentes)



$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_{f1,2}$$

#### 8.2.1.3 - Linha de Energia ou de Carga e Linha Piezometrica.

a) Linha de Energia ou de Carga – LE ou LC.

É a representação gráfica da energia em cada seção de um escoamento. A energia total, medida em relação a um plano de referencia para cada seção do escoamento define uma linha que se denomina linha de energia ou de carga. Esta linha, normalmente se inclina na direção do escoamento .

A soma das energias de pressão , velocidade e de posição em cada seção do escoamento é a Cota de Energia(CE). A cota de energia em cada seção é dada por:

$$CE = \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z$$

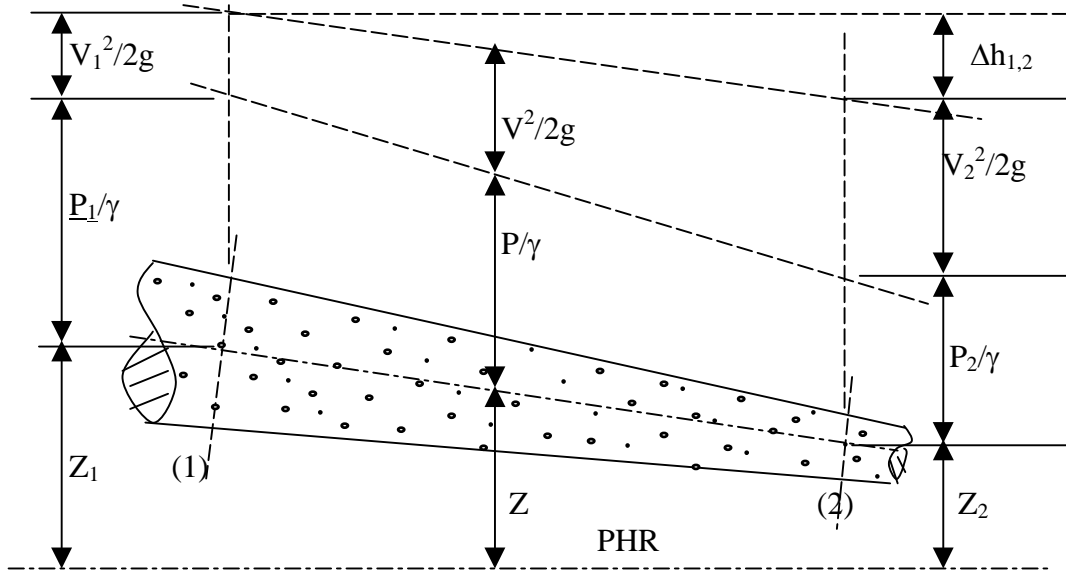
### b) Linha Piezometrica-LP

É uma linha que situa abaixo da linha de energia separada por uma distancia igual a energia cinética para cada seção considerada. É uma linha que também , geralmente se inclina na direção do escoamento. Ela juntamente com a linha de energia é bastante útil na resolução de problemas de escoamentos.

A soma das energias de pressão e posição em cada seção denomina-se Cota Piezométrica(CP).A cota piezometrica em cada seção e dada por:

$$CP = \frac{P}{\gamma} + Z$$

A figura 8.1 ilustra a linha de energia e a linha piezométrica de um escoamento, bem como a perda de carga de carga  $\Delta h_{1,2}$ (dissipação de energia)que ocorre entre as duas seções do escoamento .

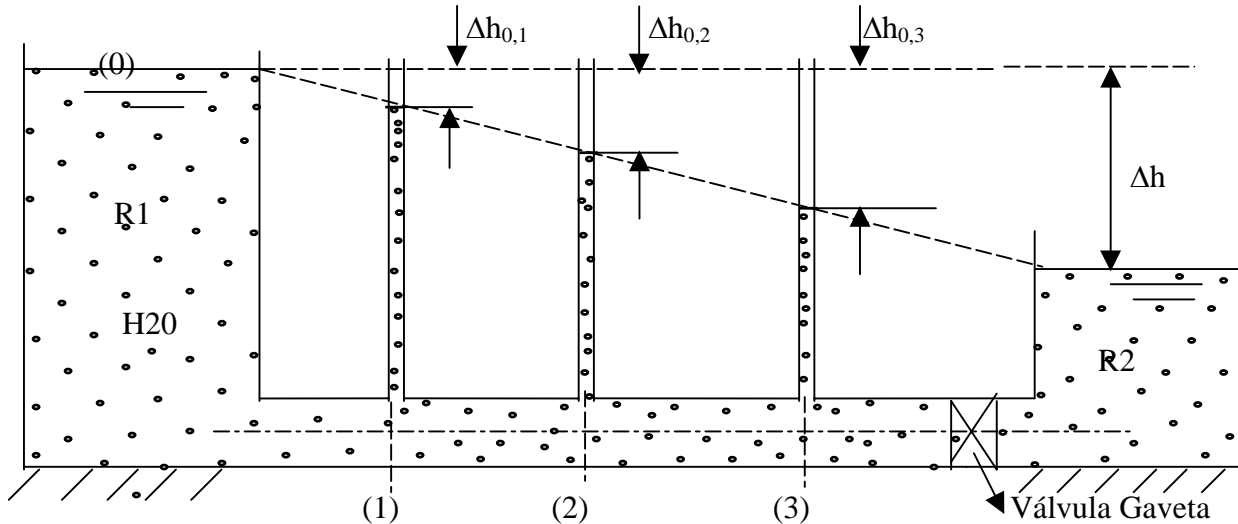


**Figura 8.1 - Linha de Energia(LE) e Linha Piezometrica(LP)**

#### 8.2.1.4 - Conceito de Perda de Carga .

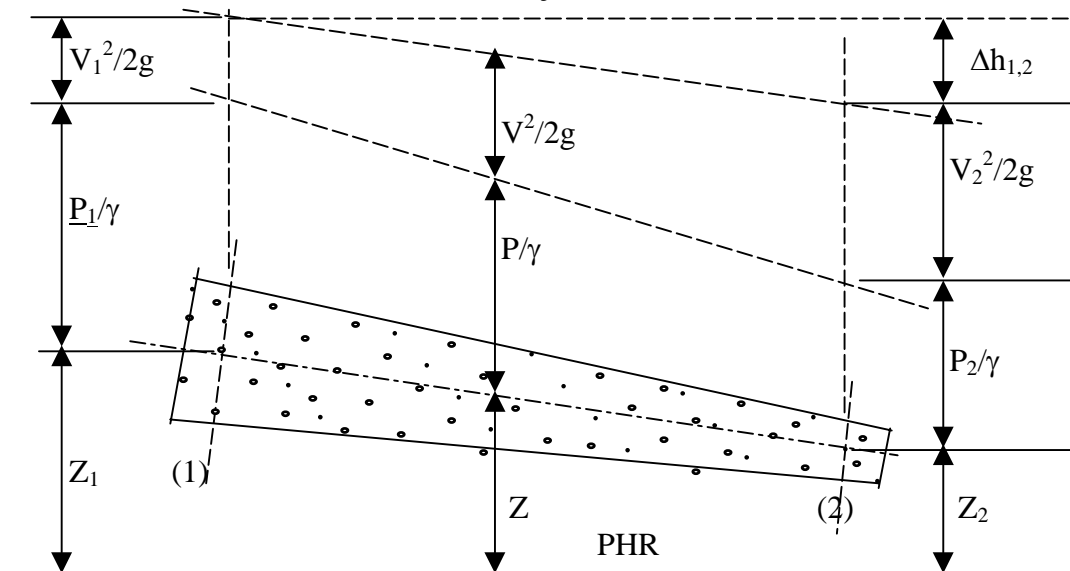
Na figura 8.2, inicialmente , a válvula de gaveta encontra-se totalmente fechada(não há fluxo). Todos os piezômetros estão com água no mesmo nível do reservatório 1 (R1). Em seguida abrindo-se a válvula de gaveta passa a escoar uma vazão do reservatório 1 (R1) ao reservatório 2 (R2) pela tubulação de seção constante . Após estabelecer o regime , observa-se que os níveis de água nos piezômetros são menores quanto mais distantes estão os piezômetros do reservatório R1. A diminuição dos

níveis de água nos piezômetros são provocados pela dissipação da energia em forma de calor e de turbilhões que se forma na corrente líquida. Surgem então as diferenças de níveis entre os piezômetros e o reservatório R1, que serão indicadas por :  $\Delta h_{0,1}$ ;  $\Delta h_{0,2}$  e  $\Delta h_{0,3}$ . Estas diferenças de níveis é que se denominam de perdas de carga. Estas perdas de carga correspondem respectivamente aos trechos dos piezômetros ao reservatório 1. Entre os dois reservatórios existe também uma diferença de níveis  $\Delta h$ , que também é a perda de carga que ocorre na tubulação que liga estes reservatórios.



**Figura 8.2- A Figura Mostra Graficamente a Perda de Carga**

A figura 8.3 mostra um trecho de tubulação que apresenta seção uniformemente decrescente por onde escoava uma vazão constante  $Q$ . Neste caso a perda de carga  $\Delta h_{1,2}$  é dada pela diferença das energias de pressões, de velocidades e de cotas das seções (1) e (2).



**Figura 8.3 - Perda de Carga entre Duas Seções de um Conduto Convergente**

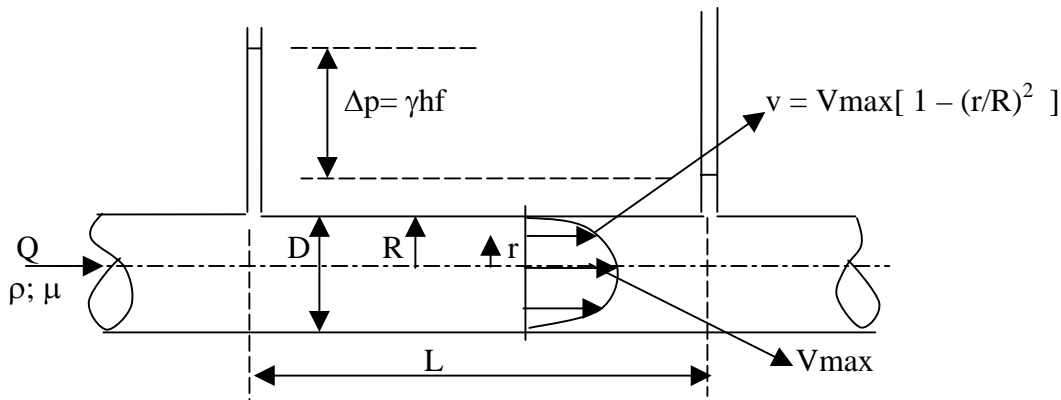
Assim:

$$\Delta h_{1,2} = \left( \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 \right) - \left( \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \right)$$

### 8.2.1.4-Equação de Hagen- Poiseuille(válida para regime Laminar)

A figura 8.4 mostra um trecho de um conduto por onde escoar um fluido em regime laminar. No regime laminar o fluido escoar em camadas ou lâminas de forma ordenada de forma que as trajetórias das partículas não se cruzam. O perfil de velocidades que se forma num escoamento em regime laminar é parabólico e para condutos cilíndricos a expressão da velocidade é dada por:  $v = V_{\max}[1 - (r/R)^2]$ , sendo  $v$  uma velocidade genérica quando o raio for  $r$ ,  $V_{\max}$  a velocidade máxima do escoamento que ocorre no centro do conduto e  $R$  raio do conduto.

A perda de carga  $\Delta p$  ou  $\gamma hf$  que ocorre entre duas seções de um conduto cilíndrico de diâmetro  $D$ , separadas por uma distância  $L$ , por está escoando a vazão  $Q$  de um fluido de massa específica  $\rho$ , viscosidade absoluta  $\mu$ , conforme a figura 8.4 é dada por



**Figura 8.4 - Perda de Carga no regime laminar**

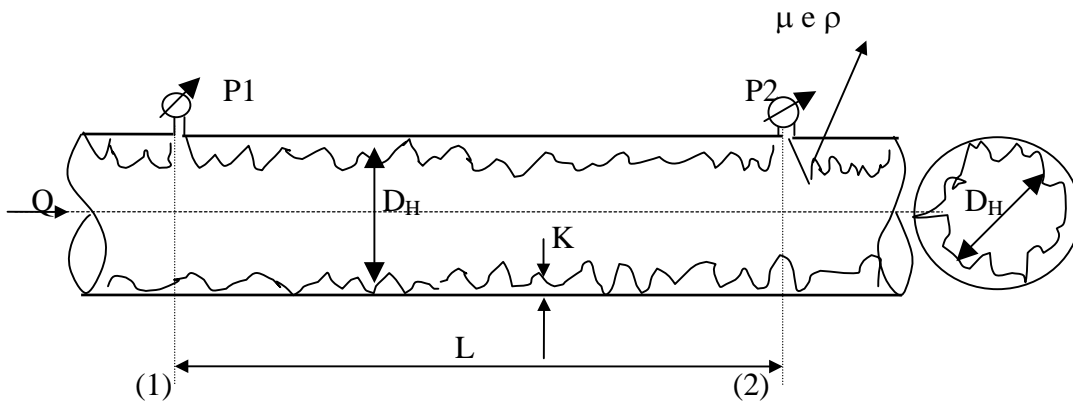
$$\Delta p = \frac{128 \cdot Q \cdot \mu \cdot L}{\pi \cdot D^4}; \text{ como } \mu = \rho \cdot \nu \text{ e } \gamma = \rho \cdot g \rightarrow hf = \frac{128 \cdot Q \cdot \nu \cdot L}{\pi \cdot D^4 \cdot g}$$

$$\text{OBS: Para regime laminar } Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \frac{V \cdot D}{\nu} \leq 2000$$

### 8.2.1.5-Fórmula Universal da Perda de Carga Distribuída

Na figura 8.5 mostra um trecho de um conduto de comprimento  $L$ , diâmetro hidráulico  $D_H$ , rugosidade parede  $K$ , por onde escoar uma vazão  $Q$  de um fluido com viscosidade absoluta  $\mu$ , massa específica  $\rho$  e peso específico  $\gamma$ , e está ocorrendo uma perda de carga  $\gamma hf = P_1 - P_2$ .

A função característica do fenômeno é  $f(\gamma hf, \rho, V, D_H, \mu, K, L) = 0$ . Escolhendo:  $\rho, V$  e  $D_H$  como base e aplicando a análise dimensional, vamos chegar nos seguintes adimensionais:



**Figura 8.5 - Perda de Carga em conduto qualquer**

$$\pi_1 = hf / (V^2/2g); \pi_2 = \frac{\rho \cdot V \cdot D_H}{\mu}; \pi_3 = \frac{L}{D_H} \text{ e } \pi_4 = \frac{D_H}{K}$$

Pela propriedades dos adimensionais podemos escrever:

$hf/V^2/2g = \phi(Re, L/D_H, D_H/K)$  e como  $hf \propto L/D_H$ , então:

$$hf = \frac{L}{D_H} \cdot \frac{V^2}{2g} \cdot \phi_1(Re, D_H/K)$$

$$hf_{1,2} = \phi(K/D_H, Re) \cdot \frac{L}{D_H} \cdot \frac{V^2}{2g}, \text{ onde: } Re = \frac{\rho V D_H}{\mu}$$

Chamando de  $f = \phi(K/D_H, Re)$  o coeficiente da perda de carga distribuída, então podemos escrever que:

$$hf_{1,2} = f \cdot \frac{L}{D_H} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

que é a fórmula Universal de Perda de Carga válida para qualquer conduto desde que se considere  $D_H$  e Para qualquer regime.

onde:

- $hf_{1,2}$  = perda de carga distribuída entre (1) e (2)
- $\mu$  = viscosidade dinâmica
- $\rho$  = massa específica
- $V$  = velocidade média do escoamento
- $D_H$  = diâmetro hidráulico
- $L$  = comprimento do trecho
- $K$  ou  $\epsilon$  = rugosidade interna da parede do tubo.

Os valores de  $f = \phi(Re, K/D_H)$ , obtém-se do diagrama de de Moody ou da Equação de Colebrook

$$\left(\frac{1}{\sqrt{f}}\right) = -2 \log \left(0,27 \frac{k}{D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}}\right)$$

**8.2.1.6-Fórmulação explícita para o Cálculo do Fator de Atrito (f) de Escoamento Forçado.****Problema I**

Dados : Q ; D ; v ; K; L e g

Incógnita :  $\Delta h$

$$Re = \frac{4Q}{\pi \cdot D v}$$

Para  $Re \leq 2500 \implies f = \frac{64}{Re}$  (Laminar)

Para  $Re \geq 4000$  e :

Para  $\frac{Re^{0,9}}{D/K} \leq 31 \implies f = (-2 \log (5,62/Re^{0,9}))^{-2}$  (Liso)

Para  $\frac{Re^{0,9}}{D/K} < 448 \implies f = (-2 \log (K/3,71D + 5,62/Re^{0,9}))^{-2}$  (Misto)

Para  $\frac{Re^{0,9}}{D/K} \geq 448 \implies f = (-2 \log (K/3,71D))^{-2}$  (Rugoso)

$$\Delta H = \frac{8fLQ^2}{\pi^2 D^5 g}$$

**Problema II**

Dados : D ; L ; v ; g; K; e  $\Delta H$

Incógnita : Q

$$N = \frac{D}{v} \sqrt{\frac{2gD\Delta H}{L}}$$

Para  $N \leq 400 \implies f = \left(\frac{64}{Re}\right)^2$  (Laminar)

Para  $(N/D)k \leq 14 \implies f = (-2 \log (2,51/N))^{-2}$  (Liso)

Para  $(N/D)k \geq 200 \implies f = (-2 \log (K/3,71D))^{-2}$  (Rugoso)

Para  $(N/D)k < 200 \implies f = (-2 \log (2,51/N + K/3,71D))^{-2}$  (Misto)

$$Q = \frac{\Pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2gD\Delta H}{fL}}$$

### **Problema III**

Dados : Q ; K ; v ; g ; L e  $\Delta H$

Incógnita : D

$$N = \frac{4Q}{K\Pi v}$$

$$M = \left( \frac{128gQ^3\Delta H}{\Pi^3 L} \right)^{1/5} \cdot \frac{1}{v}$$

Para  $M \leq 1200 \implies f = \frac{128}{N^{1,25}}$  (Laminar)

Para  $M \geq 2100$  e:

Para  $\frac{M^2}{N} \leq 17 \implies f = (-2 \log (4,15/M^{0,937}))^{-2}$  (Liso)

Para  $\frac{M^2}{N} < 236 \implies f = (-2 \log (4,15/M^{0,937} + \frac{0,38M^{1,042}}{N}))^{-2}$  (Misto)

Para  $\frac{M^2}{N} \geq 236 \implies f = (-2 \log (\frac{0,38M^{1,042}}{N}))^{-2}$  (Rugoso)

$$D = \left( \frac{8fQ^2 L}{g\Pi^2 \Delta H} \right)^{1/5}$$

### **Problema IV**

Dados : V ; K ; v ; g ; L e  $\Delta H$

Incógnita : D

$$N = \sqrt{\frac{V^3 L}{2g\Delta H v}}$$

$$M = \frac{VK}{v}$$

Para  $N \leq 312 \implies f = \frac{8}{N}$  (Laminar)

Para  $N \geq 316$  e:

Para  $\frac{M}{N^{1/6}} \leq 27 \implies f = (-2 \log (18,83/N^{1,5}))^{-2}$  (Liso)

Para  $\frac{M}{N^{1/6}} \leq 393 \implies f = (-2 \log (1,03 M/N^{5/3} + 18,83/N^{1,5}))^{-2}$  (Misto)

Para  $\frac{M}{N^{1/6}} > 393 \implies f = (-2 \log (1,03 M/N^{5/3}))^{-2}$  (Rugoso)

$$D = \frac{fLV^2}{\Delta H 2g}$$

### 8.2.1.7-Equações de Swamee e Jain

Válidas para :  $10^{-6} \leq K$  ou  $\varepsilon/D \geq 10^{-2}$  e  $5 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  com  $K$  ou  $\varepsilon$  (m) ,  $D$ (m) ;  $Re = 4Q/\pi Dv = VD/v$ ;  $Q$ (m<sup>3</sup>/s) ,  $v$ (m<sup>2</sup>/s)-viscosidade cinemática do fluido e  $V$ (m/s)

#### a)Determinação do coeficiente de atrito (f)

$$f = \frac{0,25}{\left\{ \log \left[ \frac{K}{3,7 D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right] \right\}^2}$$

#### b)Determinação da Perda de Carga Unitária J(m/m)

$$J = \frac{0,203 Q^2/gD^5}{\left\{ \log \left[ \frac{K}{3,7 D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right] \right\}^2}$$

#### c)Determinação da Vazão Q(m<sup>3</sup>/s).

$$\frac{Q}{D^2 \sqrt{gDJ}} = - \frac{\pi}{\sqrt{2}} \log \left[ \frac{K}{3,7 D} + \frac{1,78v}{D \sqrt{gDJ}} \right]$$

**d) Determinação do Diâmetro(m).**

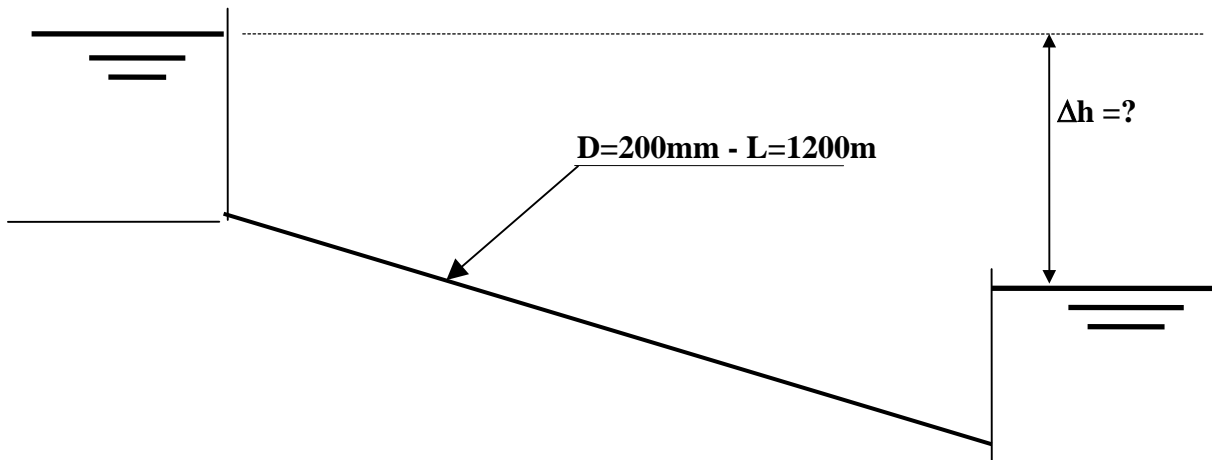
$$D \left[ \frac{g J}{Q^2} \right]^{0,2} = 0,66 \left\{ \left[ K \left( \frac{g J}{Q^2} \right)^{0,2} \right]^{1,25} + v \left( \frac{1}{g J Q^3} \right)^{0,2} \right\}^{0,4}$$

**8.2.1.8- Problemas envolvendo apenas perdas de carga distribuída.**

- 1o) Caso- Dados: L, DH, Q e K. Achar: hf  
 2o) Caso- Dados: L, DH, hf e K. Achar: Q  
 3o) Caso Dados: L, Q, hf e K. Achar: DH.  
 4o) Caso- Dados: L, V, hf e K. Achar: DH.

**8.2.1.9- Exercícios sôbre Perdas de Carga Distribuída Calculada pela Fórmula Universal de Perda de Carga.**

Problema I - Determinar a diferença de cota entre os reservatórios sabendo-se que escoou uma vazão de 31,42 L/s de água com  $v = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . O tubo é de ferro novo com  $k = 0,0001 \text{ m}$ .



SOLUÇÃO:

I) Pela formulação explícita

$$Re = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D \cdot v} = \frac{4 \cdot 0,03142}{\pi \cdot 0,20 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow Re = 200.025,93 > 4000 \text{ (regime turbulento)}$$

$$\frac{Re^{0,9}}{D/k} = \frac{200.025,93^{0,9}}{0,20/0,0001} = 29,50 \leq 31,0 \text{ (liso)}; \text{ logo : } f = (-2 \log(5,62/Re^{0,9}))^{-2}$$

$$f = (-2 \log(5,62/200.025,93^{0,9}))^{-2} \Rightarrow f = 0,01546$$

$$\Delta h = \frac{8 \cdot f \cdot L \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^5 \cdot g} = \frac{8 \times 0,01546 \times 1200 \times 0,03142^2}{\pi^2 \cdot 0,20^5 \times g} \Rightarrow \Delta h = 4,73 \text{ m}$$

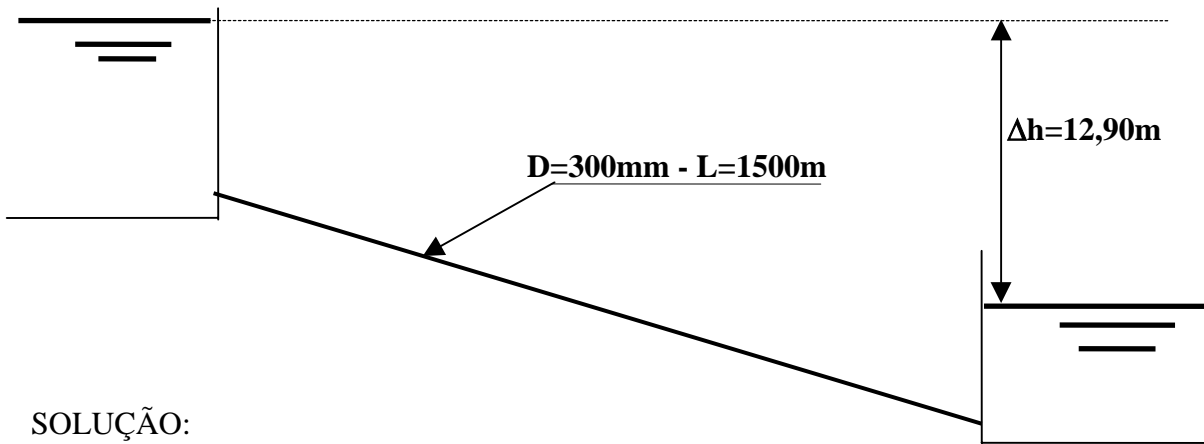
II) Pelas equações de Swamee e Jain.

$$f = \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{K}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} = \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{0,0001}{3,7 \times 0,20} + \frac{5,74}{200.025,93^{0,9}} \right) \right]^2}$$

$$f = 0,01893$$

$$\Delta h = \frac{8 \cdot f \cdot L \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^5 \cdot g} = \frac{8 \times 0,01893 \times 1200 \times 0,03142^2}{\pi^2 \cdot 0,20^5 \times g} \Rightarrow \Delta h = 5,78 \text{ m}$$

Problema II - Determinar a vazão que escoo pelo sistema da figura abaixo. Dados :  $D = 300 \text{ mm}$ ;  $k = 0,0001 \text{ m}$  (tubo de fofo novo) e  $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .



SOLUÇÃO:

I) Pela formulação explícita

$$N = \frac{D}{\nu} \sqrt{\frac{2g D \Delta h}{L}} = \frac{0,30}{10^{-6}} \sqrt{\frac{2 \times 9,81 \times 0,30 \times 12,90}{1500}} \Rightarrow N = 67.496,40$$

$(N/D)K = (67.496,40/0,30)0,0001 = 22,50 < 200$  (misto), logo :

$$f = (-2 \log(2,51N + k/3,71D))^{-2} = (-2 \log(2,51 \times 67.496,40 + 0,0001/3,71 \times 0,30))^{-2} \Rightarrow$$

$$f = 0,01647$$

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta h}{f L}} = \frac{\pi \cdot 0,30^2}{4} \sqrt{\frac{2g \cdot 12,90}{0,01647 \times 1500}} \Rightarrow Q = 0,1239 \text{ m}^3/\text{s}$$

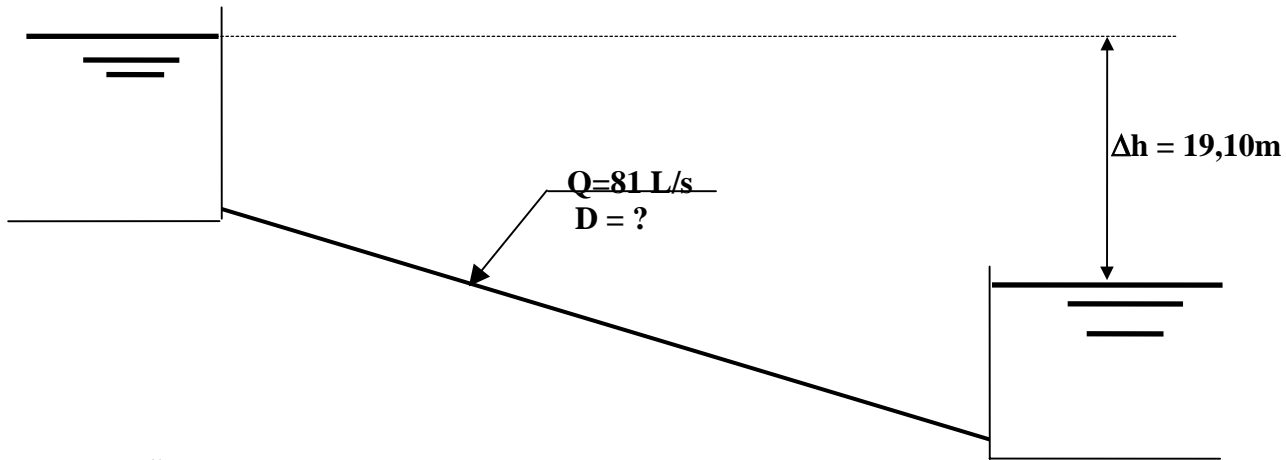
II) Pelas equações de Swamee e Jain.

$$\frac{Q}{D^2 \sqrt{g D J}} = -\frac{\pi}{\sqrt{2}} \log \left[ \frac{K}{3,7 D} + \frac{1,78 \nu}{D \sqrt{g D J}} \right]; J = \frac{\Delta h}{L} = \frac{12,90}{1500} \Rightarrow J = 0,0086 \text{ m/m}$$

$$\frac{Q}{0,30^2 \sqrt{g \cdot 0,30 \times 0,0086}} = - \frac{\pi}{\sqrt{2}} \log \left[ \frac{0,0001}{3,7 \times 0,30} + \frac{1,78 \times 10^{-6}}{0,30 \sqrt{g \times 0,30 \times 0,0086}} \right]$$

$$Q = 0,12388 \text{ m}^3/\text{s}$$

Problema III - Determinar o diâmetro da canalização da figura abaixo, sabendo-se que ela é de fofo com  $k = 0,0001\text{m}$  e que escoava uma vazão de  $81 \text{ L/s}$  de água com  $v = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .



SOLUÇÃO:

I) Pela formulação explícita

$$N = \frac{4Q}{K \cdot \pi \cdot v} = \frac{4 \times 0,081}{0,0001 \cdot \pi \cdot 10^{-6}} \rightarrow N = 1.031.324.031$$

$$M = \left( \frac{128 \cdot g \cdot Q^3 \cdot \Delta h}{\pi^3 \cdot L} \right)^{1/5} \left( \frac{1}{v} \right) = \left( \frac{128 \cdot g \cdot 0,081^3 \cdot 19,10}{\pi^3 \cdot 2000} \right)^{1/5} \left( \frac{1}{10^{-6}} \right) \rightarrow M = 183.053,30$$

$$\frac{M^2}{N} = \frac{183.053,30^2}{1.031.324.031} = 32,49 < 236 \text{ (misto)}. \text{ Logo: } f = \left( -2 \log \left( \frac{4,15}{M^{0,937}} + \frac{0,38 \times M^{1,042}}{N} \right) \right)^{-2}$$

$$f = \left( -\log \left( \frac{4,15}{183.053,30^{0,937}} + \frac{0,38 \times 183.053,30^{1,042}}{1.031.324.031} \right) \right)^{-2} \rightarrow f = 0,017371$$

$$D = \left( \frac{8 \cdot f \cdot Q^2 \cdot L}{g \cdot \pi \cdot \Delta h} \right)^{1/5} = \left( \frac{8 \cdot 0,017371 \cdot 0,081^2 \cdot 2000}{g \cdot \pi \cdot 19,10} \right)^{1/5} \rightarrow D = 0,250\text{m}$$

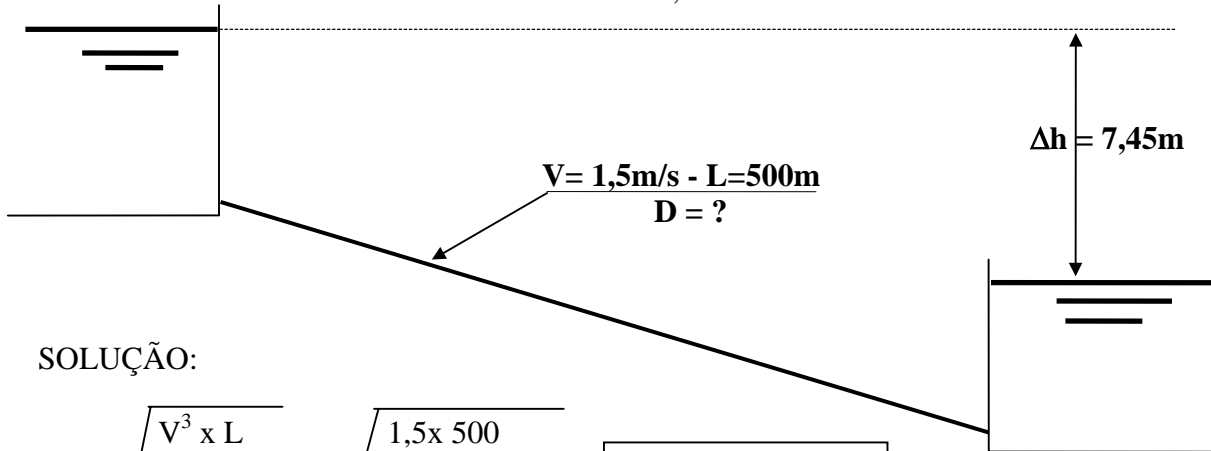
II) Pelas equações de Swamee e Jain.

$$D \left[ \frac{g \cdot J}{Q^2} \right] = 0,66 \left\{ \left[ K \left( \frac{g \cdot J}{Q^2} \right)^{0,2} \right]^{1,25} + v \left[ \frac{1}{g \cdot J \cdot Q^3} \right]^{0,2} \right\}^{0,04} ; J = \frac{19,10}{2000} = 0,00955\text{m/m}$$

$$D \left[ \frac{g \cdot 0,00955 \cdot 0,2}{0,081^2} \right] = 0,66 \left\{ \left[ \frac{0,0001 \cdot (g \cdot 0,00955 \cdot 0,2 \cdot 1,25)}{0,081^2} \right] + 10^{-6} \left[ \frac{1}{g \cdot 0,00955 \cdot 0,081^3} \right] \right\}$$

$$D = 0,0254\text{m}$$

Problema IV - Determinar o diâmetro de uma canalização onde escoar água com a velocidade de 1,5m/s. O tubo é de ferro novo com  $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  e  $k=0,0001\text{m}$ .



SOLUÇÃO:

$$N = \sqrt{\frac{V^3 \cdot L}{2g \cdot \Delta h \cdot \nu}} = \sqrt{\frac{1,5^3 \cdot 500}{2g \cdot 7,45 \cdot 10^{-6}}} \rightarrow N = 3399,505 \geq 316$$

$$M = \frac{V \cdot K}{\nu} = \frac{1,5 \cdot 0,0001}{10^{-6}} = 150 \rightarrow M = 150$$

$$\frac{M}{N^{1/6}} = \frac{150}{3399,505^{1/6}} = 38,6832 \leq 393 \text{ (misto) . Logo :}$$

$$f = (-2 \log(\frac{1,03 \cdot M}{N^{5/3}} + \frac{18,83}{N^{1,5}}))^{-2} \rightarrow f = (-2 \log(\frac{1,03 \cdot 150}{3399,505^{5/3}} + \frac{18,83}{3399,505^{1,5}}))^{-2} \rightarrow f = 0,0200$$

$$D = \sqrt{\frac{f \cdot L \cdot V^2}{\Delta h \cdot 2g}} = \sqrt{\frac{0,0200 \cdot 500 \cdot 1,5^2}{7,45 \cdot 2g}} \rightarrow D = 0,154\text{m}$$

Exemplo do caso laminar- Calcular a perda de carga devida ao escoamento de 22,5L/s de um óleo com  $\nu = 0,0001756\text{m}^2/\text{s}$  de uma canalização de aço de 0,15m de diâmetro e 2500m de extensão.

$$Re = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D \cdot \nu} = \frac{4 \cdot 0,0225}{\pi \cdot 0,15 \cdot 1,756 \cdot 10^{-4}} \rightarrow Re = 1087,62 > 2000 \text{ (regime laminar)}$$

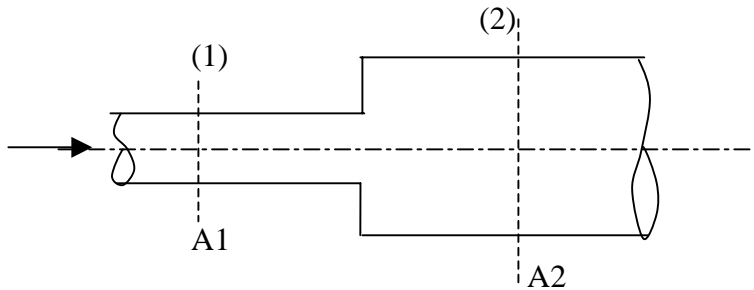
$$\Delta h = hf = \frac{128 \cdot Q \cdot \nu \cdot L}{\pi \cdot D^4 \cdot g} = \frac{128 \cdot 0,0225 \cdot 0,0001756 \cdot 2500}{\pi \cdot 0,15^4 \cdot g} \rightarrow \Delta h = hf = 81,04\text{m}$$

### 8.3-Perdas de Cargas Localizadas ou singulares( $h_s$ )

São aquelas causadas por uma perturbação brusca do escoamento: presença de válvula, variação de seção, mudança de direção, etc.

Na perda de carga localizada a função característica do fenômeno é a seguinte:  $F(\gamma h_s, V, D, \rho, \mu)$ , grandezas geométricas características da singularidades).

No caso do alargamento brusco da figura 8.6 as seções (1) e (2) são as grandezas características da singularidade.



**Figura 8.6 – Alargamento brusco**

Aplicando a Análise Dimensional, obtemos a seguinte expressão:

$$h_s = \frac{V^2}{2g} \times \phi(\text{Re}, \text{coeficientes adimensionais de forma})$$

Chamando de  $K_s = \phi(\text{Re}, \text{coeficiente adimensionais de forma})$  podemos escrever que:

$$h_s = K_s \frac{V^2}{2g}$$

Para o alargamento brusco  $K_s = \phi(\text{Re}, A_1/A_2)$ . Para Re elevado  $>50.000$ ,  $K_s$  é função apenas dos coeficientes adimensionais de forma.

A perda de carga localizada ou singular pode ser calculada por:

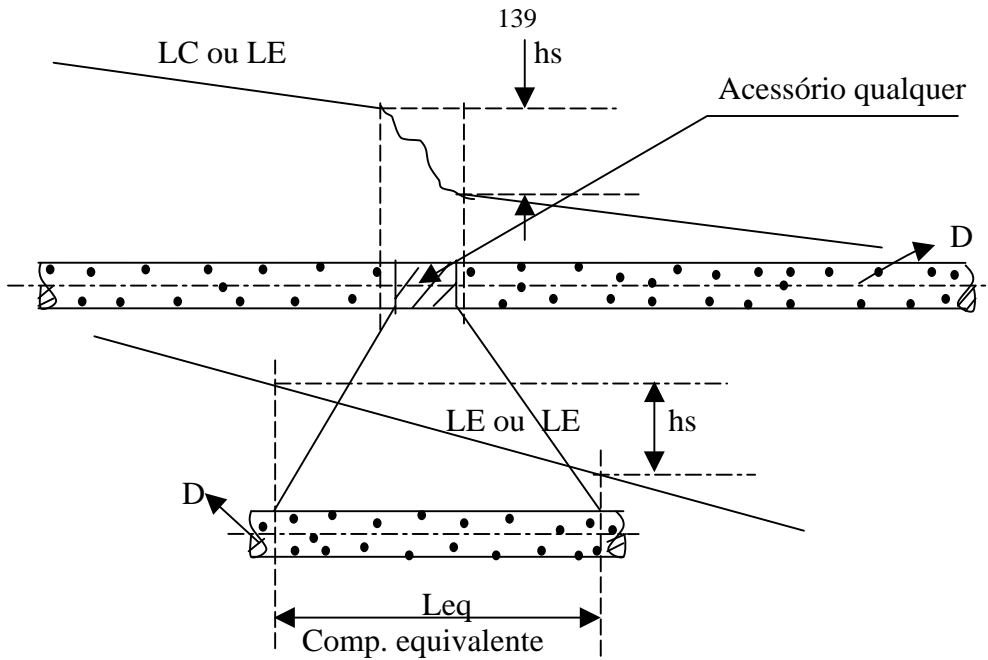
a) Pelo método dos  $K_s$

$$h_s = K_s \frac{V^2}{2g}$$

Obs: Os valores dos diversos  $K_s$  estão tabelados e se encontram na tabela II

b) Perdas de Carga singulares pelo método dos comprimentos equivalentes

Normalmente a perda de carga localizada ou singular é calculada pelo método dos comprimentos equivalentes. Neste método, para efeito de cálculo, cada peça especial é substituído por um comprimento fictício de canalização retilínea de seção constante, que produz a mesma perda de carga  $h_s$ , da peça. A figura 8.7 ilustra este fato.



**Figura 8.7 - Comprimento Equivalente de um Acessório Qualquer.**

Neste caso a perda de carga  $h_s$  será calculada pôr:

$$h_s = \frac{f L_{eq} V^2}{D 2g} \quad \text{ou} \quad h_s = J \cdot L_{eq}, \quad \text{sendo :}$$

$L_{eq}$  = o comprimento equivalente do acessório;

$J$  = perda de carga unitária na canalização

Na prática os comprimentos equivalentes para os diversos acessórios podem ser calculados a partir da tabela I e para até os diâmetros de 350mm podem ser obtidos das tabelas III ; IV e V.

A perda de carga total pode ser calculada pôr:

$$H_p = \frac{f L_{real} V^2}{D 2g} + \frac{f L_{eq} V^2}{D 2g}$$

$$H_p = f \frac{(L_{real} + L_{eq}) V^2}{D 2g}$$

$$H_p = \frac{f L_T \cdot V^2}{D 2g}$$

A perda de carga total pode ainda ser calculada pôr:

$$H_p = J(L_{real} + L_{eq}) \quad \text{ou} \quad H_p = J \cdot L_T$$

### 8.3.1-Relação entre o comprimento equivalente $Leq$ e o coeficiente $Ks$

$$hs = Ks \frac{V^2}{2g} = hs = f \frac{Leq}{D} \frac{V^2}{2g} \Rightarrow Leq = Ks \frac{D}{f}$$

Tabela I - Comprimentos equivalentes em diâmetros de canalizações retilíneas

PEÇA	Comprimentos expressos em diâmetros
Ampliação gradual	12D
Cotovelo 90°	45D
Cotovelo 45°	20D
Curva 90°	30D
Curva 45°	15D
Entrada normal	17D
Entrada de borda	35D
Junção	30D
Redução gradual	6D
Registro de gaveta aberto	8D
Registro de globo aberto	350D
Registro de angulo aberto	170D
Saída de canalização	35D
Te passagem direta	20D
Te saída de lado	50D
Te saída bilateral	65D
Válvula de pé com crivo	250D
Válvula de retenção	100D

Tabela II - Valores aproximados de  $Ks$

PEÇAS	$Ks$	PEÇAS	$Ks$
Ampliação gradual	0,30*	Junção	0,40
Bocais	2,75	Medidor Venturi	2,50**
Comporta aberta	1,00	Redução gradual	0,15*
Controlador de vazão	2,50	Registro de angulo aberto	5,00
Cotovelo 90°	0,90	Registro de gaveta aberto	0,20
Cotovelo 45°	0,40	Registro globo aberto	10,00
Crivo	0,75	Saída de canalização	1,00
Curva de 90°	0,40	Te passagem direta	0,60
Curva 45°	0,20	Te passagem de lado	1,30
Curva 22° 30'	0,10	Te passagem bilateral	1,80
Entrada normal de canalização	0,50	Válvula de pé	1,75
Entrada de borda	1,00	Válvula de retenção	2,50
Existência de pequena derivação	0,03		

Obs.: \* Com base na velocidade maior (seção menor)

\*\*Relativa a velocidade na canalização



Diâmetro Nominal (poleg.)	Saída de Canalização	Entrada Normal	Entrada de borda	Registro de gaveta aberto	Registro de globo aberto	Registro de ângulo aberto	Válvula de pé e crivo	Válvula de retenção	
								Tipo leve	Tipo pesado
1/2	0,4	0,2	0,4	0,1	4,9	2,6	3,6	1,1	1,6
3/4	0,5	0,2	0,5	0,1	6,7	3,6	5,6	1,6	2,4
1	0,7	0,3	0,7	0,2	8,2	4,6	7,3	2,1	3,2
1.1/4	0,9	0,4	0,9	0,2	11,3	5,5	10,0	2,7	4,0
1.1/2	1,0	0,5	1,0	0,3	13,4	6,7	11,6	3,2	4,0
2	1,5	0,7	1,5	0,4	17,4	6,5	14,0	4,2	6,4
2.1/2	1,9	0,9	1,9	0,4	21,0	10,0	17,0	5,2	8,1
3	2,2	1,1	2,2	0,5	26,0	13,0	20,0	6,3	9,7
4	3,2	1,6	3,2	0,7	34,0	17,0	23,0	8,4	12,9
5	4,0	2,0	4,0	0,9	43,0	21,0	30,0	10,4	16,1
6	5,0	2,5	5,0	1,1	51,0	26,0	39,0	12,5	19,3

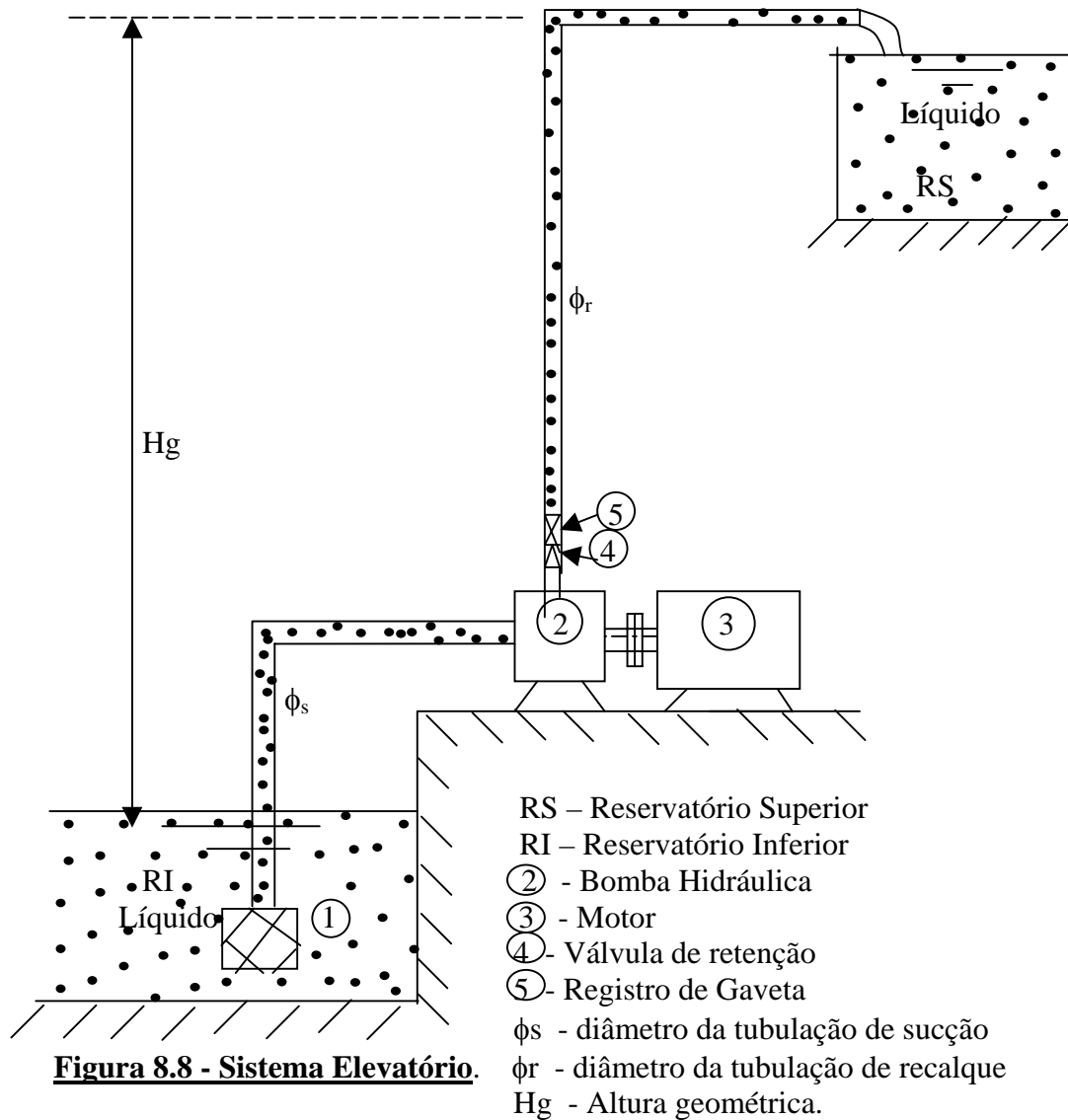
**TABELA IV - COMPRIMENTO EQUIVALENTE EM METROS DE CANALIZAÇÕES AÇOS GALVANIZADOS PARA VÁLVULAS, ENTRADAS E SAÍDAS DE CANALIZAÇÕES**

Diâmetro	Referência	Joelho		Curva 45°	Curva 90°	T890° Pass. Direto	T890° Saída de Lado	T890° Saída Diagonal	Entrada Normal	Entrada 45° Borda	Saída de Canaliz.	Válvula de Crivo	Válvula Retenção		Registro Globo Aberto	Registro Gaveta Aberto	Registro Angular Aberto
		90°	45°										tipo Lave	tipo Peça de			
15	1/2	1,1	0,4	0,2	0,4	0,7	2,3	2,3	0,3	0,9	0,8	6,1	2,5	3,6	11,1	0,1	5,9
20	3/4	1,2	0,5	0,3	0,5	0,8	2,4	2,4	0,4	1,0	0,9	9,5	2,7	4,1	11,4	0,2	6,1
25	1	1,5	0,7	0,4	0,6	0,9	3,1	3,1	0,5	1,2	1,3	13,3	3,8	5,8	15,0	0,3	6,4
32	1 1/4	2,0	1,0	0,5	0,7	1,5	4,6	4,6	0,6	1,8	1,4	18,5	4,9	7,4	22,0	0,4	10,5
40	1 1/2	3,2	1,0	0,6	1,2	2,2	7,3	7,3	1,0	2,3	3,2	18,3	6,8	9,1	35,8	0,7	17,0
50	2	3,4	1,3	0,7	1,3	2,3	7,6	7,6	1,5	2,8	3,3	23,7	7,1	10,8	37,9	0,8	18,5
60	2 1/2	3,7	1,7	0,8	1,4	2,4	7,8	7,8	1,6	3,3	3,5	25,0	8,2	12,5	38,0	0,9	19,0
75	3	3,9	1,8	0,9	1,5	2,5	8,0	8,0	2,0	3,7	3,7	26,8	9,3	14,2	40,0	0,9	20,0
100	4	4,3	1,9	1,0	1,6	2,6	8,3	8,3	2,2	4,0	3,9	28,6	10,4	16,0	42,3	1,0	22,1
125	5	4,9	2,4	1,1	1,9	3,3	10,0	10,0	2,5	5,0	4,9	37,4	17,5	19,2	50,9	1,1	25,2
150	6	5,4	2,6	1,2	2,1	3,8	11,1	11,1	2,8	5,6	5,5	43,4	13,9	21,4	56,7	1,2	28,9

TABELA V - COMPRIMENTO EQUIVALENTE EM METROS DE CANALIZAÇÕES DE PVC RÍGIDO OU COBRE

### 8.4-Sistema Elevatório

Para transpor fluidos vencendo desnível e distância, utiliza-se um ou mais conjuntos elevatórios que são constituídos de bombas hidráulicas e motores elétricos. Ao conjunto formado pelas bombas, motores elétricos, as tubulações de sucção e de recalque, e mais os reservatórios denomina-se sistema de elevatório. A figura 8.8 mostra um exemplo de sistema elevatório e os elementos que normalmente os compõe.



**Figura 8.8 - Sistema Elevatório.**

①-válvula de pé com crivo. Em algumas instalações de grande porte as válvulas de pé são substituídas por outro sistema de escorva. Como por exemplo sistema de ejetor, bombas de vácuo.

Ao conjunto de tubos e peças instaladas antes da bomba(entre o reservatório inferior e a bomba)denomina-se tubulação de sucção. E os tubos e peças instaladas entre a bomba e o reservatório superior denomina-se tubulação de recalque.

#### 8.4.1 - Altura Manométrica -Hm.

A energia que a bomba fornece a água denomina-se altura manométrica e é normalmente , simbolizada por  $H_m$ . A altura manométrica é dada por:

$$H_m = H_g + \text{perdas}(\text{na sucção} + \text{no recalque})$$

onde:  $H_m$  - altura manométrica em m;

$H_g$  - desnível entre o reservatório inferior e o superior em m;

### **8.4.2 - Potência Necessária ao Acionamento da Bomba( $P_B$ )**

A potência necessária ao acionamento da bomba é dada por:

$$P_B = \frac{\gamma Q \cdot H_m}{75 \eta_B}$$

onde:  $P_B$  - potência da bomba em CV;  $\gamma$  - peso específico em  $\text{kgf/m}^3$

$H_m$  - altura manométrica em m;  $Q$  - vazão em  $\text{m}^3/\text{s}$

$\eta_B$  - rendimento da bomba.

Na pratica recomenda-se que a potência instalada seja a potência do motor comercial imediatamente superior a potência necessária ao acionamento da bomba. Assim, para que não sobrecarregue o motor deve-se adotar a margem de segurança indicada na tabela VI.

POTENCIA CALCULADA	MARGEM DE SEGURANÇA(recomendada)
Até 2 CV	50%
De 2 a 5 CV	30%
De 5 a 10 CV	20%
De 10 a 20 CV	15%
Acima de 20 CV	10%

Tabela VI - Margem de segurança para escolha do motor

### **8.4.3-Cavitação**

Equação de Bernoulli entre as seções (0) e (e)

$$H_o = H_e + H_{p,o,e} \Rightarrow \frac{P_o}{\gamma} + \frac{V_o^2}{2g} + z_o = \frac{P_{e,abs}}{\gamma} + \frac{V_e^2}{2g} + z_e + h_{fs} + h_{ss}$$

onde :  $P_o = P_{atm}$

$$\frac{P_o}{\gamma} + \frac{V_o^2}{2g} + z_o = \frac{P_{e,abs}}{\gamma} + \frac{V_e^2}{2g} + z_e + h_{fs} + h_{ss}$$

$$\frac{P_{eabs}}{\gamma} = \frac{P_{atm}}{\gamma} - \left( \frac{V_e^2}{2g} + z_e + h_{fs} + h_{ss} \right)$$

Sendo  $P_{v_{abs}}$  a pressão de vapor do líquido à temperatura de escoamento, se acontecer que:

$P_{eabs} < P_{v_{abs}}$  temos o fenômeno da cavitação (formação de vapor do líquido) que ao atingir pontos de maior pressão se condensam bruscamente o que, causa a diminuição do rendimento das máquinas, destruição dos componentes internos das máquinas principalmente do rotor.

A cavitação é avaliada pelo termo conhecido por NPSH (Net Positive Suction Head). Podemos distinguir: NPSHr-requerido e NPSHd-disponível

NPSHr - é a energia do líquido que a bomba, necessita para funcionar satisfatoriamente. É uma característica de cada bomba e o seu valor é determinado em testes de laboratórios ou através de cálculos.

NPSHd - é a energia disponível do líquido, na boca da sucção da bomba. É uma característica de cada sistema (instalação)

"Condições imprescindível de bom funcionamento da bomba (sem cavitação)"

$NPSHd > NPSHr$  . Para atender a Norma Brasileira devemos ter:

$$NPSHd > 1,2 NPSHr \text{ ou } > NPSHr + 0,5m \text{ (o que for maior)}$$

$$NPSHd = \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} \pm z_e - H_{p0,e}$$

onde:  $P_{atm}$  = pressão atmosférica local;  $P_v$  = pressão de vapor do líquido na temperatura de bombeamento;  $z_e$  = altura estática de sucção e  $H_{p0,e}$  = perda de carga na sucção.

#### 8.4.3.1-Pressão de vapor para a água em metro

T(°C)	0	10	20	30	50	100
$P_v/\gamma(m)$	0,063	0,125	0,236	0,429	1,250	10,330

#### 8.4.3.2-Pressão atmosférica em função da altitude

Cota acima nível do mar(m)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
$P_{atm}/\gamma(m)$	10	9,8	9,5	9,3	9,1	8,9	8,7	8,5	8,3	8,1	7,8

A pressão atmosférica local pode ser calculada em mm de Hg em função da altitude local através da expressão:

$$P_{atm} = 760 - 0,081h \text{ (mm Hg) onde:}$$

$P_{atm}$  = pressão atmosférica local em mm de Hg e  
 $h$  = altitude local em metros.

#### 8.4.4-Curvas Características de uma Bomba.

A representação gráfica das variações da altura manométrica total ( $H_m$ ), NPSHr, Potência P, rendimento em função da vazão Q fornece o que se denomina curvas características de uma bomba.

Estas curvas são obtidas mantendo-se a velocidade constante. A figura 8.9 mostra as curvas características da bomba Meganorm da KSB com 1750 rpm.

#### **8.4.4.1- Variações das curvas características.**

a) Com o diâmetro do rotor da bomba.

As carcaças das bombas podem trabalhar com rotores de diâmetros diferentes e para cada diâmetro teremos uma curva correspondente. Para uma rotação constante, a variação do diâmetro do rotor da origem as curvas características paralelas sendo que as curvas superiores referem-se aos rotores de maiores diâmetros. Mudando os diâmetros dos rotores valem as seguintes relações:

$$\frac{Q_2}{Q_1} \approx \frac{H_2}{H_1} \approx \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \quad \text{ou} \quad D_2 \approx D_1 \sqrt{\frac{Q_2}{Q_1}} \approx D_1 \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}$$

Estas fórmulas não são aplicáveis quando o diâmetro do rotor variar mais de 10%. Antes de executar o rebaixamento do diâmetro do rotor é recomendável consultar o fabricante da bomba.

b) Com a variação da rotação.

Quando variamos a rotação de uma bomba permanecendo o mesmo diâmetro do rotor tem-se:

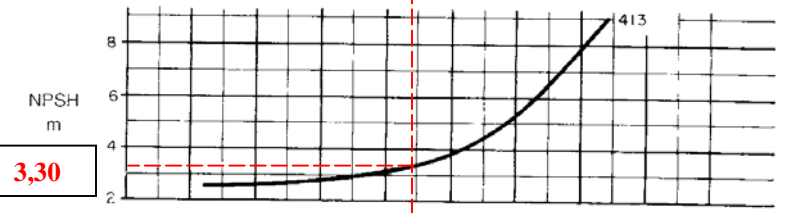
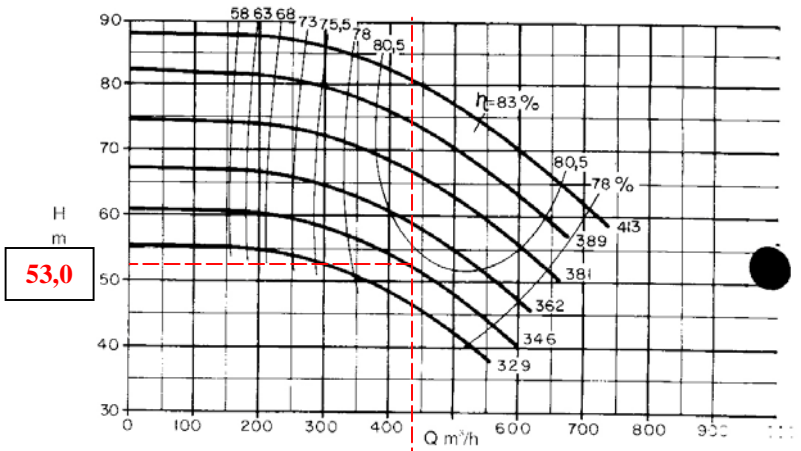
$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1}; \quad \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2; \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3$$

onde: Q = e a vazão a recalcar;      D = diâmetro do rotor;  
 P = potência consumida,      H = altura manométrica total;  
 n = rotação da bomba.

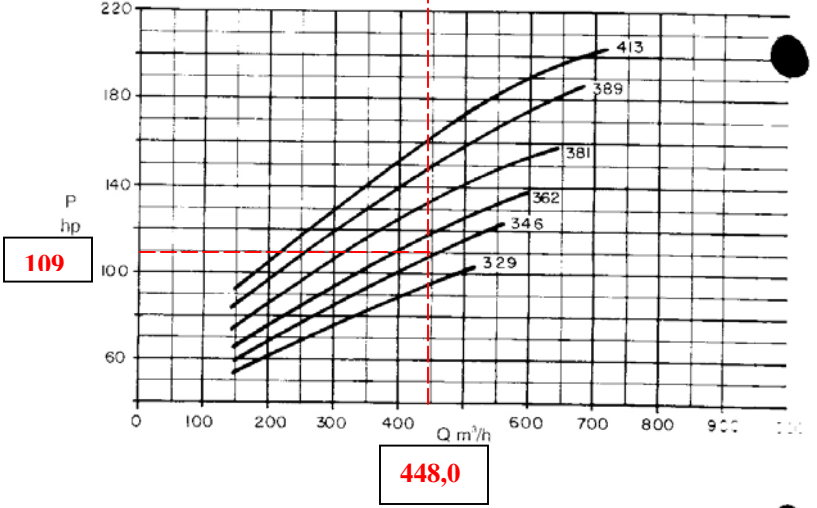
Observação: os índices 1 das formulas referem-se a situação inicial e os índices 2 a uma nova situação.

Bomba Tipo Pump Type Tipo de Bomba	<b>KSB MEGANORM KSB MEGACHEM</b>	Tamanho Size Tamaño	<b>150-400</b>	<b>KSB b.</b>
Oferta n° Project - No. Oferta - n°	Item n° Item - No. Pos. - n°	Velocidade Nominal Nom. Rotative Speed Velocidad Nominal	<b>1750 rpm</b>	

Altura Manométrica  
Head  
Altura Manométrica



Potência Necessária  
Shaft Power  
Potencia Necesaria



Dados válidos para densidade de 1 Kg/cm³ e viscosidade cinemática até 20 mm²/s.  
Data applies to a density of 1 Kg/cm³ and Kinematic viscosity up to 20 mm²/s.  
Datos válidos para densidad 1 Kg/cm³ y viscosidad cinemática hasta 20 mm²/s.

Garantia das características de funcionamento conforme ISO 9906 anexo D.  
Operating data according to ISO 9906 attachment D.  
Garantía de las características de funcionamiento según ISO 9906 anexo D.

**Figura 8.9-Curvas características de Bombas**

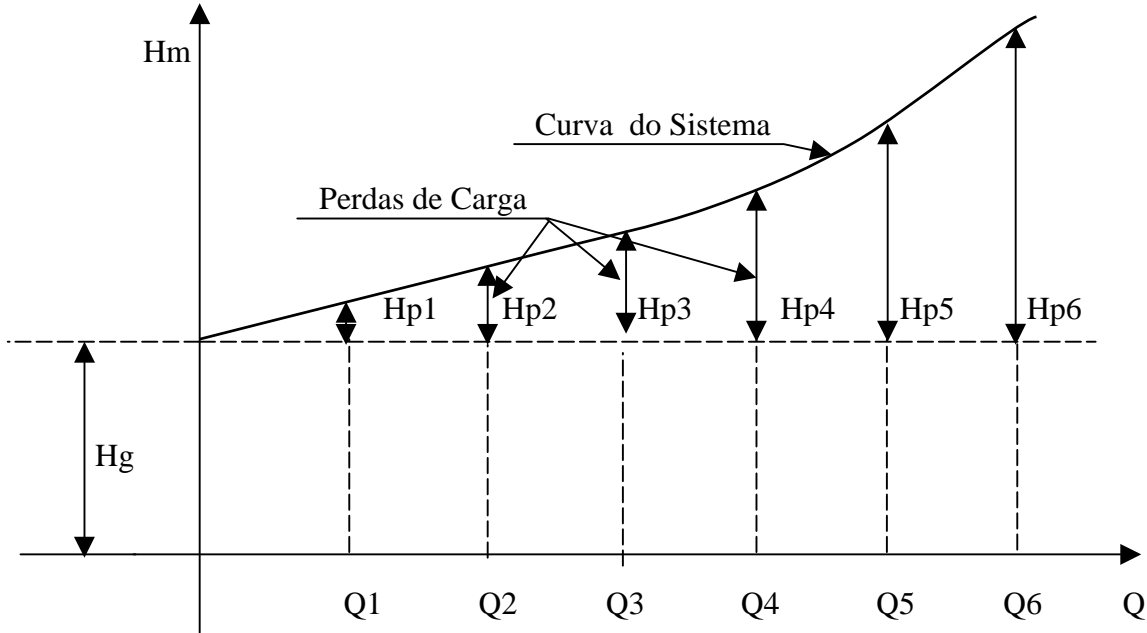
### 8.4.5-Curva do Sistema . Ponto de Operação.

#### 8.4.5.1-Curva do Sistema.

É a variação das alturas manométricas totais requeridas pelo sistema em função da vazão:

$$H_m = H_g + \text{perdas} = H_g + H_{pr} + H_{ps}.$$

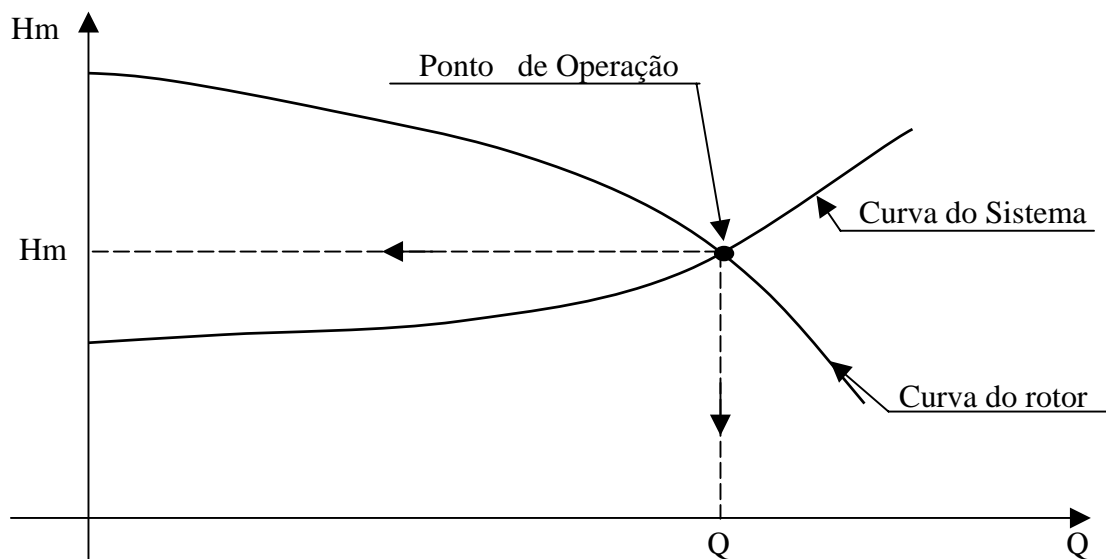
A figura 8.10 mostra esquematicamente a curva do sistema.



**Figura 8.10 - Curva do Sistema.**

#### 8.4.5.2-Ponto de Operação.

O encontro da curva do sistema com a curva do rotor ( $H_m \times Q$ ) nos fornece o ponto de operação da bomba. A figura 8.11 mostra o ponto de operação.



**Figura 8.11 - Ponto de operação.**

## 8.5-Fórmulas Práticas para Cálculo de Perda de Carga em Tubulações.

### 8.5.1-Fórmula de Hazen-Willians.

Entre as fórmulas empíricas para cálculos de condutos é a mais largamente utilizada. Pode ser também utilizada para condutos livre. A fórmula de Hazen-Willians tem a seguinte expressão:

$$Q = 0,2785.C.D^{2,63} \left( \frac{\Delta h}{L} \right)^{0,54}$$

onde: Q = vazão em m<sup>3</sup>/s,

D = diâmetro em m,

$\Delta h$  = perda de carga no trecho em m,

L = comprimento do trecho em m

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

A tabela VII dada a seguir fornece os valores dos coeficientes C para os tubos de diversos materiais:

**Tabela VII – Valores de C da Fórmula de Hazen-Willians**

MATERIAIS	COEFICIENTE C
Aço corrugado(chapa ondulada)	60
Aço com junta lock-bar(tubos novos)	130
Aço com junta lock-bar(em serviço)	90
Aço galvanizado	125
Aço rebitado novos	110
Aço rebitado , em uso	85
Aço soldado, novos	130
Aço soldado , em uso	90
Aço soldado com revestimento especial	130
Chumbo	130
Cimento-amianto	140
Cobre	130
Concreto com bom acabamento	130
Concreto com acabamento comum	120
Ferro fundido novo	130
Ferro fundido(sem revestimento),após 15-20 anos	100
Ferro fundido(sem revestimento) usados	90
Ferro fundido com revestimento de cimento	130
Grês cerâmico vidrado(manilhas)	110
Latão	130
Madeira em aduelas	120
Tijolos, condutos bem executados	100
Vidro	140
Plástico	140

**Observação:** O valor do coeficiente C principalmente nas canalizações metálicas não revestidas tende a diminuir com o correr do tempo, aumentando a rugosidade interna dos tubos e diminuindo a sua capacidade de transporte de fluidos.

### 8.5.2-Fórmulas de Fair-Whipple-Hsiao e de Flamant.

Estas duas formulas são indicadas para diâmetros pequenos(instalações prediais e industriais)onde quase sempre os diâmetros são menores que 150mm.

#### 8.5.2.1-Fair-Whipple-Hsiao.

Para tubo de aço galvanizado, conduzindo água fria:

$$Q = 27,113 \cdot D^{2,596} \cdot J^{0,532}$$

Para cobre ou latão conduzindo água fria:

$$Q = 55,934 \cdot D^{2,71} \cdot J^{0,57}$$

Para cobre ou latão conduzindo água quente:

$$Q = 63,281 \cdot D^{2,71} \cdot J^{0,57}$$

#### 8.5.2.2-Flamant

$$\frac{D \cdot J}{4} = b \sqrt[4]{\frac{7}{V \cdot D}}$$

onde: b é um coeficiente que depende da natureza(material e estado) das paredes internas dos tubos.Assim:

Para tubos de PVC rígido b=0,000135 e a formula de Flamant fica:

$$Q = 57,85 \cdot J^{0,571} \cdot D^{2,71}$$

Para tubos de aço ou ferro fundido usado conduzindo água fria b=0,00023 e a formula de Flamant passa a ter a seguinte expressão:

$$Q = 42,735 \cdot J^{0,571} \cdot D^{2,71}$$

Para tubos de ferro fundido novo conduzindo água fria o coeficiente b = 0,000185 e a fórmula de Flamant passa a ter a seguinte expressão:

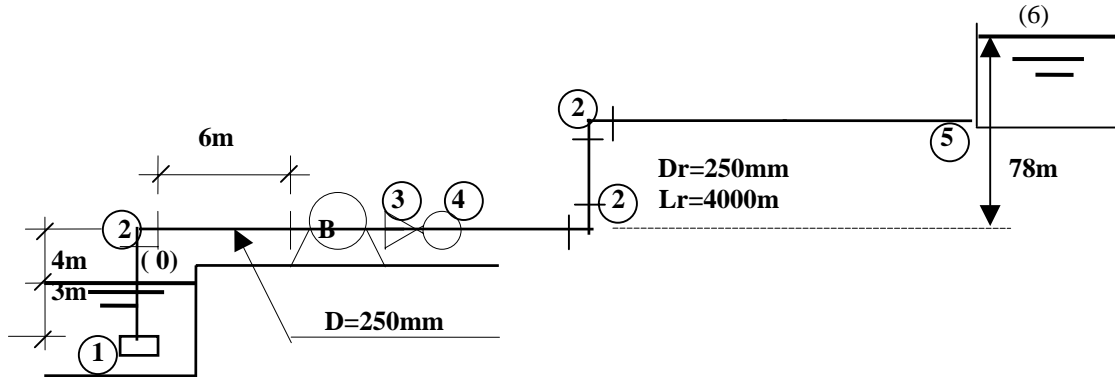
$$Q = 48,30 \cdot J^{0,571} \cdot D^{2,71}$$

## 8.6-Emprego de Nomogramas

Para a solução rápida dos problemas que envolvam perda de carga em encanamentos, podem ser utilizados ábacos das formulas de Hazen-Williams ,Flamant e de Fair-Whipple-Hsiao.

### Exemplos:

1)Sabendo-se a bomba da fig.2 recalca água do reservatório inferior ao superior e sendo dados: $k=0,15\text{mm}$ ,  $v=10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ ;  $\text{NPSHr}= 5\text{m}$  ; Altitude local =600m; Temperatura da água =  $30^\circ\text{C}$ ;  $\gamma\text{H}_2\text{O}=9810\text{N}/\text{m}^3$  e  $\text{HP}_{0,6}=25\text{m}$ , determinar: a) a vazão b) a potência da bomba se  $\eta_B= 72\%$  ; c) o NPSHd e verificar se a bomba está bem instalada. 1-válvula de pé com crivo 2-cotovelo raio longo  $90^\circ$ ; 3-válvula de retenção tipo leve; 4-registro de gaveta ; 5-saída de canalização.



### Solução:

Comprimento das tubulações:

a) de sucção

1-válvula de pé com crivo de 250mm-----	65,00m
2-Cotovelo raio longo de $90^\circ \times 250\text{mm}$ -----	7,90m
Comprimento real da sucção-----	13,00m

$$\boxed{L_{ts} = 85,90\text{m}}$$

a) de recalque

3-válvula de retenção de 250mm-----	20,00m
4-registro de gaveta de 250mm-----	1,70m
2-Cotovelo raio longo de $90^\circ \times 250\text{mm}$ (2x7,9)-----	15,80m
5-saída de canalização-----	7,50m
Comprimento real da sucção-----	3000,00m

$$\boxed{L_{tr} = 3045,00\text{m}}$$

Comprimento total das tubulações -  $L_t$

$$L_t = L_{ts} + L_{tr} = 85,9 + 3045,0 \rightarrow \boxed{L_t = 3130,90\text{m}}$$

a) Vazão

$$N = \frac{D}{v} \sqrt{\frac{2g D \Delta h}{L}} = \frac{0,25}{10^{-6}} \sqrt{\frac{2 \times 9,81 \times 0,25 \times 30,0}{3130,90}} \rightarrow \boxed{N = 54.198,28 > 400}$$

$(N/D)K = (54.198,28/0,25)0,00015 = 32,52 < 200$ (misto) , logo :

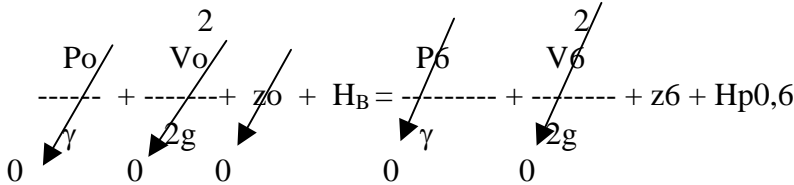
$$f = (-2 \log(2,51N + k/3,71D))^{-2} = (-2 \log(2,51 \times 54.198,28 + 0,00015/3,71 \times 0,25))^{-2} \rightarrow$$

$$f = 0,01844$$

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta h}{fL}} = \frac{\pi \cdot 0,35^2}{4} \sqrt{\frac{2g \cdot 30,0}{0,01844 \times 3130,90}} \rightarrow Q = 0,07836 \text{ m}^3/\text{s}$$

b) Potência da bomba

Bernoulli entre (0) e (6)



$$H_B = 82 + 30 \rightarrow H_B = 112 \text{ m}$$

$$P_B = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_B}{\eta_B} = \frac{9,81 \times 0,07836 \times 112}{0,72} \rightarrow P_B = 119,58 \text{ KW} = 162,46 \text{ CV}$$

c) NPSHd

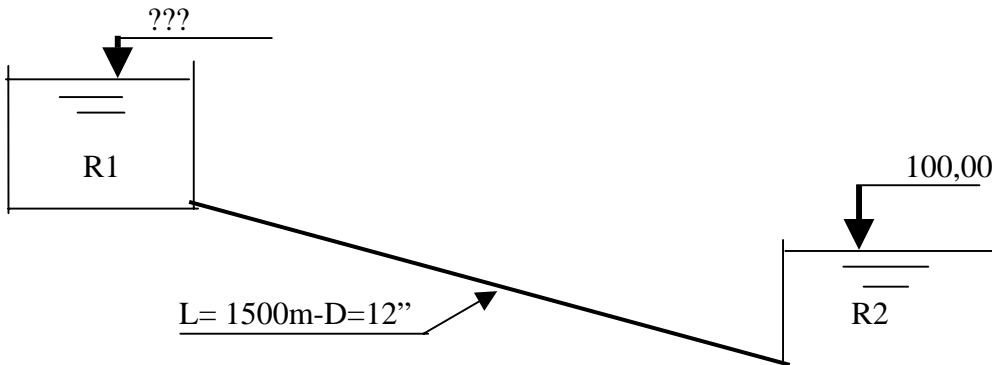
$$\text{NPSHd} = \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} \pm z_s - H_{ps}$$

$$H_{ps} = \frac{8 \times f \times L \times Q^2}{\pi^2 \cdot D^5 \cdot g} = \frac{8 \times 0,01844 \times 85,9 \times 0,07836^2}{\pi^2 \cdot 0,25^5 \cdot 9,81} \rightarrow H_{ps} = 0,82 \text{ m}$$

$$\text{Para } 600 \text{ m} \rightarrow P_{atm}/\gamma = 9,30 \text{ m e para } T = 30^\circ\text{C} \rightarrow P_v/\gamma = 0,429 \text{ m}$$

$$\text{NPSHd} = 9,30 - 0,429 - 4,0 - 0,82 \Rightarrow \text{NPSHd} = 4,05 \text{ m} < \text{NPSHr} = 5,0 \text{ m (a bomba está cavitando)}$$

2) Para fórmula de Hazen-Williams - Determinar a cota do reservatório R1 sabendo-se que escoar uma vazão de 150L/s de água de R1 e R2. Tubo de ferro revestido com cimento e areia.



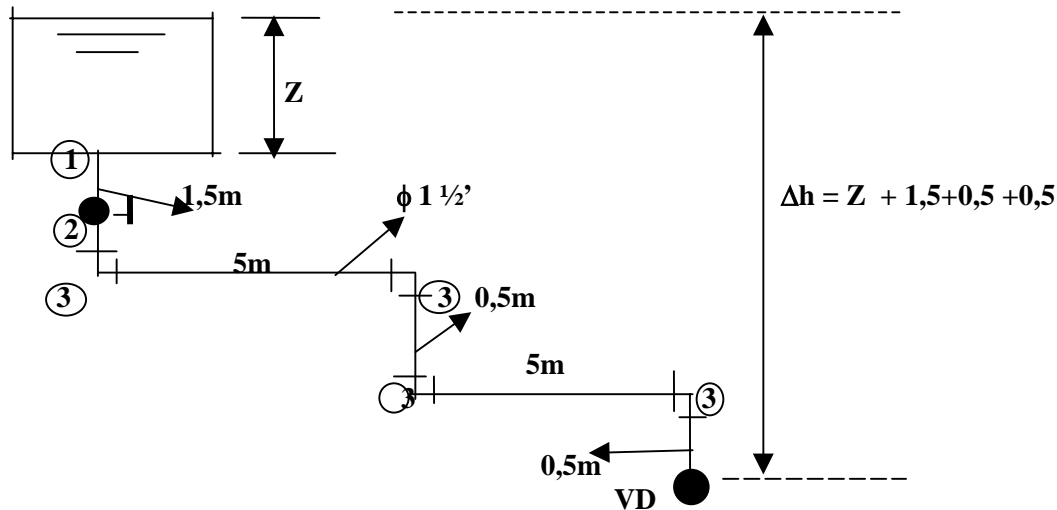
Para tubo de ferro revestido com cimento e areia - C = 120

$$Q = 0,2785 \cdot C \cdot D^{2,63} \left( \frac{\Delta h}{L} \right)^{0,54} \rightarrow \Delta h = \frac{Q^{1,852} \cdot L}{[0,2785 \times C \times D^{2,63}]^{1,852}}$$

$$\Delta h = \frac{0,150^{1,852} \times 1500}{[0,2785 \times 130 \times 0,30^{2,63}]^{1,852}} \rightarrow \Delta h = 20,42\text{m}$$

$$\text{Cota de R1} = 100,00 + \Delta h = 100,00 + 20,42 \rightarrow \text{Cota de R1} = 120,42\text{m}$$

3) Para a fórmula de Fair-Whipple-Hsiao-Quail a cota Z para que escoie a vazão  $Q=2,0\text{L/s}$  pela válvula de descarga. Dados: tubo de ferro galvanizado; 1-entrada normal; 2-registro globo; 3-cotovelo raio curto  $90^\circ$



### Comprimento da Tubulação

1-entrada normal de 1 1/2"	0,50m
2- registro globo de 1 1/2"	13,40m
3-cotovelo raio curto 1 1/2"x90°(4x1,30)	5,20m
Comprimento real = 1,5 + 5,0 + 0,5 + 5,0 + 0,5 =	12,5m

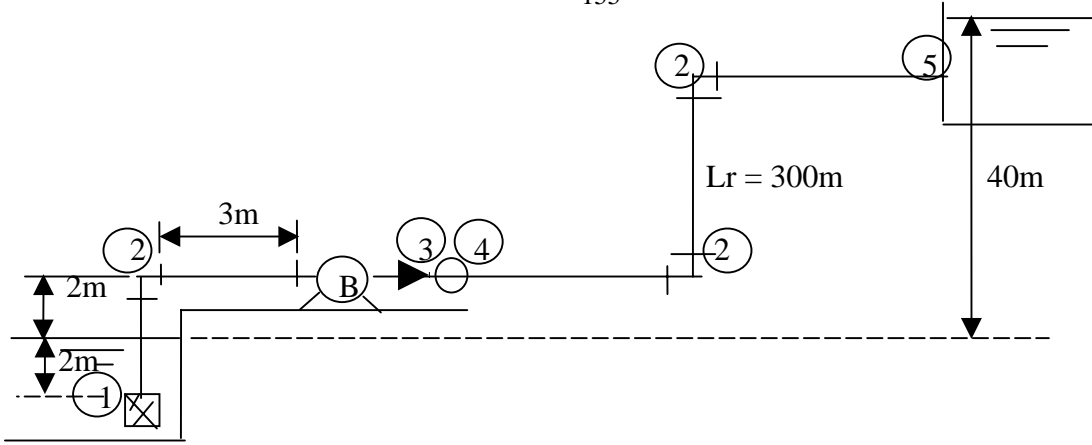
$$\text{Total} \rightarrow \text{Lt} = 24,40\text{m}$$

$$Q = 27,113 \cdot D^{2,596} \cdot J^{0,532} \rightarrow 0,002 = 27,113 \times 0,038^{2,596} \cdot J^{0,532} \rightarrow J = 0,1456\text{m/m}$$

$$\Delta h = J \times \text{Lt} = 0,1456 \times 24,4 \rightarrow \Delta h = 3,56\text{m}$$

$$Z = \Delta h - (1,5 + 0,5 + 0,5) = 3,56 - 2,5 \rightarrow Z = 1,06\text{m}$$

4) Traçar a curva característica do sistema dado. São dados: tubos com  $C=110$  (coeficiente da fórmula de Hazen-Williams); fluido = água;  $\phi_s = 300\text{mm}$  e  $\phi_r = 250\text{mm}$ . 1- válvula de pé com crivo; 2- cotovelo raio longo  $90^\circ$ ; 3- válvula de retenção tipo leve; 4- registro gaveta e 5- saída de canalização.



a) Comprimento da tubulação de sucção.

1 – válvula de pé com crivo $\phi$ 300mm .....	78,0m
2- cotovelo raio longo $90^\circ$ x300mm.....	6,1m
-comprimento real .....	7,0m
	-----
	Lts = 91,1m

b) Comprimento da tubulação de recalque

3- válvula de retenção tipo leve $\phi$ 250mm.....	20,0m
4- registro de gaveta $\phi$ 250mm.....	1,7m
2- cotovelos raio longo $\phi$ 250mmx $90^\circ$ (2x5,5m).....	11,0m
5-saída de canalização de $\phi$ 250mm.....	7,5m
-comprimento real .....	300,0m
	-----
	Ltr = 340,2m

Fórmula de Hazen-Willians:

$$Q = 0,2785C \cdot D^{2,63} \cdot (\Delta h/L)^{0,54}$$

$$\Delta h = \frac{Q^{1,852} \cdot L}{[0,2785 \times C \times D^{2,63}]^{1,852}}$$

D) Cálculo das perdas de carga:

a) Para a sucção:

$$\Delta h_s = \frac{Q^{1,852} \cdot Lts}{[0,2785 \times C \times D_s^{2,63}]^{1,852}} = \frac{Q^{1,852} \times 91,10}{[0,2785 \times 110 \times 0,30^{2,63}]^{1,852}}$$

$$\Delta h_s = 56,73 Q^{1,852}$$

b) Para o recalque:

$$\Delta h_r = \frac{Q^{1,852} \cdot \text{Ltr}}{[0,2785 \times C_x D_r^{2,63}]^{1,852}} = \frac{156 Q^{1,852} \times 340,20}{[0,2785 \times 110 \times 0,25^{2,63}]^{1,852}}$$

$$\Delta h_r = 514,93 Q^{1,852}$$

c) Perda de carga total  $\Delta h$

$$\Delta h = \Delta h_s + \Delta h_r \Rightarrow \Delta h = 56,73 Q^{1,852} + 514,93 Q^{1,852}$$

$$\Delta h = 571,66 Q^{1,852}$$

II) Altura manométrica  $H_m$

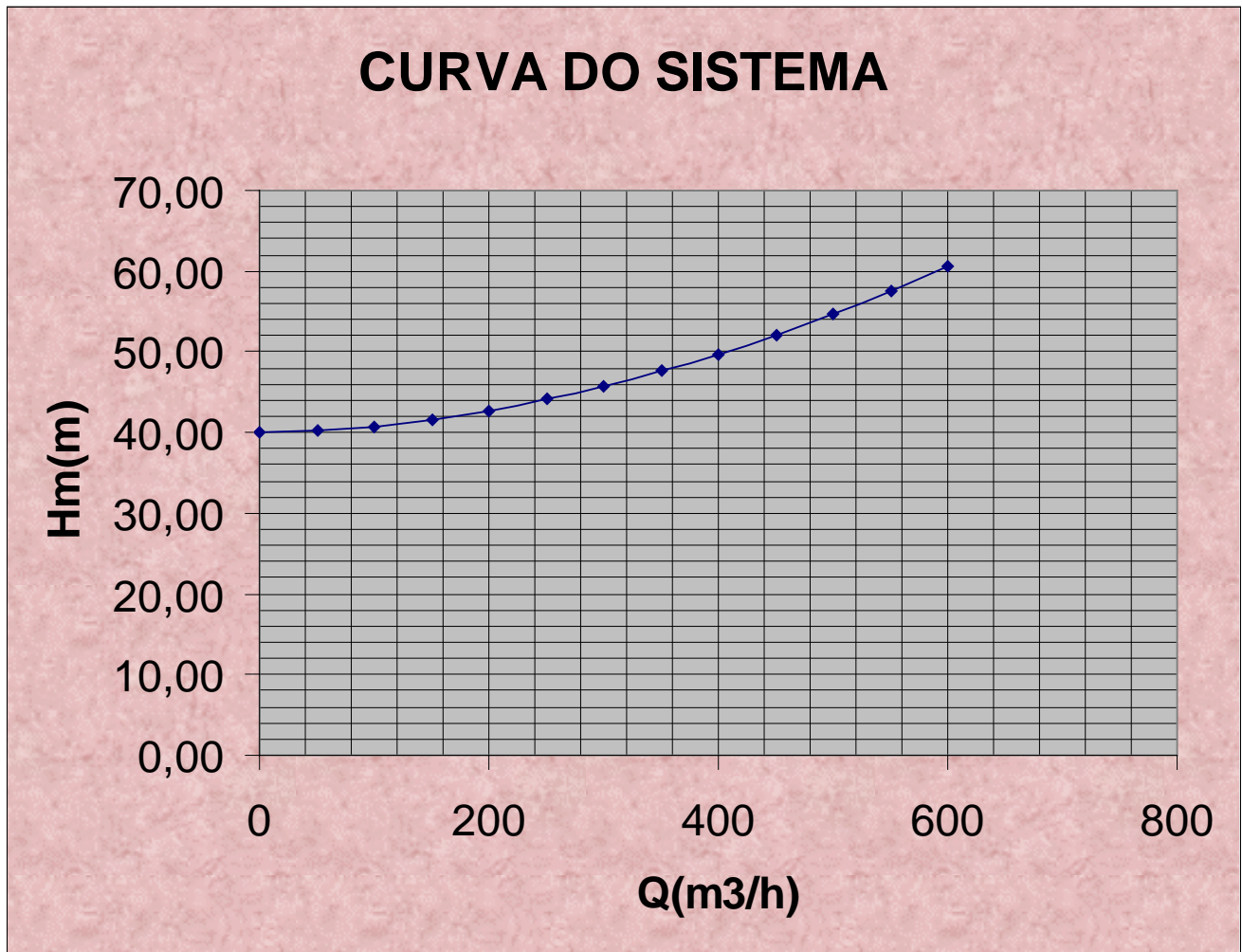
$$H_m = H_g + \text{perdas} \Rightarrow H_m = 40 + 571,66 Q^{1,852} \quad (1)$$

III) Curva do sistema ou curva da tubulação

Variando os valores de  $Q$  na expressão (1) obtém-se a curva do sistema que é dado na tabela a seguir:

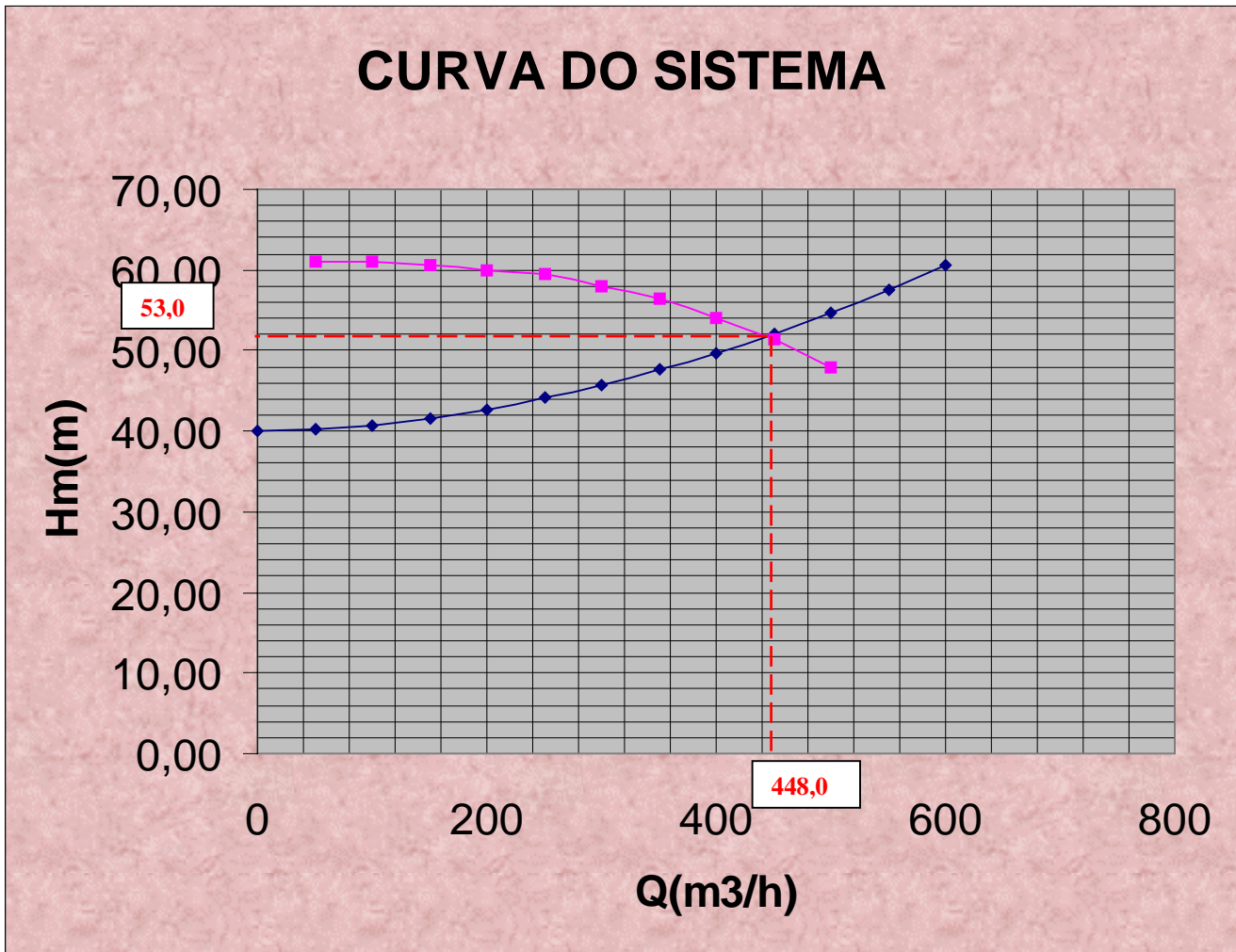
### CURVA DO SISTEMA

$Q(\text{m}^3/\text{h})$	$Q(\text{m}^3/\text{s})$	$H_m (\text{m})$
0	0	40,00
50	0,0138	40,20
100	0,0276	40,75
150	0,0417	41,58
200	0,0556	42,70
250	0,0694	44,08
300	0,0830	45,73
350	0,0970	47,62
400	0,1110	49,76
450	0,1250	52,14
500	0,1388	54,76
550	0,1528	57,60
600	0,1667	60,60



**Curva do Sistema**

5) Dada a curva da bomba Tipo KSB Meganorm 150-400 com rotor de 346mm com 1750 rpm, achar:  
 :a) o ponto de operação b) a potência da bomba e do motor necessário para acionar a bomba c) verificar se ela está bem instalada. São dados: altitude local 500m, temperatura da água 30° C.



- a) Da curva acima:  $Q = 448 \text{ m}^3/\text{h}$   
 $H_m = 53 \text{ m}$   
 Da curva da bomba:  $\eta_B = 80\%$

$$b) PB = \frac{\gamma Q H_m}{75 \eta_B} = \frac{1000 \times 448 \times 53}{75 \times 0,80} \Rightarrow PB = 109,02 \text{ CV}$$

Da tabela de fabricante de motores obtém-se : Motor de 125CV

$$c) NPSH_d = \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} - h_s - H_{ps}$$

Para 500m  $P_{atm} = 760 - 0,081 h = 760 - 0,081 \times 500 \Rightarrow P_{atm} = 719,50 \text{ mm de Hg}$

$$P_{atm} = \frac{0,7195 \times 13600}{1000} \Rightarrow P_{atm} = 9,78 \text{ m}$$

Para  $T = 30^\circ \text{C} \rightarrow Pv/\gamma = 0,429$

$$H_{ps} = \Delta h_s = 56,73 Q^{1,852} = 56,73 \times 0,1244^{1,852} \rightarrow H_{ps} = \Delta h_s = 1,20\text{m}$$

$$NPSH_d = 9,78 - 0,429 - 2,0 - 1,20\text{m} \rightarrow NPSH_d = 6,151\text{m}$$

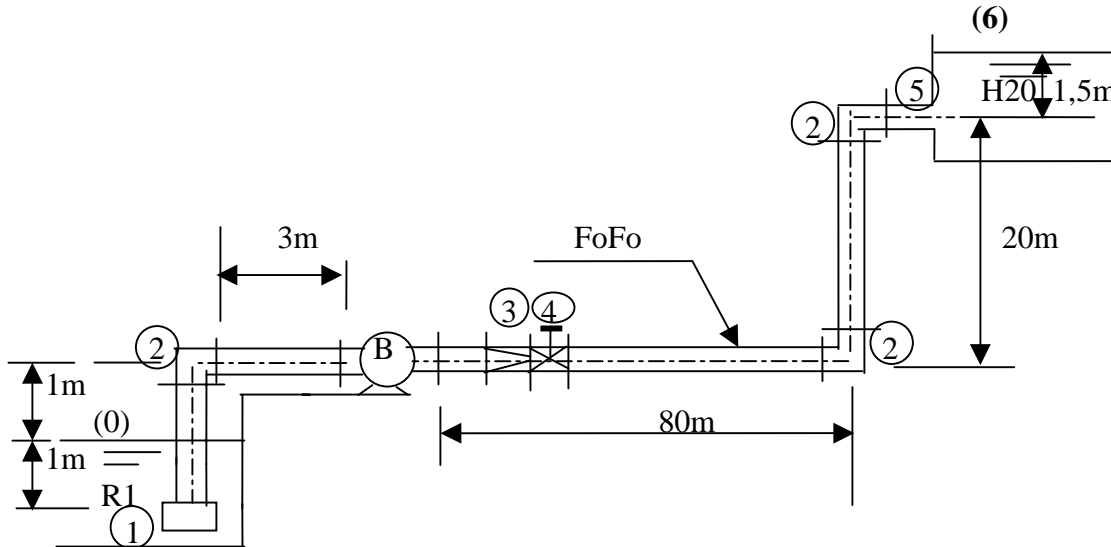
Da curva da bomba com  $Q = 448\text{m}^3/\text{h} \rightarrow NPSH_r = 3,30\text{m}$

Comparando os NPSH vem:

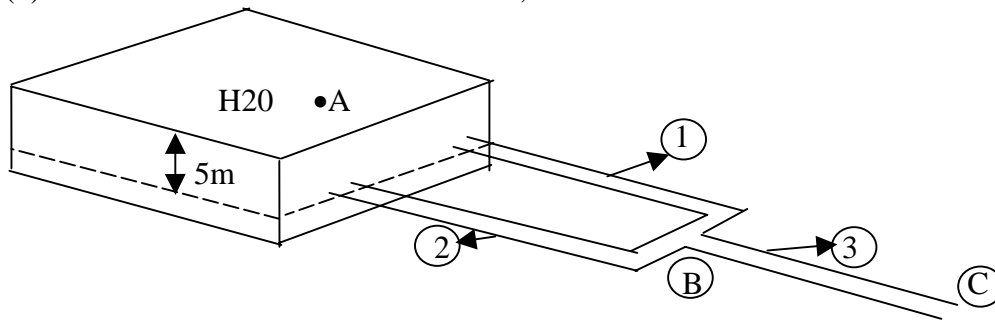
$$NPSH_d = 6,151\text{m} > 1,2 NPSH_r = 3,96\text{m} . \text{OK!}$$



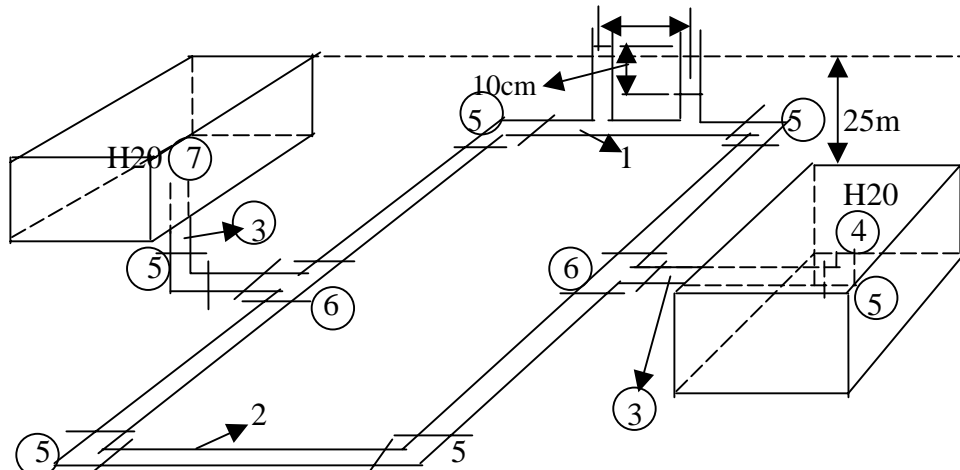
4) Na instalação da figura a seguir a bomba recalca água do reservatório 1 para o reservatório 2. Determinar: a) a vazão da tubulação b) a potência da bomba se o rendimento for 70% c) NPSHd d) Se NPSHr=3,0m, verificar se a bomba está bem instalada. Dados:  $D_s=D_r=10\text{cm}$ ;  $H_p=10\text{m}$ ;  $L_s=5\text{m}$ ;  $L_r=100\text{m}$ ;  $\text{Temp.}=20^\circ\text{C}$ ;  $v=10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ . Altitude=400m; 1-valvula de pé com crivo; 2-cotovelos raio curto 90°; 3-valvula de retenção tipo leve; 4-registro tipo globo 5-alargamento brusco e  $\gamma_{\text{H}_2\text{O}}=9810\text{N}/\text{m}^3$ .



5) Desprezando-se as perdas localizadas, determinar as vazões, sabendo-se que (1) e (3) são tubos de ferro asfaltado e (2) fofo. Dados:  $D_1=D_2=D_3=300\text{mm}$ ;  $L_1=L_2=L_3=500\text{m}$  e  $v=10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ .

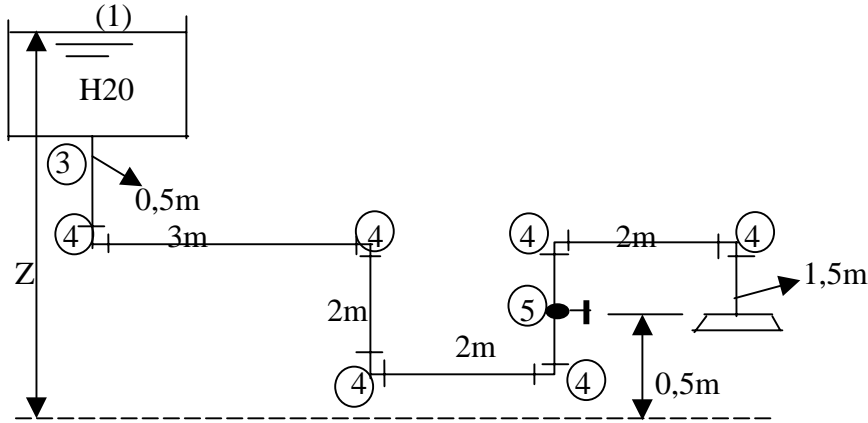


6) Na instalação da figura a seguir, determinar as vazões nos dutos (1); (2) e (3). Dados: desnível entre as caixas = 25m;  $D_1=D_2=4"$ ;  $L_1=L_2=200\text{m}$ ; tubulação (1) = ?; Tubulação (2) = fofo;  $D_3=6"$ ;  $L_3=100\text{m}$ ; material de ferro galvanizado; fluido água com  $v=10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ ; 7-entrada normal; 6-te saída de lado; 5-cotovelo raio curto 90°; 4-saída de canalização. 1m

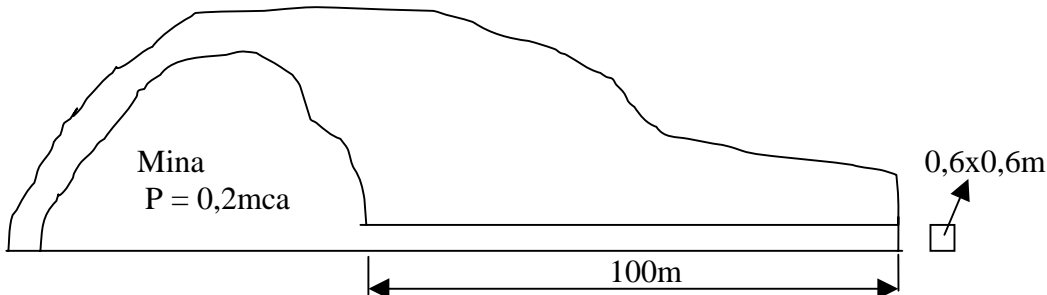


7) Determinar o nível mínimo no reservatório da figura para que o chuveiro automático funcione normalmente sabendo-se que ele liga com uma  $Q=20\text{l}/\text{minuto}$ . Dados:  $v=10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ ,  $D=3/4"$ , todos os

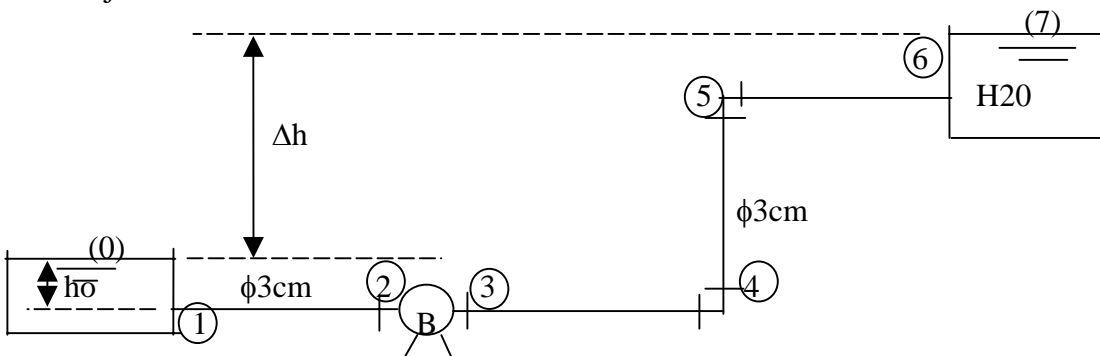
cotovelos são de raio curto e o registro e de globo;  $P_{min}=0,5m$  para funcionar o chuveiro; 3-entrada normal; 4-cotovelo raio curto 90o e 5-registro de gaveta.



8) Uma galeria de seção quadrada (0,6x0,6m) esgota ar de uma mina, onde a pressão é de 0,2mca, para a atmosfera. Calcular a vazão de ar. Desprezar as perdas singulares. Sabe-se que  $\gamma_{ar}= 12,75N/m^3$ ;  $k= 0,001m$  e  $v_{ar}=10^{-6} m^2/s$



9) Na instalação da figura, deseja-se conhecer o desnível  $\Delta h$  entre os 2 reservatórios de água. São dados: potência fornecida ao fluido  $P=0,736KW$ ; diâmetro  $D=3cm$ ;  $Q=3L/s$ ;  $L_{1,2}=2m$ ;  $L_{3,6}=10m$ ;  $K_{s1}=1,0$ ;  $K_{s4}=K_{s5}=1,2$ ;  $K_{s6}=1,6$ ;  $v=10^{-6} m^2/s$ ;  $f=0,02$ ;  $\gamma=9810N/m^3$ . Pede-se ainda a rugosidade do conduto; a altura  $h_0$  para que a pressão efetiva na entrada da bomba seja nula.



10) Dada a instalação a seguir, pede-se: a) Calcular a velocidade e a vazão na tubulação b) a pressão no ponto A, médio do trecho 3-4. Dados:  $K_{s1}=0,5$ ;  $K_{s2}=K_{s3}=K_{s4}=K_{s5}=1,0$ ;  $K_{s6}=10$ ;  $K_{s7}=1,0$ ;  $D=6cm$ ;  $K=0,015m$ ;  $g=10m/s^2$ ;  $v=10^{-6} m^2/s$ ;  $\gamma=9810 N/m^3$ ;  $L_{1,2}=1m$ ;  $L_{2,3}=0,5m$ ;  $L_{3,4}=1m$ ;  $L_{5,7}=1m$ .



**8.8-Respostas dos exercícios do capítulo 8.**

1)  $Q=1,8\text{L/s}$

2)  $H_{pA,B}=25,17\text{m}$

3)  $P_B=57,56\text{KW}(78,20\text{CV})$  ;  $P_e/\gamma = 1,0\text{m} > P_V/\gamma = 0,237\text{m}$

4) a)  $Q=0,0163\text{m}^3/\text{s}$  b)  $P_B=7,28\text{KW}(9,9\text{CV})$  c)  $NPSH_d=8,09\text{m}$  d) a bomba esta bem instalada.

5)  $Q_1=62,21\text{L/s}$  ;  $Q_2=56,51\text{L/s}$  e  $Q_3=119,5\text{L/s}$

6)  $Q_1=16,1\text{L/s}$  ;  $Q_2=22,1\text{ L/s}$  e  $Q_3=38,2\text{ L/s}$ .

7)  $Z=5,81\text{m}$

8)  $Q=4,45\text{m}^3/\text{s}$

9)  $h=13,30\text{m}$  ;  $K=3,1 \times 10^{-5}\text{ m}$ ;  $h_o=3,0\text{m}$

10) a)  $V=1,45\text{m/s}$  ;  $Q=4,1\text{ L/s}$  b)  $PA= 14126\text{N/m}^2$ .

11) a) Turbina b)  $PT=1,02\text{KW}(1,38\text{CV})$  c)  $Z=13,76\text{m}$