

Hidráulica Básica

Guia de Estudo

Condutos Forçados
Instalações de Recalque

Notas de Aula elaboradas
pelos Profs. J Rodolfo S
Martins e Miguel Gukovas

Versão 2010/1

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 2 |
| 2 | CONHECIMENTOS BÁSICOS | 3 |
| 2.1 | Sistema, Unidades, Dimensões e Complementos | 3 |
| 2.2 | Alfabeto Grego | 4 |
| 2.3 | Prefixo Multiplicador | 5 |
| 2.4 | Ordem de grandeza | 5 |
| 2.5 | Algarismos Significativos | 6 |
| 2.6 | Massa e Peso Específico | 6 |
| 2.7 | Pressão | 7 |
| 2.7.1 | <i>Princípio de Pascal</i> | 8 |
| 2.7.2 | <i>Medição da Pressão</i> | 8 |
| 2.8 | Fluxo M ou Vazão Q | 8 |
| 2.9 | Conservação de Massa | 9 |
| 2.10 | Quantidade de Movimento | 10 |
| 2.11 | Equação da energia ou Equação de Bernouilli | 10 |
| 3 | ESCOAMENTOS SOB PRESSÃO | 11 |
| 3.1 | Regimes de escoamento | 11 |
| 3.2 | Identificação dos Regimes | 12 |
| 3.3 | Perdas de carga distribuídas | 12 |
| 3.4 | Perda de Carga Localizada | 15 |
| 4 | TUBULAÇÕES | 18 |
| 4.1 | Velocidade | 18 |
| 4.2 | Diâmetros | 20 |
| 4.3 | Pré-dimensionamento de condutos de água fria | 20 |
| 5 | SISTEMAS ELEVATÓRIOS | 21 |
| 5.1 | Sucção | 23 |
| 5.1.1 | <i>Fenômenos especiais na sucção</i> | 23 |
| 5.2 | Recalque | 26 |
| 5.2.1 | <i>Diâmetro Econômico</i> | 26 |
| 5.3 | Bombas ou máquinas de fluxo | 26 |
| 5.3.1 | <i>Potência</i> | 28 |
| 5.3.2 | <i>Velocidade Específica, η_s</i> | 28 |
| 5.3.3 | <i>Associação de bombas</i> | 29 |
| 5.3.4 | <i>Seleção das bombas</i> | 31 |
| 5.3.5 | <i>Curvas características</i> | 32 |
| 5.3.6 | <i>Ponto de Funcionamento</i> | 33 |
| 6 | BIBLIOGRÁFIA UTILIZADA | 34 |

1 INTRODUÇÃO

A Hidráulica é a disciplina que deve oferecer os recursos técnicos necessários para análise, elaboração e execução de projetos ligados a infra-estrutura urbana e predial, com especial destaque para o uso racional dos recursos hídricos e economia de energia.

Neste capítulo são abordados os conceitos ligados aos escoamentos em condutos forçados, que são aqueles que se processam em tubulações com pressão diferente da atmosférica. O termo deriva do fato de termos tubulações com seção fechada.

São abordados os conceitos de pressão, fluxo de massa e volume, a equação da energia, as perdas de carga e o dimensionamento de tubulações. Ao final do capítulo são tratados os conceitos de bombas hidráulicas e instalações de recalque.

2 CONHECIMENTOS BÁSICOS

Para o entendimento das principais aplicações da hidráulica e equipamentos é necessária a discussão de conceitos fundamentais já anteriormente abordados em disciplinas como a física básica e a matemática. Estes conceitos contém as ferramentas necessárias para o tratamento matemático de fenômenos usuais como pressão, fluxo e energia.

2.1 Sistema, Unidades, Dimensões e Complementos

O estudo dos fluidos na disciplina de Hidráulica envolve variedades de características, obrigando-nos a descrevê-los de modo qualitativo e quantitativo. A descrição qualitativa identifica a natureza ou tipo: velocidade, área, comprimento, cor, calor, etc. A descrição quantitativa identifica a quantidade mensurável da natureza ou tipo: segundos, metro, quilogramas, joule, lumens, etc.

Quando se deseja medir algo com algum comprimento estaremos medindo uma **grandeza física**. A medida de uma grandeza física é expressa pelo número de vezes que a unidade padrão, tomada como referência, está contida na grandeza a ser medida.

A altura de uma pessoa é 1,75m, ou seja, a medida padrão 1 metro (1m) cabe 1,75 vezes na altura do indivíduo. Um carro tem uma massa de 1 tonelada (1t), ou seja, possui uma massa 1000 vezes a massa padrão de 1kg.

Dimensão é o nome dado a quantidades mensuráveis cuja unidade é a medida padrão convencional a uma dimensão, ou seja: a dimensão igual a 1m, um metro, possui a dimensão igual a 1 e a unidade igual ao metro.

Sistema é um conjunto convencional de unidades para grandezas, no caso do Brasil, segundo o decreto Lei nº 63.233 de 12/09/1968, obrigatório o uso do **Sistema Internacional, SI**, conforme tabela sucinta abaixo:

Tabela 1

| Grandeza | Unidade | Composição | Símbolo |
|--------------------------|-------------------------|------------|---------|
| Comprimento | M | | L |
| Área | m ² | L*L | A |
| Tempo | S | | t |
| Massa | Kg | | m |
| Temperatura | K ou °C | | T |
| Volume | m ³ | L*L*L | ∇ |
| Aceleração escalar | m/s ² | | a |
| Aceleração gravitacional | m/s ² | | g |
| Velocidade escalar | m/s | L/t | V |
| Velocidade angular | rad/s | | ω |
| Ângulo plano | Rad | | α, θ |
| Energia | J | Nm | E |
| Força | kg*m/s ² = N | m*a | F |
| Pressão | N/m ² =Pa | F/A | P |

| Grandeza | Unidade | Composição | Símbolo |
|----------------------------|-----------------|---------------------------------|------------------------------|
| Pressão em coluna d'água | m_{H_2O} | P/γ_{H_2O} | h_{H_2O} |
| Pressão em coluna mercúrio | m_{Hg} | P/γ_{Hg} | h_{Hg} |
| Tensão de cisalhamento | $N/m^2=Pa$ | F/A | τ |
| Potência | W | J/s | N |
| Trabalho | J | $F*L=Nm$ | |
| Densidade relativa | | $\delta_{Fluido}/\delta_{H_2O}$ | δ |
| Massa Específica | kg/m^3 | m/∇ | ρ |
| Peso | $Kg*m/s^2=N$ | $m*g$ | ρ |
| Peso Específico | N/m^3 | $m*g/\nabla= \rho*g$ | γ |
| Viscosidade cinemática | m/s^2 | μ/ρ | ν |
| Viscosidade dinâmica | $N*s/m^2= Pa*s$ | $\nu*\rho$ | μ |
| Fluxo ou vazão em massa | kg/s | m/t | $\overset{\circ}{Q}, \phi_m$ |
| Fluxo ou vazão em volume | m^3/s | ∇/t | Q, ϕ_m |
| Frequência | Hz | $1/s$ | f |
| Torque | $N*m$ | $F*l$ | T |
| Momento Angular | $N*rad/s$ | $F*\omega$ | M |
| Momento Linear | $N*m$ | $F*L$ | M |

Notar que o símbolo representativo da grandeza é escrito em letra minúscula, exceto quando a origem é um nome próprio como Watt, Joule, Pascal, conforme o SI, assim o símbolo de hora é h e não H, HR, hs.

Outro detalhe importante é que o símbolo representativo da grandeza, a unidade, não possui plural.

2.2 Alfabeto Grego

É usual a utilização do alfabeto grego, assim a sua identificação é fundamental para a interpretação correta dos fenômenos envolvidos.

Tabela 2 Símbolos gregos utilizados

| Denominação | Símbolo | | Denominação | Símbolo | |
|-------------|-----------|------------|-------------|-----------|------------|
| | Maiúscula | Minúscula | | Maiúscula | Minúscula |
| Alfa | A | α | Nu | N | ν |
| Beta | B | β | Ksi | Ξ | ξ |
| Gama | Γ | γ | Ômicron | O | o |
| Delta | Δ | δ | Pi | Π | π |
| Épsilon | E | ϵ | Ro | P | ρ |
| Zeta | Z | ζ | Sigma | Σ | σ |
| Éta | H | η | Tau | T | τ |
| Teta | Θ | θ | Úpsilon | Y | υ |
| Iota | I | ι | Fi | Φ | ϕ |
| Kapa | K | κ | Chi | X | χ |
| Lambda | Λ | λ | Psi | Ψ | ψ |
| Um | M | μ | Ômega | Ω | ω |

É comum, inclusive em alguns livros de física e matemática, a troca de símbolos aparentemente parecidos tais como: δ com ∂ (delta minúsculo e o símbolo matemático de derivada).

Cabe observar que Δ e δ possuem o mesmo significado matemático, ou seja, intervalo, diferencial, gradiente; Σ (sigma) é a letra grega maiúscula que representa a somatória de valores.

2.3 Prefixo Multiplicador

Observar que os símbolos dos prefixos multiplicadores superiores ao quilo (10^3) são representados em maiúsculas, o que indica que a unidade de massa é kg com minúsculas.

Tabela 3: Prefixos multiplicadores

| Fator | nome | símbolo | Fator | nome | símbolo |
|-----------|-------|---------|------------|-------|---------|
| 10^{12} | tera | T | 10^{-1} | deci | d |
| 10^9 | giga | G | 10^{-2} | centi | c |
| 10^6 | mega | M | 10^{-3} | mili | m |
| 10^3 | quilo | k | 10^{-6} | micro | μ |
| 10^2 | hecto | h | 10^{-9} | nano | η |
| 10^1 | deca | da | 10^{-12} | pico | p |

2.4 Ordem de grandeza

Usa-se a expressão *ordem de grandeza* de um número para designar potência de 10 que lhe é mais próxima. Assim teremos:

Tabela 4 Ordem de Grandeza

| número | ordem de grandeza |
|---------|-------------------|
| 1,5 | 10^0 |
| 80 | 10^2 |
| 0,00032 | 10^{-4} |

A abordagem de um problema na vida prática é importante saber estimar ordens de grandeza das possíveis variáveis relacionadas, podendo assim, consolidar os resultados. Para poder comparar as diversas ordens de grandeza, elas devem estar no mesmo sistema de unidades.

Tabela 5 Ordem de grandeza de tempo:

| tempo (s) | tempo decorrido (s) |
|------------|---|
| 10^{18} | vida suposta do sol |
| 10^{16} | revolução solar em torno da galáxia |
| 10^{15} | desde a época dos dinossauros |
| 10^{13} | desde o homem |
| 10^{11} | desde era cristã |
| 10^{10} | desde descobrimento da América |
| 10^9 | vida humana |
| 10^7 | um ano |
| 10^6 | mês |
| 10^5 | dia |
| 10^2 | minuto |
| 10^0 | batidas do coração |
| 10^{-2} | uma volta das pás de ventilador |
| 10^{-3} | batida das asas de uma mosca |
| 10^{-7} | feixe eletrônico entre o catodo à tela do televisor |
| 10^{-16} | volta do elétron em torno do próton num átomo de hidrogênio |

Tabela 6 Ordem de grandeza de comprimento:

| Comprimento(m) | distância (m) |
|----------------|------------------------------|
| 10^{16} | estrela mais próxima à Terra |
| 10^{11} | Terra ao Sol |
| 10^7 | raio da Terra |
| 10^0 | altura de uma criança |
| 10^{-2} | diâmetro de um lápis |
| 10^{-4} | espessura da folha de papel |
| 10^{-5} | diâmetro do glóbulo vermelho |
| 10^{-10} | raio do átomo |
| 10^{-14} | raio de um núcleo |

Tabela 7 Ordem de grandeza de energia:

| Energia (J) | fonte |
|-------------|---|
| 10^{40} | explosão de uma supernova |
| 10^{34} | total emitida anualmente pelo Sol |
| 10^{30} | rotacional da Terra |
| 10^{26} | recebida na Terra do Sol |
| 10^{18} | Bomba H |
| 10^{14} | 1ª. Bomba Atômica |
| 10^{10} | tonelada de carvão mineral |
| 10^6 | 28,3l de gás |
| 10^2 | bala de rifle |
| 10^{-10} | fissão nuclear de urânio |
| 10^{-18} | ligação química de um elétron num átomo de Hidrogênio |

2.5 Algarismos Significativos

Genericamente sugere-se que, no SI, a apresentação de valores finais de grandezas tenham duas casas decimais, mas o bom senso e o hábito dimensional devem prevalecer, ou seja, não é adequado apresentar, como exemplo, as velocidades:

Tabela 8 Exemplos de ordem de grandeza e algarismos significativos

| Velocidade Típica | Unidade | | |
|-------------------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------|
| | Usual | km/h | m/s (SI) |
| Crescimento de cabelo | 1,5 cm/mês | $2,1 \cdot 10^{-8}$ | $5,8 \cdot 10^{-9}$ |
| Fluxo de sangue nos vasos capilares | 1 mm/s | $4 \cdot 10^{-3}$ | 10^{-3} |
| Fluxo de sangue na aorta | 30 cm/s | 1,1 | 0,3 |
| Espermatozóide | 6 m/s | 22 | 6 |
| Ciclista | 15 m/s | 54 | 15 |
| Automóvel | 80 km/h | 80 | 22 |
| Lua ao redor da Terra | $10,3 \cdot 10^{-2}$ m/s | $2,9 \cdot 10^{-8}$ | $10,3 \cdot 10^2$ m/s |

2.6 Massa e Peso Específico

Nas aplicações que envolvem fluidos, costuma-se utilizar as propriedades massa específica e peso específico, que significam:

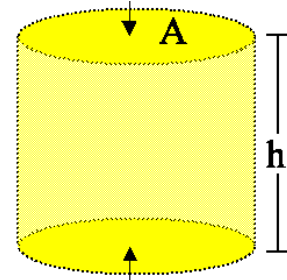
| | |
|--|---|
| Massa Específica: quantidade de massa por unidade de volume | $\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kg/m}^3]$ |
| Peso Específico: força peso que atua n massa m por unidade de volume | $\gamma = \frac{mg}{V} = \rho g \quad [\text{N/m}^3]$ |

Nas aplicações usuais da hidráulica, a massa específica é adotada como sendo 1.000 kg/m^3 e o peso específico cerca de 9.800 N/m^3 .

2.7 Pressão

A pressão é definida como a relação entre uma força e área de aplicação desta força. Para um líquido em repouso, a força atuante corresponde ao peso de líquido sobre a superfície dividido pela área de contato: Desta forma:

$$p = \frac{F_N}{A} \quad [\text{N/m}^2 = \text{Pa}]$$



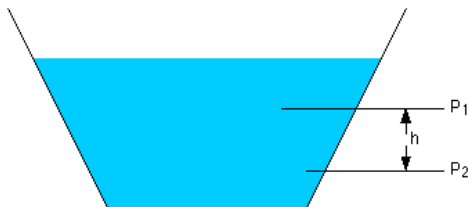
Para a água, a pressão pode ser referenciada como sendo :

$$p = \frac{F_N}{A} = \frac{\gamma V}{A} = \frac{\gamma Ah}{A} = \gamma h$$

Como o peso específico da água é praticamente constante nas aplicações práticas, é usual exprimir-se a pressão em termos da altura de líquido:

$$\frac{p}{\gamma} = h \quad [\text{mH}_2\text{O}]$$

Desta forma, também se utiliza como unidade de pressão o termo 'altura d' água' ou 'metros de coluna de água'. A diferença de pressão entre dois pontos fica sendo então a diferença de coluna de líquido entre os dois pontos:

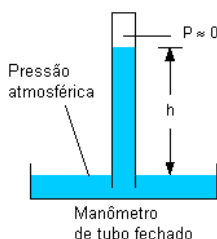


$$P_1 = P_2 + \gamma h$$

Esta pressão, no entanto é a efetivamente exercida pelo líquido sobre um ponto qualquer. Considerando que nas aplicações práticas existe ainda a pressão atmosférica, associada ao peso da coluna de ar sobre a superfície da terra, deve-se considerar que a pressão total exercida sobre um ponto é a soma da pressão do líquido, chamada de 'efetiva' com a pressão atmosférica:

$$P_{\text{absoluta}} = P_{\text{atmosférica}} + P_{\text{efetiva}}$$

A pressão atmosférica equivale a cerca de $10,33 \text{ mH}_2\text{O}$. ou então:



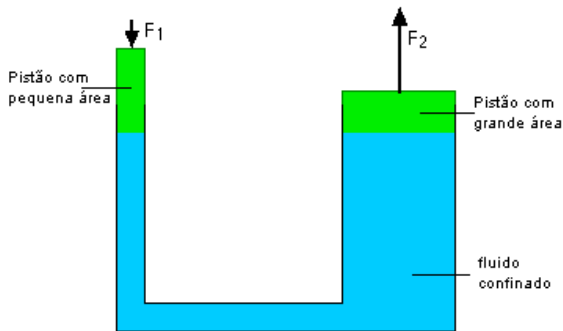
$$P_{\text{atm}} = \frac{5 \cdot 10^{19} \text{ N}}{5 \cdot 10^{14} \text{ m}^2} = 1,013 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Outras unidades usuais para a pressão atmosférica são:

$$1atm = 10000m_{ar} = 0,76m_{Hg} = 10,33m_{H2O} = 101.396 \frac{N}{m^2} =$$

$$= 101,4kPa = 10.330 \frac{kgf}{m^2} = 1,01bar = 14,7psi = 14,7 \frac{lb}{pol^2}$$

2.7.1 Princípio de Pascal

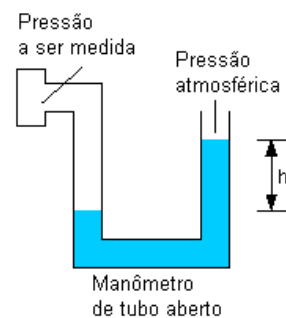


A pressão aplicada a um fluido dentro de um recipiente fechado é transmitida, sem variação, a todas as partes do fluido, bem como às paredes do recipiente. Este princípio tem diversas aplicações práticas entre, sendo uma muito usual a do elevador hidráulico.

2.7.2 Medição da Pressão

Diversos equipamentos são empregados para medição da pressão de líquidos e em particular da água em tubulações. Estes equipamentos são denominados de forma genérica 'manômetros' e podem ter diversas formas:

Manômetro de Coluna: o líquido é medido através de uma coluna líquida aberta à a atmosfera, geralmente com um líquido de peso específico maior do que a água, denominado "líquido manométrico"

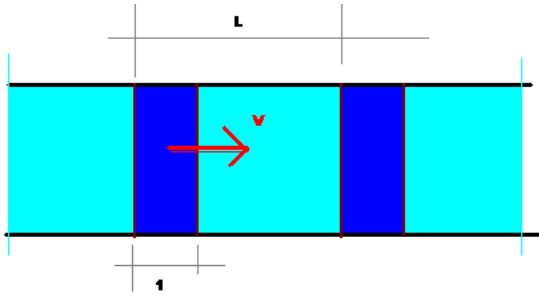


Manômetro Bourdon: também denominado 'analógico' é composto de um mecanismo ligado a um ponteiro que se deforma em função da pressão



2.8 Fluxo M ou Vazão Q

Fluxo é velocidade de passagem de uma propriedade extensiva. São propriedades extensivas a massa, o volume, a energia, o calor, a quantidade de movimento e etc. A entrada de fluxo é denominada afluxo e a saída efluxo



O fluxo em massa é obtido pelo produto entre a massa fluida que atravessa uma superfície e a velocidade V . Pode ser facilmente compreendido considerando um volume $(A \times l)$ que se desloca de uma distância L num intervalo de tempo Δt . A quantidade de massa que se movimenta é:

$$M = \rho(A \cdot l) \frac{L}{\Delta t} = \rho \frac{V}{\Delta t} = \rho AV \text{ [kg/s]}$$

Sendo a massa específica constante ($\rho = \text{cte}$) pode se escrever que o fluxo em volume, também denominado **Vazão**, vale:

$$Q = \frac{M}{\rho} = VA \text{ [m}^3\text{/s]}$$

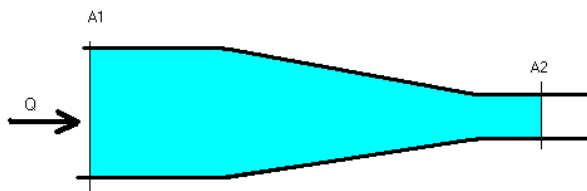
A vazão em volume é usualmente expressa em múltiplos e submúltiplos e também outras unidades como:

- $\text{m}^3\text{/h}$ - Metro cúbico por hora
- l/h - Litro por hora
- l/min - Litro por minuto
- $\text{ft}^3\text{/s}$ - Pé cúbico por segundo
- gal/s - Galão (US) por segundo
- gal/min - Galão (US) por minuto (gpm)

O conhecimento do fluxo em volume ou **vazão** através das tubulações é muito importante na prática, principalmente para determinação do consumo de água, sendo feito através de medidores de descarga ou **hidrômetros**.

2.9 Conservação de Massa

Este princípio estabelece que se o fluido é incompressível, assim como a água nas condições normais de pressão e temperatura, o fluxo em massa através de um espaço controlado é constante:



$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2$$

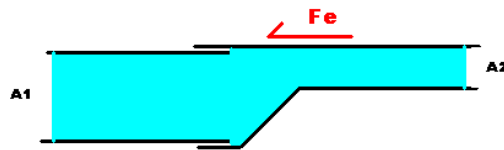
2.10 Quantidade de Movimento

Todo corpo em movimento apresenta tem uma quantidade de movimento equivalente ao produto de sua massa pela velocidade. A ação de uma força externa sobre este corpo altera sua velocidade e portanto sua quantidade de movimento. Analogamente, para um fluido, a ação de uma força externa altera sua quantidade de movimento:

Na figura, verifica-se que a força externa necessária para manter o bocal de redução fixo na tubulação é a diferença entre as quantidades de movimento na seção A1 e A2:

$$F_e = \rho \cdot V_1 \cdot A_1 \cdot V_1 - \rho \cdot V_2 \cdot A_2 \cdot V_2$$

$$F_e = \rho \cdot Q \cdot V_1 - \rho \cdot Q \cdot V_2$$



2.11 Equação da energia ou Equação de Bernoulli

Representa a energia total de uma partícula fluida, por unidade de peso específico e de volume. No jargão técnico é designada por 'carga hidráulica'.

Energia potencial:
$$\frac{E_p}{P} = \frac{mgz}{mg} = Z$$

Energia de pressão
$$\frac{E_i}{P} = \frac{p\forall}{P} = \frac{p\forall}{\gamma\forall} = \frac{p}{\gamma}$$

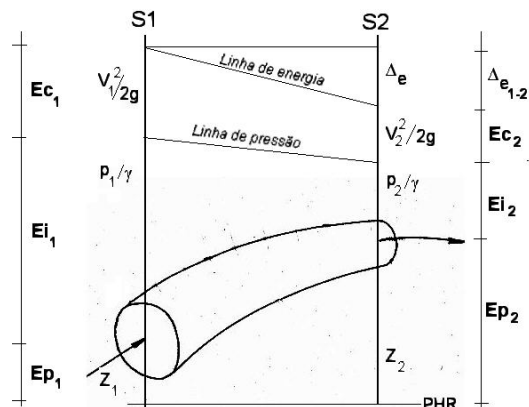
Energia Cinética
$$\frac{E_c}{P} = \frac{mV^2}{2P} = \frac{mV^2}{m2g} = \frac{V^2}{2g}$$

Energia Total ou Carga Hidráulica
$$\frac{E}{P} = H = Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g}$$

O princípio de Bernoulli estabelece que a variação da energia de uma partícula numa trajetória qualquer é dada por:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta e_{1-2}$$

onde Δe é a variação de energia ou 'perda de carga'.



3 ESCOAMENTOS SOB PRESSÃO

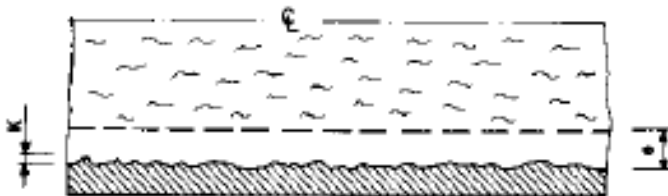
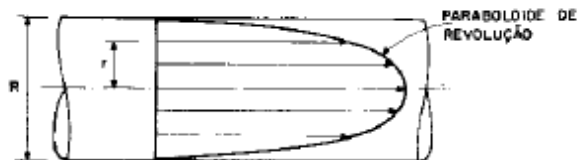
Também denominados *ESCOAMENTOS EM CONDUTOS FORÇADOS*, são aqueles que se desenvolvem dentro das canalizações onde a pressão é diferente da atmosférica, ou seja a pressão efetiva é diferente de zero. Todos os sistemas de tubulações prediais, de abastecimento de água, oleodutos e gasodutos tem este tipo de escoamento.

O fator determinante nos escoamentos em condutos forçados é a perda de energia gerada pelos atritos internos do fluido e pelos atritos entre este e a tubulação. Neste caso estes atritos são gerados pelas asperezas das paredes dos condutos ou ainda em função da turbulência (movimento caótico das partículas) gerada em função de variações de direção ou da própria seção do escoamento.

3.1 Regimes de Escoamento

Os escoamentos em tubulações considerados de acordo com 3 modelos distintos:

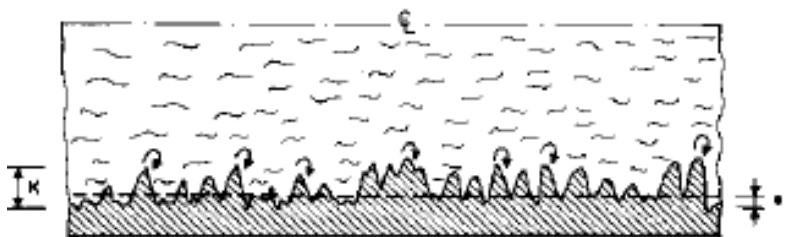
Escoamento laminar: o fluido escoa em blocos ou lâminas, de forma que o perfil de velocidades é parabólico. Os atritos que ocorrem são de origem viscosa.



Escoamento Turbulento Liso: nesta categoria, o efeito da rugosidade ou das asperezas das paredes é encoberto pela existência de um filme viscoso que lubrifica a região de contato. O movimento das partículas é caótico, porém a

velocidade média é orientada na direção do eixo do escoamento. Neste regime os atritos são preponderantemente viscosos.

Escoamento Turbulento: é caracterizado pela ação das asperezas das paredes, que geram vórtices (movimentos rotacionais) que incrementam a perda de energia. Neste regime os atritos são gerados pela rugosidade



3.2 Identificação dos Regimes

Os regimes de escoamento são identificados através de um parâmetro adimensional denominado Número de Reynolds (Re), definido pela relação entre as forças de inércia (rugosas) do escoamento e as forças viscosas.

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

$$Re \leq 2000 \rightarrow \text{laminar}$$

$$2000 \leq Re \leq 4000 \rightarrow \text{zona crítica}$$

$$Re > 4000 \rightarrow \text{turbulento}$$

3.3 Perdas de carga distribuídas

A perda de carga (energia por unidade de peso específico e volume) distribuída nos escoamentos forçados é aquela que ocorre em função dos atritos ao longo da tubulação, sendo bem representada através da equação de Darcy-Weissbach, também conhecida como Fórmula Universal:

$$\Delta H_d = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = f \frac{8LQ^2}{\pi^2 D^5 g} = 0,0827 \frac{fLQ^2}{D^5}$$

onde f é chamado de fator de atrito. O cálculo de f depende do regime de escoamento e da rugosidade do conduto, sendo que expressões abaixo permitem sua determinação prática em função destas características:

$$f = \frac{64}{Re} \rightarrow \text{laminar}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{f}} + \frac{\varepsilon}{3,71D} \right) \rightarrow \text{turbulento}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \rightarrow \text{turbulentoliso}$$

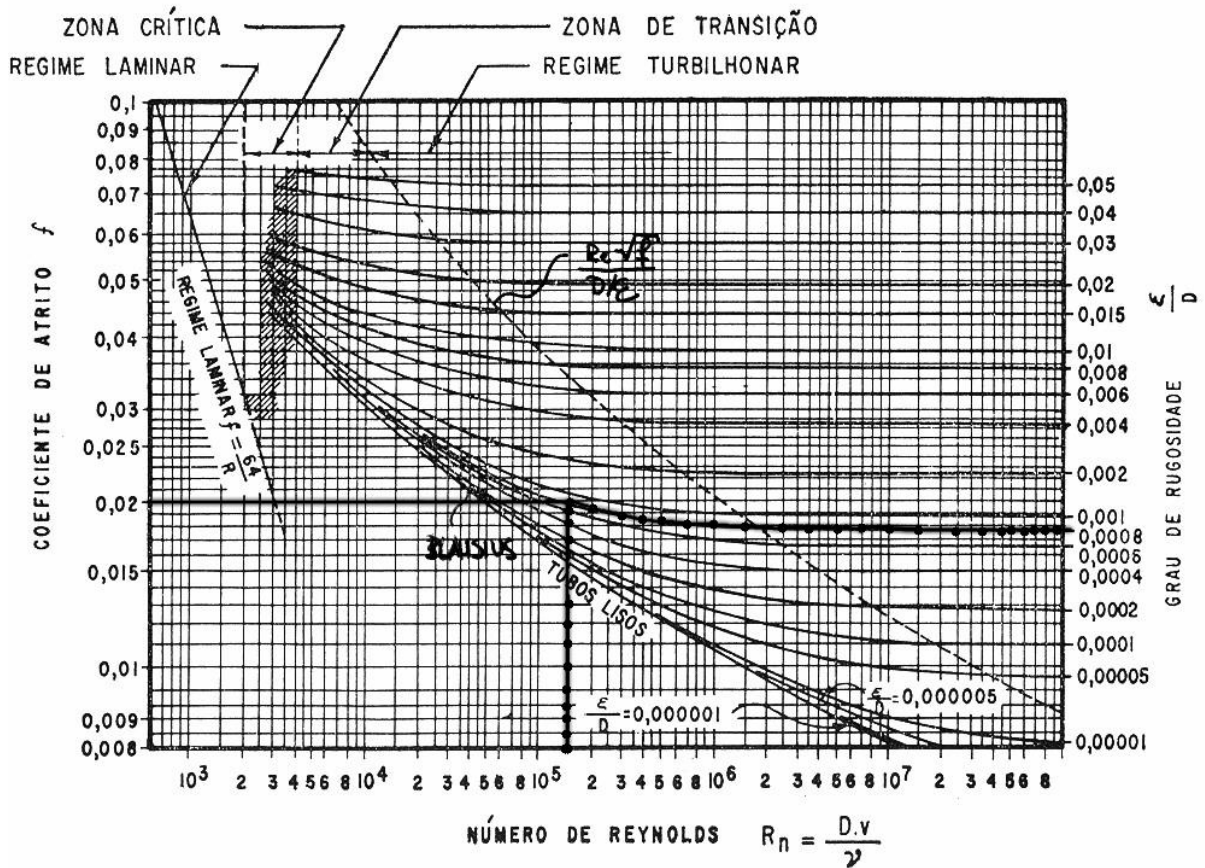
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,71D} \right) \rightarrow \text{turbulentorugoso}$$

A rugosidade característica do material é tabelada, conforme indica a tabela abaixo. As expressões para determinação do fator de atrito podem ser representadas através de diagramas característicos, como o de Moody-Rouse, também indicado a seguir.

Tabela 9: rugosidade médias dos materiais de alguns condutos

| Material do Conduto | ϵ (mm) | Material do Conduto | ϵ (mm) |
|----------------------------------|-----------------|----------------------|-----------------|
| Rocha sem revestimento | 100 a 1000 | Aço soldado: | |
| Concreto: | | Revest. Concreto | 0,05 a 0,15 |
| Rugoso | 0,40 a 0,60 | Revest. Esmalte | 0,01 a 0,30 |
| Granular | 0,18 a 0,40 | Aço rebitado | |
| Centrifugado | 0,15 a 0,50 | Revest. Asfalto | 0,9 a 1,8 |
| Liso | 0,06 a 0,18 | Fibrocimento | 0,015 a 0,025 |
| Muito liso | 0,015 a 0,06 | Latão, cobre, chumbo | 0,004 a 0,01 |
| Ferro: | | Alumínio | 0,0015 a 0,005 |
| Forjado enferrujado | 0,15 a 3,00 | Vidro | 0,001 a 0,002 |
| Galvanizado ou fundido revestido | 0,06 a 0,30 | PVC, Polietileno | 0,06 |
| Fundido não revestido novo | 0,25 a 1,00 | Cerâmica | 0,06 a 0,6 |
| Fundido com corrosão | 1,00 a 1,50 | Teflon | 0,01 |
| Fundido obstruído | 0,30 a 1,50 | Fiberglass | 0,0052 |
| Fundido muito corroído | até 3,00 | Madeira aparelhada | 0,18 a 0,9 |

Diagrama de Moody



As três expressões acima foram ajustadas numericamente por SWAMEE através da expressão:

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{RE} \right)^8 + 9.5 \left[\ln \left(\frac{k}{14.8Rh} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) - \left(\frac{2500}{Re} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0.125}$$

A tabela abaixo fornece uma indicação da ordem de grandeza dos fatores de atrito para aplicações usuais da engenharia hidráulica.

Tabela 10: Valores referenciais do fator de atrito, f

| Tipo de conduto | Rugosidade, ϵ (mm) | f |
|------------------------------|--------------------------------|-------------|
| Ferro Fundido | | |
| Incrustado | 2,40-1,20 | 0,020-1,500 |
| Revestido com asfalto | 0,30-0,90 | 0,014-0,100 |
| Revestido com cimento | 0,05-0,15 | 0,012-0,060 |
| Aço Galvanizado | | |
| Novo com costura | 0,15-0,20 | 0,012-0,060 |
| Novo sem costura | 0,06-0,15 | 0,009-0,012 |
| Concreto | | |
| Moldado com forma de madeira | 0,20-0,40 | 0,012-0,080 |
| Moldado com forma em ferro | 0,06-0,20 | 0,009-0,060 |
| Centrifugado | 0,15-0,50 | 0,012-0,085 |
| PVC | 0,015 | 0,009-0,050 |

Na prática da engenharia hidráulica, diversas fórmulas são também empregadas para estimativa das perdas de carga distribuídas nos condutos forçados, sendo que a mais popular é a fórmula criada por Hazen-Willians, que tem estrutura muito similar a formula de Darcy-Weissbach:

$$\Delta E = 10,65 \frac{L}{C^{1,85} D^{4,87}} Q^{1,85}$$

O coeficiente C pode ser estimado por tabelas práticas como a indicada abaixo:

Tabela 11- Valores do Coeficiente C de Hazen-Willians

| | |
|---------------------------------------|-----|
| Cimento Amianto | 140 |
| Ferro Fundido | 100 |
| Cimento | 140 |
| Concreto | 100 |
| Cobre | 150 |
| Aço | 120 |
| Aço Galvanizado | 120 |
| Polietileno | 150 |
| PVC | 150 |
| Plástico reforçado com fibra de vidro | 150 |

3.4 Perda de Carga Localizada

As perdas localizadas são originadas pelas variações bruscas da geometria do escoamento, como mudanças de direção ou da seção do fluxo. São usuais em instalações com curvas, válvulas, comportas, alargamentos ou estreitamentos e etc.

A expressão geral para cálculo destas perdas é da forma:

$$\Delta E = K \frac{V^2}{2g}$$

sendo K o coeficiente de perda de carga localizada, que é determinado experimentalmente em laboratório. A tabela abaixo permite a estimativa dos fatores K para algumas singularidades típicas das tubulações:

Tabela 12 Coeficientes de Perda Localizadas

| Acessório | K | Acessório | K |
|----------------------------|-----|--|-----|
| Cotovelo de 90° raio curto | 0,9 | Válvula de gaveta aberta | 0,2 |
| Cotovelo de 90° raio longo | 0,6 | Válvula de ângulo aberta | 5 |
| Cotovelo de 45° | 0,4 | Válvula de globo aberta | 10 |
| Curva 90°, r/D = 1 | 0,4 | Válvula de pé com crivo | 10 |
| Curva de 45° | 0,2 | Válvula de retenção | 3 |
| Tê, passagem direta | 0,9 | Curva de retorno, $\alpha = 180^\circ$ | 2,2 |
| Tê, saída lateral | 2,0 | Válvula de bóia | 6 |

Tabela 13- Valores de K para registros gaveta parcialmente abertos

| r/D | 0 | 1/4 | 3/8 | 1/2 | 5/8 | 3/4 | 7/8 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| K | 0,15 | 0,26 | 0,81 | 2,06 | 5,52 | 17,0 | 97,8 |

Tabela 14 Valores de K para válvulas borboleta com diferentes ângulos de abertura

| α° | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| K | 0,15 | 0,24 | 0,52 | 0,90 | 1,54 | 2,51 | 3,91 | 6,22 | 10,8 | 18,7 | 32,6 |

Um conceito útil para o cálculo das perdas de carga localizadas é o de comprimentos virtuais ou equivalentes de singularidade. Considera-se que as peças e conexões podem ser substituídas (no cálculo) por comprimentos virtuais de tubulação que resultem na mesma perda de carga. Este conceito permite simplificar os cálculos e dimensionamentos através do uso de uma expressão única, aquela da perda de carga distribuída.

$$\Delta E_{loc} = k \frac{V^2}{2g} = f \frac{L_{virt}}{D} \frac{V^2}{2g}$$

$$L_{virt} = k \frac{f}{D}$$

Para a maioria das peças especiais empregadas nas tubulações encontram-se tabelas com os valores típicos dos comprimentos equivalentes, obtidos a partir de ensaios de laboratório. Geralmente estes valores são estabelecidos como uma função do diâmetro do tubo.

Tabela 15: Comprimentos Equivalentes de Singularidades para Aço Galvanizado e Ferro Fundido



















| Acessório | Equação | Figura | Comprimento equivalente (Le/D) (n° de diâmetros) |
|----------------------------|------------------------|---|--|
| Cotovelo 90° raio longo | $Le = 0,068 + 20,96 D$ |  | 22 |
| Cotovelo 90° raio médio | $Le = 0,114 + 26,56 D$ |  | 28,5 |
| Cotovelo 90° raio curto | $Le = 0,189 + 30,53 D$ |  | 34 |
| Cotovelo 45° | $Le = 0,013 + 15,14 D$ |  | 15,4 |
| Curva 90° R/D = 1,5 | $Le = 0,036 + 12,15 D$ |  | 12,8 |
| Curva 90° R/D = 1 | $Le = 0,115 + 15,53 D$ |  | 17,5 |
| Curva 45° | $Le = 0,045 + 7,08 D$ |  | 7,8 |
| Entrada normal | $Le = -0,23 + 18,63 D$ |  | 14,7 |
| Entrada de Borda | $Le = -0,05 + 30,98 D$ |  | 30,2 |
| Registro de gaveta aberto | $Le = 0,010 + 6,89 D$ |  | 7 |
| Registro de globo aberto | $Le = 0,01 + 340,27 D$ |  | 342 |
| Registro de ângulo aberto | $Le = 0,05 + 170,69 D$ |  | 171,5 |
| Tê 90° passagem direta | $Le = 0,054 + 20,90 D$ |  | 21,8 |
| Tê 90° saída lateral | $Le = 0,396 + 62,32 D$ |  | 69 |
| Tê 90° saída bilateral | $Le = 0,396 + 62,32 D$ |  | 69 |
| Válvula de pé com crivo | $Le = 0,56 + 255,48 D$ |  | 265 |
| Saída de canalização | $Le = -0,05 + 30,98 D$ |  | 30,2 |
| Válvula de retenção, leve | $Le = 0,247 + 79,43 D$ |  | 83,6 |

Tabela 7.6 – Comprimentos equivalentes a perdas localizadas. (Expressos em metros de canalização retilínea)*

| Diâmetro D | Comprimentos equivalentes a perdas localizadas. (Expressos em metros de canalização retilínea)* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---|-----|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------|-------------------------|-----------------------|-----------|----------------|------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|------------------|------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------------|
| | mm | pol | COTOVELO 90° RAIO LONGO | COTOVELO 90° RAIO MÉDIO | COTOVELO 90° RAIO CURTO | COTOVELO 45° | CURVA 90° R/D - 1/2" | CURVA 90° R/D - 1" | CURVA 45° | ENTRADA NORMAL | ENTRADA DE BORDA | VÁLVULA DE GAVETA ABERTO | VÁLVULA DE GLOBO ABERTO | VÁLVULA DE ÂNGULO ABERTO | TÉ PASSAGEM DIRETA | TÉ SAÍDA DE LADO | TÉ SAÍDA LATERAL | VÁLVULA DE PÉ E CRIVO | SAÍDA DA CANALIZAÇÃO | VÁLVULA DE RETENÇÃO TIPO LEVE |
| 13 | 1/2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,1 | 4,9 | 2,6 | 0,3 | 1,0 | 1,0 | 3,6 | 0,4 | 1,1 | 1,6 |
| 19 | 3/4 | 0,4 | 0,6 | 0,7 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 0,5 | 0,1 | 6,7 | 3,6 | 0,4 | 1,4 | 1,4 | 5,6 | 0,5 | 1,6 | 2,4 |
| 25 | 1 | 0,5 | 0,7 | 0,8 | 0,4 | 0,3 | 0,5 | 0,2 | 0,3 | 0,7 | 0,2 | 8,2 | 4,6 | 0,5 | 1,7 | 1,7 | 7,3 | 0,7 | 2,1 | 3,2 |
| 32 | 1 1/4 | 0,7 | 0,9 | 1,1 | 0,5 | 0,4 | 0,6 | 0,3 | 0,4 | 0,9 | 0,2 | 11,3 | 5,6 | 0,7 | 2,3 | 2,3 | 10,0 | 0,9 | 2,7 | 4,0 |
| 38 | 1 1/2 | 0,9 | 1,1 | 1,3 | 0,6 | 0,5 | 0,7 | 0,3 | 0,5 | 1,0 | 0,3 | 13,4 | 6,7 | 0,9 | 2,8 | 2,8 | 11,6 | 1,0 | 3,2 | 4,8 |
| 50 | 2 | 1,1 | 1,4 | 1,7 | 0,8 | 0,6 | 0,9 | 0,4 | 0,7 | 1,5 | 0,4 | 17,4 | 8,5 | 1,1 | 3,5 | 3,5 | 14,0 | 1,5 | 4,2 | 6,4 |
| 63 | 2 1/2 | 1,3 | 1,7 | 2,0 | 0,9 | 0,8 | 1,0 | 0,5 | 0,9 | 1,9 | 0,4 | 21,0 | 10,0 | 1,3 | 4,3 | 4,3 | 17,0 | 1,9 | 5,2 | 8,1 |
| 75 | 3 | 1,6 | 2,1 | 2,5 | 1,2 | 1,0 | 1,3 | 0,6 | 1,1 | 2,2 | 0,5 | 26,0 | 13,0 | 1,6 | 5,2 | 5,2 | 20,0 | 2,2 | 6,3 | 9,7 |
| 100 | 4 | 2,1 | 2,8 | 3,4 | 1,5 | 1,3 | 1,6 | 0,7 | 1,6 | 3,2 | 0,7 | 34,0 | 17,0 | 2,1 | 6,7 | 6,7 | 23,0 | 3,2 | 6,4 | 12,9 |
| 125 | 5 | 2,7 | 3,7 | 4,2 | 1,9 | 1,6 | 2,1 | 0,9 | 2,0 | 4,0 | 0,9 | 43,0 | 21,0 | 2,7 | 8,4 | 8,4 | 30,0 | 4,0 | 10,4 | 16,1 |
| 150 | 6 | 3,4 | 4,3 | 4,9 | 2,3 | 1,9 | 2,5 | 1,1 | 2,5 | 5,0 | 1,1 | 51,0 | 26,0 | 3,4 | 10,0 | 10,0 | 39,0 | 5,0 | 12,5 | 19,3 |
| 200 | 8 | 4,3 | 5,5 | 6,4 | 3,0 | 2,4 | 3,3 | 1,5 | 3,5 | 6,0 | 1,4 | 67,0 | 34,0 | 4,3 | 13,0 | 13,0 | 52,0 | 6,0 | 16,0 | 25,0 |
| 250 | 10 | 5,5 | 6,7 | 7,9 | 3,8 | 3,0 | 4,1 | 1,8 | 4,5 | 7,5 | 1,7 | 85,0 | 43,0 | 5,5 | 16,0 | 16,0 | 65,0 | 7,5 | 20,0 | 32,0 |
| 300 | 12 | 6,1 | 7,9 | 9,5 | 4,6 | 3,6 | 4,8 | 2,2 | 5,5 | 9,0 | 2,1 | 102,0 | 51,0 | 6,1 | 19,0 | 19,0 | 78,0 | 9,0 | 24,0 | 38,0 |
| 350 | 14 | 7,3 | 9,5 | 10,5 | 5,3 | 4,4 | 5,4 | 2,5 | 6,2 | 11,0 | 2,4 | 120,0 | 60,0 | 7,3 | 22,0 | 22,0 | 90,0 | 11,0 | 28,0 | 45,0 |

* Os valores indicados para registros de globo aplicam-se também às torneiras, válvulas para chuveiros e válvulas de descarga

4 TUBULAÇÕES

As expressões desenvolvidas acima são utilizadas para o dimensionamento. Parte-se, geralmente, de uma velocidade razoável para o tipo de fluido e serviço especificados, calcula-se o diâmetro, escolhe-se um tamanho nominal conveniente e calcula-se a perda de energia.

Considera-se sistema de condutos forçados ao conjunto composto com condutos e conexões que trabalhem sob pressão. Apresentam-se alguns valores de pré-dimensionamento de sistemas de condutos forçados.

4.1 Velocidade

As velocidades típicas estão apresentadas na tabela abaixo mas a experiência pode indicar valores diferentes como velocidades menores prevendo-se ampliações, corrosão ou formação de crosta ou, em contraposição, velocidades maiores para evitar deposição e entupimentos.

A complexidade das variáveis envolvidas: densidade, viscosidade, perda de energia admissível, pressão de vapor, agressividade, diâmetro, o aspecto econômico, entre outras variáveis, interferem na escolha do conduto.

De acordo com as formulações disponíveis, a perda de energia aumenta com a velocidade. A adoção de velocidades altas é interessante no aspecto econômico mas não indicadas tecnicamente pois provocam ruídos, vibrações, desgaste de material e sobrepressões elevadas quando ocorrer “golpe de aríete”.

As velocidades baixas encarecem o custo do sistema pois determinam diâmetros maiores e contribuem para a deposição de material.

A experiência tem levado à adoção de valores práticos que conciliam a economia e bom funcionamento.

Há expressões que relacionam a velocidade típica do escoamento turbulento com a característica do fluido e o diâmetro:

Tabela 16 Velocidades Recomendadas

| Serviço/Fluido | Velocidade (m/s) |
|----------------------------|---------------------------------------|
| Líquidos | $5,214 * D^{0,304}$ |
| Gases | $108,17 \frac{D^{0,45}}{\rho^{0,16}}$ |
| Dreno, Sucção e Ventilação | Metade das expressões acima |

Outro aspecto importante é a velocidade máxima admissível para líquidos não corrosivos e/ou erosivos: $V_{\max} = \frac{36,886}{\sqrt[3]{\rho}}$.

Para gases a velocidade máxima é a sônica, sendo aproximadamente dois terços desta a velocidade limite para escoamento turbulento: $V_{\max} = 60,808 \sqrt{\frac{kZT}{M}}$, onde k é a relação entre capacidades caloríficas, Z é o coeficiente de compressibilidade, M é a massa molecular e T a temperatura em Kelvin.

Tabela 17-Velocidades Práticas Usuais

| Serviço/Fluido | Velocidade (m/s) |
|---|---------------------------|
| Sucção de bombas | |
| Líquidos finos (água, álcool) | 0,4-2 |
| Líquidos viscosos (acima de 0,01Pa*s) | 0,1-0,4 |
| Linha de recalque | |
| Líquidos finos (água, álcool) | 1,2-3 |
| Líquidos viscosos (acima de 0,01Pa*s) | 0,2-1,2 |
| Escoamento devido à gravidade | 0,3-1,5 |
| Drenos | 1-2 |
| Alimentação de caldeiras | 2,5-4 |
| Vapor | |
| Saturado | 12-40 |
| Superaquecido | 25-60 |
| Alta pressão | 50-100 |
| Ar comprimido | |
| Troncos | 6-8 |
| Ramais | 8-10 |
| Mangueiras | 15-30 |
| Gases industriais | |
| Alta pressão (maior 1MPa) | 30-60 |
| Baixa pressão (ventilação) | 10-20 |
| Alto vácuo | 100-120 |
| Tubos via | |
| Líquidos finos | 1,5-2 |
| Bombeando líquidos viscosos (oleodutos) | 0,4-2 |
| Gravidade | 0,1-0,3 |
| Linhas subterrâneas de esgoto | |
| Manilhas cerâmicas | 5 |
| Tubos de concreto | 4 |
| Tubos de cimento amianto | 3 |
| Tubos de ferro fundido | 6 |
| Tubos de PVC | 5 |
| Redes de distribuição de água | $V_{Máx} = 0,6 + 1,5 * D$ |
| Instalações prediais de água | $V_{Máx} = 2$ |

4.2 Diâmetros

Tabela 18- Diâmetros Típicos e Mínimos

| Serviço | D _{interno} (mm) | |
|---|-----------------------------|--|
| | Líquidos | Gases |
| Típico | $D = a * Q^{0,434}$ | $D = b \frac{Q^{0,408}}{\rho^{0,473}}$ |
| Recalque | a=15,51 | b=5,77 |
| Sucção/dreno/Ventilação | a=20,96 | b=7,65 |
| Mínimo | $D = c\sqrt{Q\rho}^{0,167}$ | $D = d\sqrt{Q}\left(\frac{M}{kZT}\right)^{0,25}$ |
| Fluido limpo | c=3,10 | d=2,41 |
| Corrosivo/erosivo | c=4,38 | d=3,41 |
| Q em m ³ /h, T em K, D em m, V em m/s e ρ em kg/m ³ | | |

4.3 Pré-dimensionamento de condutos de água fria

A norma **NBRB-5626** para projetos de distribuição de água fria em prédios com apartamentos, recomenda que a máxima velocidade, em cada trecho da instalação, seja igual a $V_{m\acute{a}x} = 14\sqrt{D}$ ou $V_{m\acute{a}x} = 2,50\text{m/s}$, prevalecendo o menor valor, onde $V_{m\acute{a}x}$ (m/s) e D(m). A tabela abaixo orienta o pré-dimensionamento dos diâmetros em cada trecho, a partir da vazão especificada no projeto.

Tabela 19: Diâmetros usuais em instalações prediais

| DIÂMETRO (pol) | DIÂMETRO (m) | $V_{m\acute{a}x} = 14\sqrt{D}$ (m/s) | $V_{m\acute{a}x}$ (m/s) | $Q_{m\acute{a}x} = V_{m\acute{a}x} * A$ (l/s) |
|----------------|--------------|--------------------------------------|-------------------------|---|
| ¾ | 0,019 | 1,93 | 1,93 | 0,55 |
| 1 | 0,025 | 2,21 | 2,21 | 1,08 |
| 1 ¼ | 0,0313 | 2,48 | 2,48 | 1,91 |
| 1 ½ | 0,0375 | 2,71 | 2,50 | 2,76 |
| 2 | 0,05 | 3,13 | 2,50 | 4,91 |
| 2 ½ | 0,0625 | 3,50 | 2,50 | 7,67 |
| 3 | 0,075 | 3,83 | 2,50 | 11,04 |
| 4 | 0,1 | 4,43 | 2,50 | 19,63 |

5 SISTEMAS ELEVATÓRIOS

Os condutos com escoamento devido à gravidade são o ideal quando se pretende transferir fluido no espaço. Mas à medida que se vão esgotando os locais topograficamente propícios são necessários aplicarem-se métodos mecânicos para a elevação e transporte de fluido.

Os sistemas que operam devido à gravidade são econômicos mas com reduzida flexibilidade, limitados pelo desnível geométrico e capacidade de vazão.

Em alguns sistemas é necessário fornecer energia ao fluido para se obter maior pressões, velocidades, vazões ou atingir cotas geométricas elevadas, nestes sistemas utilizam-se bombas.

Entre as inúmeras aplicações dos sistemas elevatórios, pode-se citar: Captação de água em rios; Extração de água em poços; Adução com bombeamento; Lavagem de filtros em estações de tratamento; bombas de reforço (“booster”); sistema de esgoto; distribuição de água potável; piscinões; recuperação de cotas; reversão de capacidade de geração de hidrelétrica; jateamento com areia, água, concreto; máquinas de corte; injeção; etc.

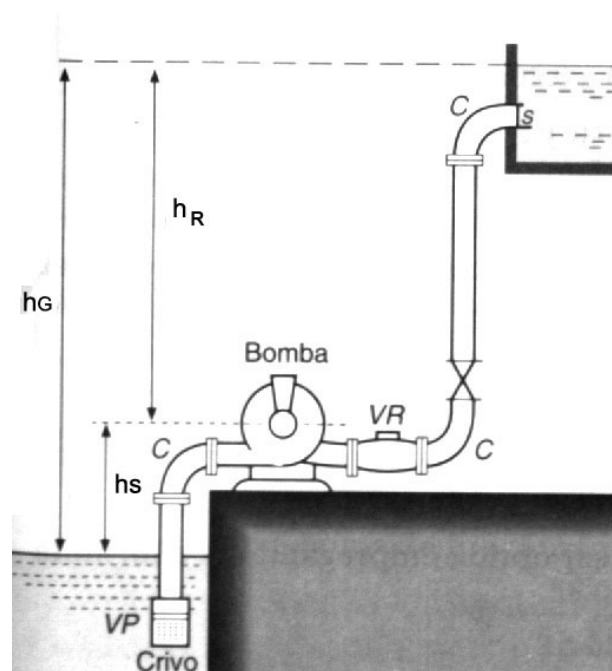
A altura geométrica, h_G , é o valor do desnível geométrico vertical (diferença entre a cota do nível do fluido superior e inferior), podendo ser dividida nas parcelas: altura de sucção, h_S e altura de recalque, h_R .

A altura de sucção, h_S , é a distância vertical entre o nível do fluido no reservatório inferior e o eixo da bomba.

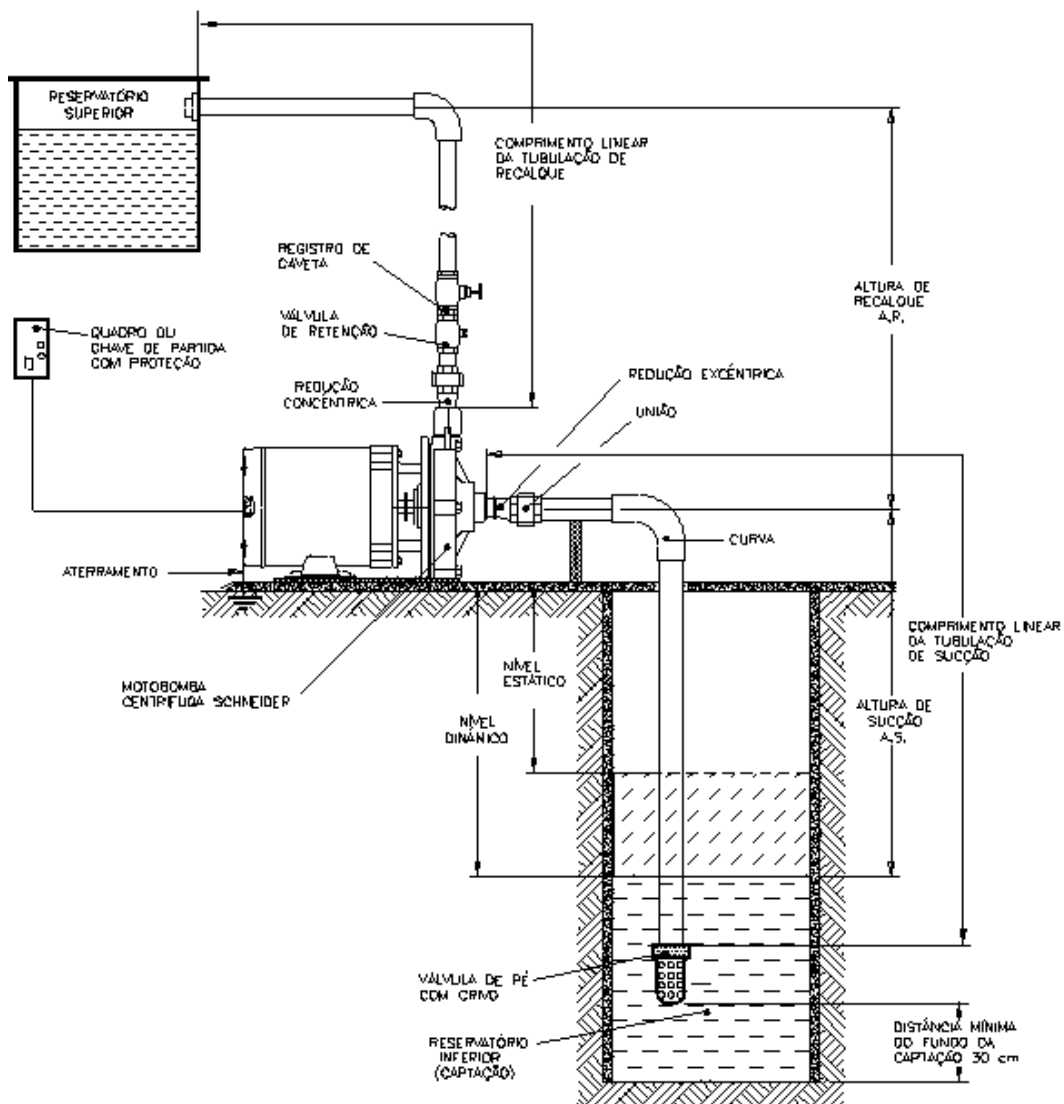
A altura de recalque, h_R , é a distância vertical entre o eixo da bomba e o nível do fluido no reservatório superior.

$$h_G = \pm h_S + h_R$$

Evidentemente, a bomba tem que fornecer energia para vencer o desnível geométrico, h_G , e a soma das perdas de energia distribuídas e localizadas.



ESQUEMA TÍPICO DE INSTALAÇÃO EM UMA CAPTAÇÃO D'ÁGUA DE UMA MOTOBOMBA CENTRÍFUGA SCHNEIDER (PARA ALTURAS DE SUÇÃO INFERIORES A 8 METROS)



A altura manométrica, h_{man} , corresponde à distância vertical mínima para que o fluido chegue ao ponto elevado, ou seja, altura geométrica, h_G , acrescida das perdas de energia.

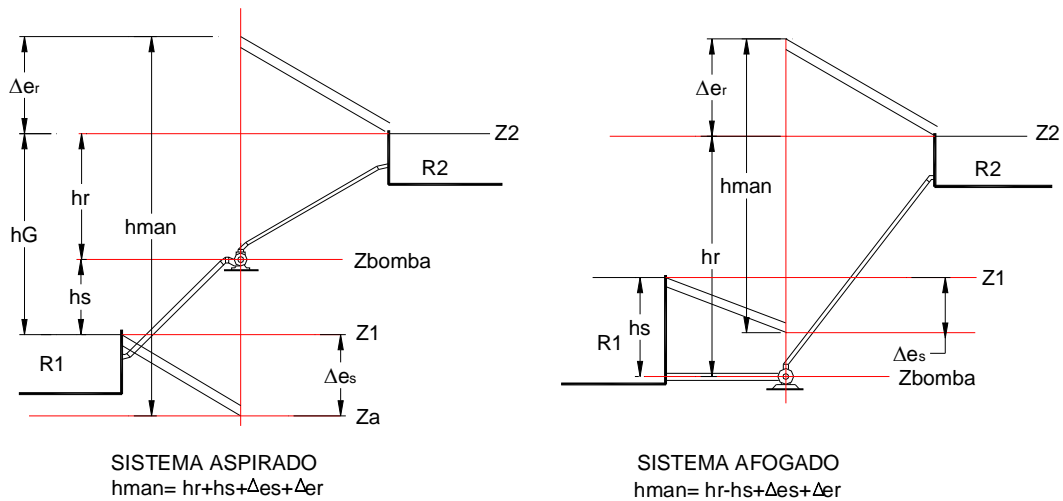
$$h_{man} = h_G + \Delta e$$

$$\Delta e = \Delta e_S + \Delta e_R$$

$$\Delta e_S = \Delta e_{dist} + \Delta e_{Loc}$$

$$\Delta e_R = \Delta e_{dist} + \Delta e_{Loc}$$

O cálculo das perdas de energia de um sistema elevatório: sucção e recalque, segue as expressões convencionais científicas ou empíricas de dimensionamento conhecidas.



Um sistema elevatório é composto: sucção, recalque e bomba.

5.1 Sucção

Compõe a sucção o conjunto de condutos e conexões que conduzem o fluido até a bomba, seus elementos principais são:

- **Poço de sucção:** sua função é criar uma área preferencial para captação de fluido com baixa aceleração;
- **Crivo:** peça especial na extremidade da captação, ficando submersa no poço, para impedir o acesso de material sólido evitando danos;
- **Válvula de pé:** uma válvula instalada na extremidade da captação de uma bomba aspirada, com a função de impedir o retorno do fluido mantendo o conduto de sucção cheio ou seja escorvado;
- **Sistema auxiliar de Escorvamento:** destina-se a encher o conduto de sucção para iniciar a operação da bomba;
- **Condutos de sucção:** interligam a captação com a bomba devendo ser com menor comprimento possível para gastar pouca energia. Via de regra o diâmetro do conduto de sucção é maior do que o de recalque.

A sucção trabalha em escoamento permanente uniforme, isto é, com vazão e velocidade média constantes, por isso os problemas são resolvidos através das equações de Bernoulli e da Continuidade.

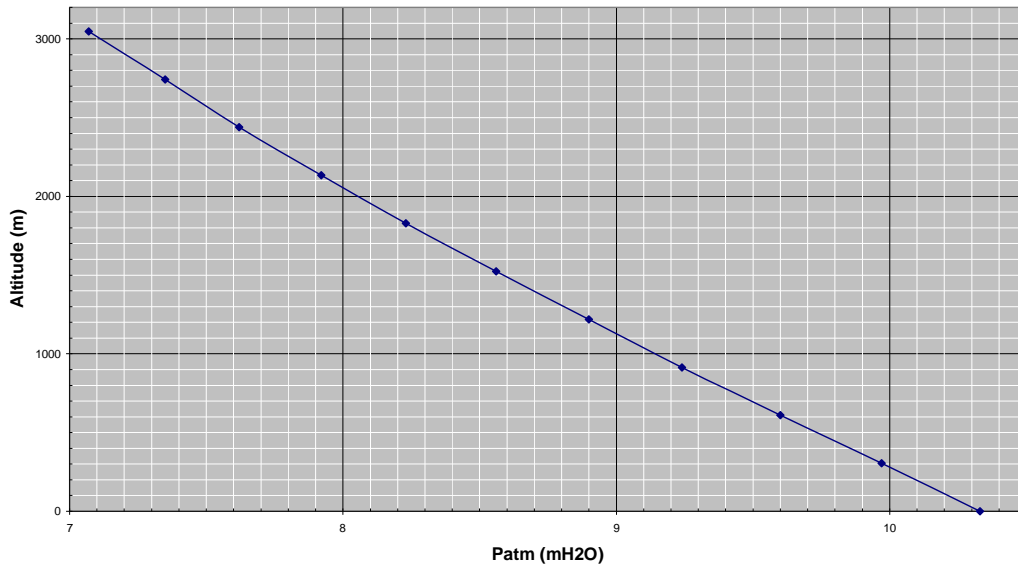
5.1.1 Fenômenos especiais na sucção

- **Vórtice:** ocorrem devido a pouca submersão que pode facilitar a entrada de ar, alterando e prejudicando o rendimento do sistema;
- **Cavitação:** caso a pressão do fluido atinja um valor menor do que a de vapor, surgirão bolhas que explodirão com alto potencial de danificação. A cavitação ocorre em locais de pressão muito baixa ou velocidade

excessiva. A cavitação contínua causa desagregação da partícula do metal (“pitting”)

$$\sigma = \frac{p_{atm} - h_S - h_V}{h_{man}} = \frac{NPSH_{disponível}}{h_{man}}$$

PRESSÃO ATMOSFÉRICA DEVIDO À ALTITUDE



TENSÃO DE VAPOR DA ÁGUA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

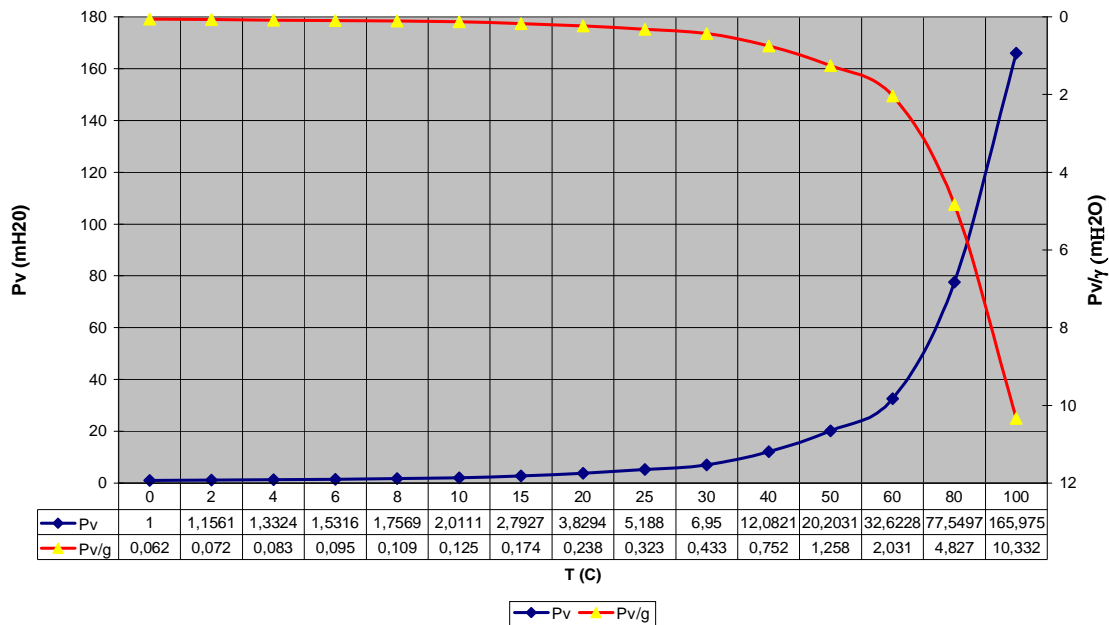


TABELA 1

| DADOS DE PRESSÃO ATMOSFÉRICA PARA DETERMINADAS ALTITUDES LOCAIS | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Altitude em Relação ao Mar (metros) | 0 | 150 | 300 | 450 | 600 | 750 | 1.000 | 1.250 | 1.500 | 2.000 |
| Pressão Atmosférica (mca) | 10,33 | 10,16 | 9,98 | 9,79 | 9,68 | 9,35 | 9,12 | 8,83 | 8,64 | 8,08 |

TABELA 2

| PRESSÃO DE VAPOR DA ÁGUA PARA DETERMINADAS TEMPERATURAS | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| Temperatura da água (°C) | 0 | 4 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 80 | 100 |
| Pressão de Vapor da água (mca) | 0,062 | 0,083 | 0,125 | 0,239 | 0,433 | 0,753 | 1,258 | 2,31 | 4,831 | 10,33 |

➤ NPSH (net positive suction head)

A pressão na seção de alimentação, sucção, das bombas é baixa, normalmente, e nestas condições existe a possibilidade de ocorrer cavitação dentro da bomba. Quando ocorre a cavitação, a pressão do líquido, num determinado ponto, é reduzida a pressão de vapor formando bolhas devido à “fervura” que provoca perda de eficiência e danos sensíveis.

A energia ou carga total na entrada da bomba é conhecida como NPSH, existindo dois valores: *requerido*, fornecido pelo fabricante pois é experimental, que deve ser excedido para que não ocorra a cavitação e o *disponível* que representa a energia ou carga no sistema elevatório.

$$NPSH_{\text{disponível}} = \pm h_s + \frac{P_{\text{atm}} + P_v}{\gamma} - \Delta e_s = \pm h_s + h_{\text{atm}} + h_v - \Delta e_s$$

h_s = altura da sucção (cota do eixo da bomba – cota do nível do fluido)

+ h_s = afogada (eixo da bomba abaixo do nível do fluido)

- h_s = aspirada (eixo da bomba acima do nível do fluido)

h_{atm} = pressão atmosférica local em coluna de fluido

h_v = pressão de vapor do fluido em coluna de fluido

Δe_s = perda de energia na sucção

NPSH_{disponível} = é referente a instalação ou projeto;

NPSH_{requerido} = fabricante;

Para evitar a cavitação: **NPSH_{disponível} > NPSH_{requerido}**

➤ Altura da Submergência, S

A velocidade do fluido no poço de sucção deve ser inferior a 1m/s e oferecer um recobrimento de fluido entre a entrada do fluido e a cota do nível de fluido para evitar a entrada de ar e vorticidade.

$$S \geq \frac{V^2}{2 * g} + 0,20$$

$$S \geq 2,5 * D_s + 0,10$$

profundidade útil : $h \geq 0,5D_s$

5.2 Recalque

Compõe o recalque o conjunto de condutos e conexões que conduzem o fluido da bomba até o reservatório superior.

5.2.1 Diâmetro Econômico

➤ Formula de Bresse $D_R = K * \sqrt{Q}$

| V (m/s) | K | V (m/s) | K |
|---------|------|---------|------|
| 2,26 | 0,75 | 1,27 | 1,00 |
| 1,99 | 0,80 | 1,05 | 1,10 |
| 1,76 | 0,85 | 0,88 | 1,20 |
| 1,57 | 0,90 | 0,65 | 1,40 |

➤ Formula de Forcheimmer Bresse $D_R = K \sqrt[4]{NU} * \sqrt{Q}$

➤ $D_R = 0,9Q^{0,45}$ (EUA)

➤ $D_R = K \left(\frac{NU * e}{f} \right)^{0,54} Q^{0,46}$ (França)

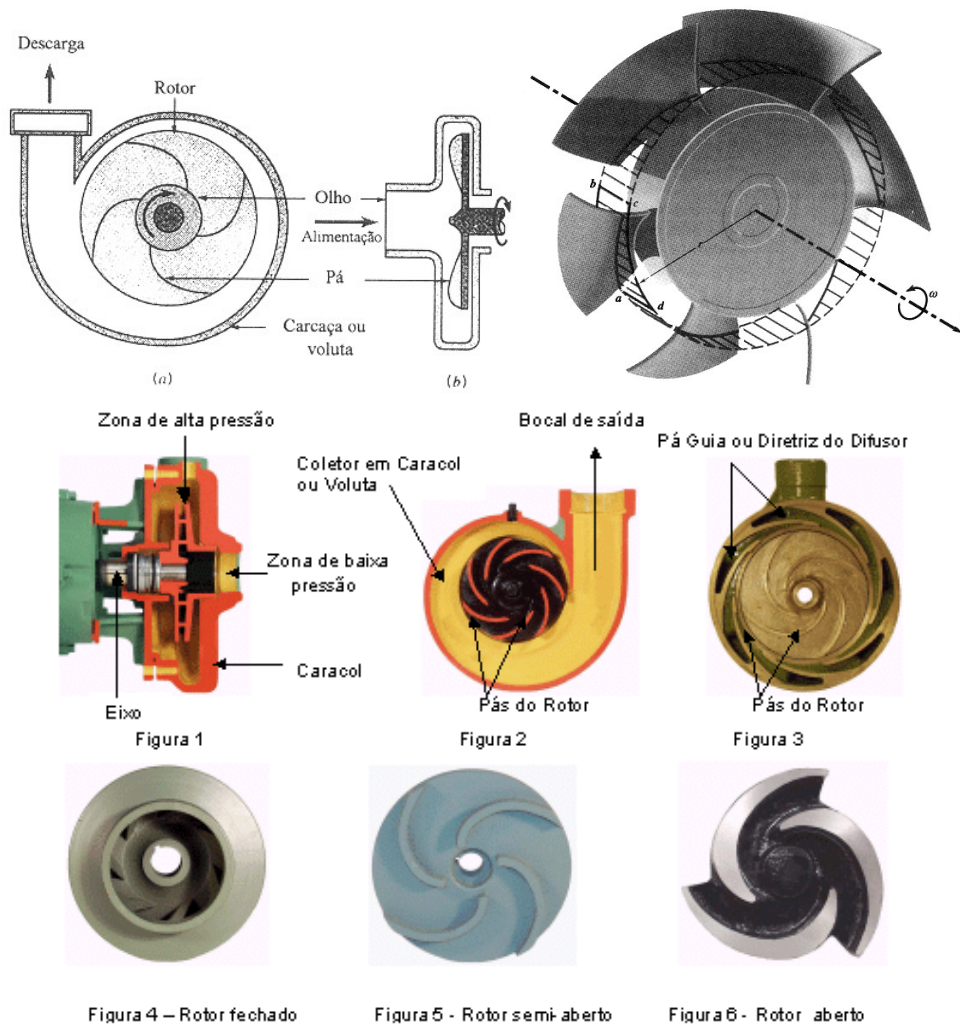
NU= número de horas de funcionamento dividido por 24h;
 e= custo da energia elétrica em kWh;
 f= custo material do conduto em kg;
 K= coeficiente (1,55 para 24h e 1,35 para 10h).

➤ Para pouco funcionamento: $D_R = 1,3 * (NU)^{1/4} \sqrt{Q}$

NU= número de horas de bombeamento dividido por 24 (fração de utilização)

5.3 Bombas ou máquinas de fluxo

Bombas são equipamentos, basicamente rotor e motor, que transferem energia para o deslocamento do fluido.



Entre os tipos de bombas dar-se-á atenção especial às centrífugas, podendo-ás classificarem em:

- Movimento do fluido: sucção simples (1 rotor) ou dupla (2 rotores);
- Posição do eixo: vertical, inclinado e horizontal;
- Pressão: baixa ($h_{man} \leq 15m$), média ($15m \leq h_{man} \leq 50m$) e alta ($h_{man} \geq 50m$);
- Instalação: afogada ou aspirada.

5.3.1 Potência

A potência, Pot , que corresponde ao trabalho realizado para elevar o fluido com a altura manométrica, h_{man} , é:

$$Pot = \frac{\gamma * Q * h_{man}}{\eta} (W)$$

$$Pot = \frac{\gamma * Q * h_{man}}{736 * \eta} (CV)$$

$$Pot = \frac{0,986 * \gamma * Q * h_{man}}{736 * \eta} (HP)$$

$$\eta = \eta_{motor} * \eta_{Bomba}$$

O rendimento, η , aumenta com o tamanho da bomba (grandes vazões) e com a pressão.

| Pressão | Vazão (l/s) | η |
|----------------|-------------|--------|
| Baixa | 3 | 0,56 |
| | 25 | 0,78 |
| Alta | 2 | 0,53 |
| | 25 | 0,81 |
| | 100 | 0,84 |
| Grandes Vazões | 150 | 0,86 |
| | 1000 | 0,90 |
| | 2000 | 0,91 |

Na prática admiti-se uma certa folga para os motores elétricos resultando nos acréscimos:

| Pot. (W) | Acréscimo (%) |
|------------|---------------|
| 1490 | 50 |
| 1490-3725 | 30 |
| 3725-7450 | 20 |
| 7450-14900 | 15 |
| >14900 | 10 |

5.3.2 Velocidade Específica, η_s

A velocidade específica é definida como a rotação (rpm) de uma bomba ideal para transportar $1m^3/s$ à altura de 1m:

$$\eta_s = \frac{\eta^* \sqrt{Q}}{h_{man}^{3/4}} \quad |\eta \rightarrow \text{rpm}; \eta_s \rightarrow \text{rpm}|$$

$$\eta_s = \omega^* \frac{\sqrt{Q}}{g * h_{man}^{3/4}} \quad |W * \text{rad/s}|$$

$$\eta_s = \frac{\eta^* \sqrt{Pot}}{h_{man}^{5/4}}$$

Os tipos de bombas: radial, axial, semi axial e mista, distinguem-se pela velocidade específica.

Tabela 20

| Tipo | η_s |
|-------------------|----------|
| Radial centrífuga | |
| Lenta | <90 |
| Normal | 90-130 |
| Rápida | 130-220 |
| Mista | 220-440 |
| Semi axial | 440-500 |
| Axial | >500 |

5.3.3 Associação de bombas

Várias são as razões que levam à necessidade de associar bombas:

- Quando a vazão é grande e não há no mercado comercial, bombas capazes de atender a demanda pretendida,
- Ampliações;
- Inexistência de bombas comerciais para grandes alturas manométricas.

Basicamente quando as vazões são amplas utilizam-se bombas em paralelo e para grandes alturas manométricas, utiliza-se em série.

5.3.3.1 Bombas em paralelo

As bombas em paralelo trabalham sob a mesma manométrica mas com vazões somadas.

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$$

$$H_{man1} = H_{man2} = \dots = H_{mann}$$

Dados: Bomba1: Q_1, Pot_1, η_1 e : Bomba2: Q_2, Pot_2, η_2

$$Pot_1 = \frac{\gamma * Q_1 * h_{man1}}{\eta_1}$$

$$Pot_2 = \frac{\gamma * Q_2 * h_{man2}}{\eta_2}$$

$$Pot_1 + Pot_2 = \frac{\gamma * (Q_1 + Q_2) * h_{man}}{\eta}$$

$$\frac{\gamma * Q_1 * h_{man1}}{\eta_1} + \frac{\gamma * Q_2 * h_{man2}}{\eta_2} = \frac{\gamma * (Q_1 + Q_2) * h_{man}}{\eta}$$

$$\frac{Q_1}{\eta_1} + \frac{Q_2}{\eta_2} = \frac{Q_1 + Q_2}{\eta}$$

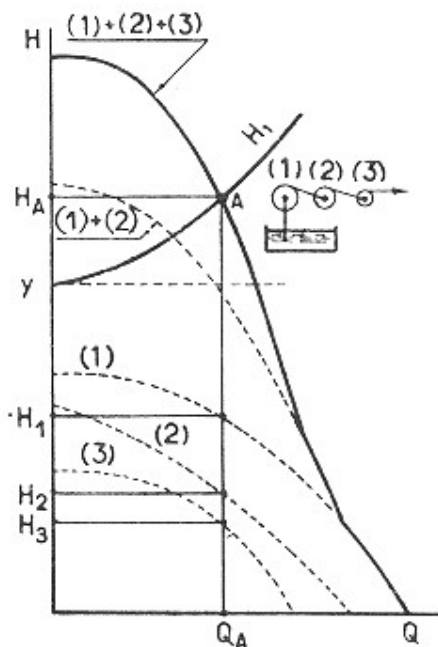
$$\eta = \frac{\eta_1 * \eta_2 * (Q_1 + Q_2)}{\eta_2 * Q_1 + \eta_1 * Q_2}$$

5.3.3.2 Bombas em série

Quando duas bombas operam em série a vazão é a mesma mas as alturas manométricas somam-se:

$$H_{man} = H_{man1} + H_{man2} + \dots + H_{mann}$$

$$Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n$$



Dados: Bomba1: Q_1 , Pot_1 , η_1 e : Bomba2: Q_2 , Pot_2 , η_2

$$\eta = \frac{\eta_1 * \eta_2 * (h_{man1} + h_{man2})}{\eta_2 * h_{man1} + \eta_1 * h_{man2}}$$

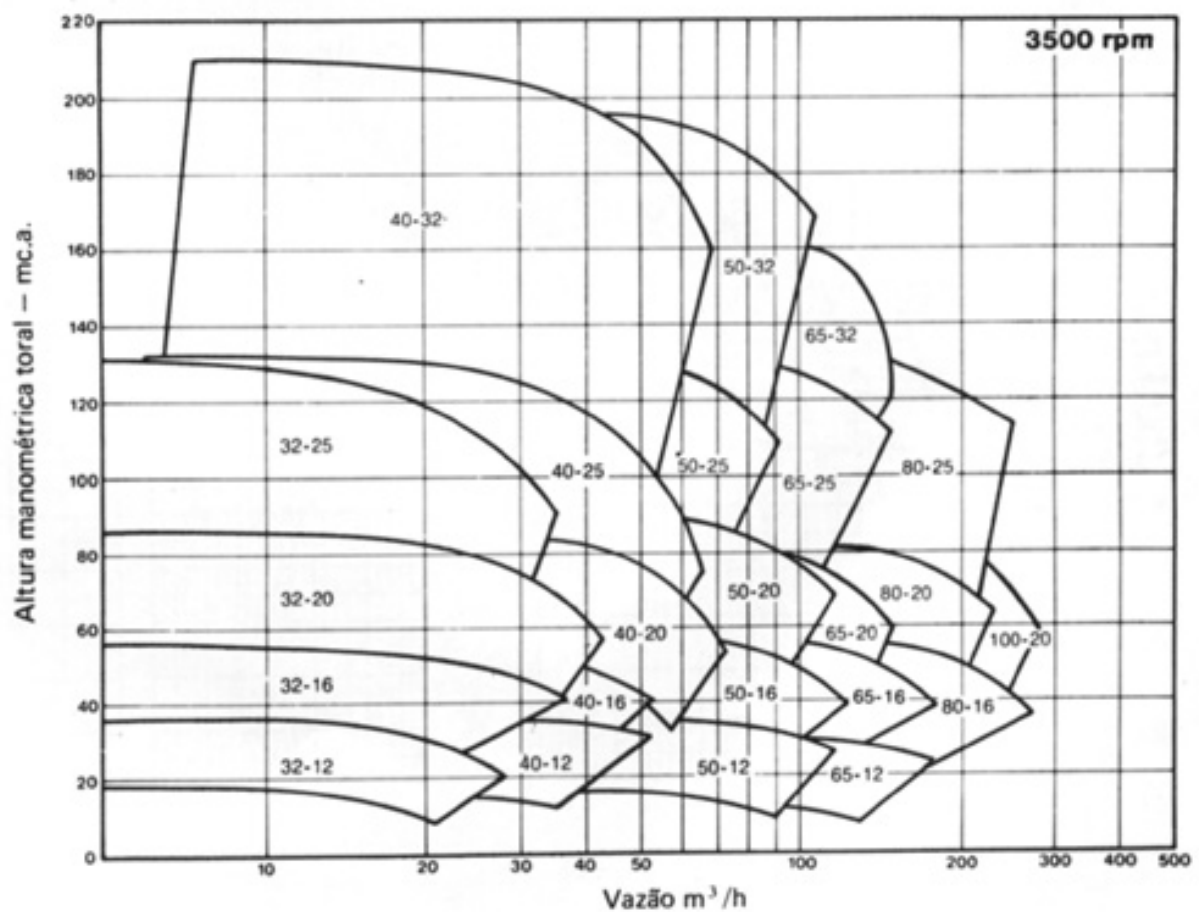
5.3.3.3 Bombas “Booster”

Booster é uma bomba para aumentar a pressão no fluido.

5.3.4 Seleção das bombas

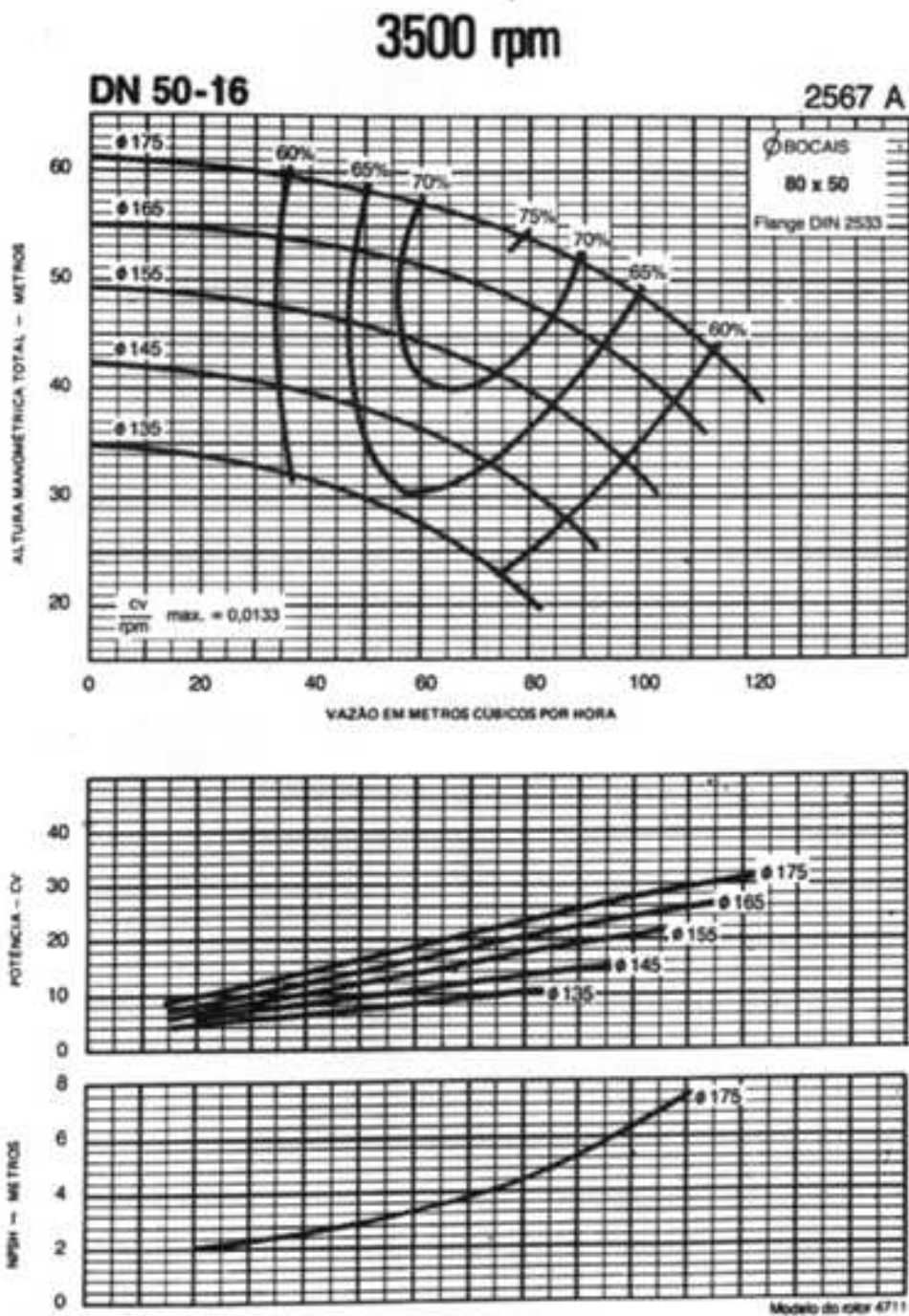
Para escolha de uma bomba deve-se conhecer a vazão e altura manométrica e, consultando o gráfico de seleção de cada fabricante onde se encontram as bombas de uma série com mesmo tipo, escolhe-se, preliminarmente, a bomba.

Gráfico de seleção tipo



Escolhida a bomba no gráfico de seleções, procura-se no catálogo as respectivas curvas características que fornecem: diâmetro do rotor, rendimento, potência, NPSH, rendimento e outros dados úteis que podem ser comparados com os valores calculados esperados para verificação da eficiência do sistema elevatório.

Curvas características Típicas



5.3.5 Curvas características

A maioria dos problemas com os sistemas elevatórios podem ser resolvidos com o auxílio das curvas características. As curvas características são a representação gráfica, ou em forma de tabela, das funções que relacionam os parâmetros envolvidos no funcionamento do sistema.

As curvas características são obtidas experimentalmente, isto é, fornecida pelo fabricante da bomba, num banco de ensaio, onde se medem:

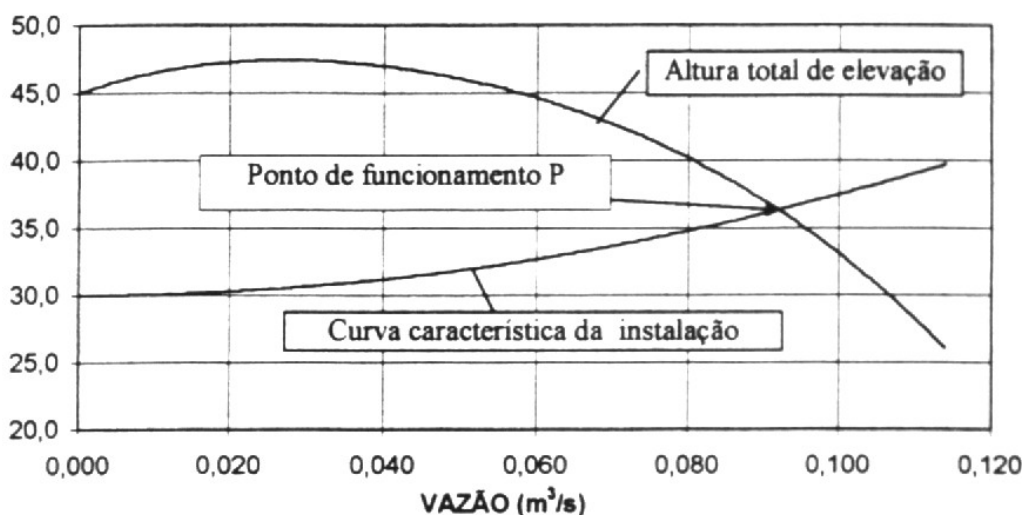
$$H_{\text{man}} \text{ (m)}, Q \text{ (m}^3\text{/s)}, T \text{ (Nm)}, \omega \text{ (rad/s)}, \text{Pot}_{\text{Hid}} = \gamma \cdot Q \cdot H_{\text{man}}, \text{Pot}_{\text{mec}} = T \cdot \omega, \eta = \frac{\text{Pot}_{\text{Hid}}}{\text{Pot}_{\text{mec}}}.$$

Os catálogos dos fabricantes de bombas, via de regra, possuem gráficos com uma família de curvas com: H_{man} versus Q ; η versus Q , NPSH_{req} versus Q , Pot versus Q .

5.3.6 Ponto de Funcionamento

O ponto de funcionamento representa fisicamente, para um sistema projetado, com geometria, materiais, equipamentos conhecidos, a vazão correspondente recalçada pelo conjunto moto-bomba. Seu cálculo depende do conhecimento da influência hidráulica dos componentes do sistema de forma a equacionar as perdas de energia e quantificá-las para cada vazão.

A curva resultante da consideração de todas as perdas de energia é denominada curva característica da instalação, geralmente apresentando a perda de energia em função da vazão. Essa curva é lançada no gráfico da altura total altura manométrica em função da vazão; o ponto de cruzamento dessas duas curvas é o ponto de funcionamento da instalação.



6 BIBLIOGRÁFIA UTILIZADA

- [1] Okuno, Caldas e Chow: “Física para Ciências Biológicas e Biomédicas”, Editora Harbra Ltda, 1982;
- [2] Munson, Young e Okiishi: “Fundamentos da Mecânica dos Fluidos”, Editora Edgard Blücher Ltda, 1997.
- [3] Duarte, Marcos: “Princípios Físicos da Interação ente o Ser Humano e Ambiente Aquático”, Universidade de São Paulo, Escola de Educação Física e Esporte, Laboratório de Biofísica, 2001 (www.usp.br/eef/lob/md/)
- [4] Vieira, Rui Carlos de Camargo: “Atlas de Mecânica dos Fluidos, Estática”, Editora Universidade de São Paulo, 1970.
- [5] Vieira, Rui Carlos de Camargo: “Atlas de Mecânica dos Fluidos, Fluidodinâmica”, Editora Universidade de São Paulo, 1970.
- [6] Vieira, Rui Carlos de Camargo: “Atlas de Mecânica dos Fluidos, Cinemática”, Editora Universidade de São Paulo, 1970.
- [7] Brunetti, Franco. “Curso de Mecânica dos Fluidos”, 1974.
- [8] Schiozer, Dayr: “Mecânica dos Fluidos”, LTC Livros Técnicos e Científicos SA
- [9] Josie, Jacob: “Introduction to Hydraulics and Fluid Mechanics”, Harper & Brothers Publishers, New York, EUA, 1952.
- [10] Fox McDonald: “Introdução a Mecânica dos Fluidos”, 4ª Edição, LTC Livros Técnicos e Científicos SA, 1997.
- [11] Kaufmaun, Walther e Chilton, Ernest G.: “Fluid Mechanics”, Tata Mc Graw-Hill Publishing Company Ltda, New Delhi, 1979.
- [12] Bennett, C. O. e Myers, J. E.: “Fenômenos de Transporte, Quantidade de Movimento, Calor e Massa”, Makron Books do Brasil Ltda, 1978.
- [13] Giles, Ranald V.: “Mecânica dos Fluidos e Hidráulica”. Coleção Schaum, Editora McGraw-Hill Ltda, 1978;
- [14] Gomide, Reynaldo: “Fluidos na Indústria”. R. Gomide, 1993
- [15] Novais-Barbosa J.: “Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral”. Porto Editora Ltda, Lisboa, Portugal, 1985;
- [16] Kremenetski, N., Schterenliht, D., Alichev V., Iakovlev L.: “Hidráulica”, Editora Mir Moscovo, 1989;
- [17] Simon, Andrew L.: “Practical Hydraulics”. John Wiley & Sons, 1981.
- [18] Curso de Hidráulica. Escola Superior de Tecnologia. Universidade do Algarve. Área Departamental de Engenharia Civil. Núcleo de Hidráulica e Ambiente. Faro, Portugal, fevereiro, 2001;
- [19] Fernandez & Fernandez, Miguel. Araujo, Roberto, Ito, Acásio Eiji. “Manual de Hidráulica Azevedo Netto” Editora Edgard Blücher Ltda, 1998,
- [20] Chow, Ven Te. “Open –channel Hydraulics”. McGraw-Hill International Book Company, 1985,
- [21] Quintela, Antônio de Carvalho. “Hidráulica”. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal, 1981;
- [22] Porto, Rodrigo de Melo. “Hidráulica Básica”. EESC-USP, SP, 1998;
- [23] Linsley, Ray K. , Franzini, Joseph B. “Engenharia de Recursos Hídricos” Editora Universidade de São Paulo, 1978;
- [24] Jones, Jacob O. “Introduction to Hydraulics and Fluid Mechanics”, Harper & Brothers Publishers, New York;
- [25] French, Richard H., “Open-channel Hydraulics”. McGraw-Hill International Book Company, 1986.