Aula 3
Perda de carga

SHS01013 – Máquinas Hidráulicas

Prof. Assoc. Frederico Fábio Mauad
Doutorando : Talyson de Melo Bolleli

Escoamento em dutos sob-pressão

- O transporte de fluídos é feito através de condutos projetados para esta finalidade.

Esses condutos podem ser:

  - Abertos para a atmosfera recebendo o nome de canais e destinados principalmente ao transporte de água.
  - Condutos fechados onde a pressão é maior que a atmosférica, sendo assim denominados dutos sob pressão.

- Os escoamentos em dutos sob pressão são característicos nos escoamentos provocados por bombas hidráulicas.

Perda de carga

- O escoamento interno em tubulações sofre forte influência das paredes, dissipando energia devido ao atrito.

- As partículas em contato com a parede adquirem a velocidade da parede, ou seja, velocidade nula, e passam a influir nas partículas vizinhas através da viscosidade e da turbulência, dissipando energia.

- Essa dissipação de energia provoca um abaixamento da pressão total do fluido ao longo do escoamento que é denominada de <u>Perda de Carga.</u>

- A perda de carga pode ser distribuída ou localizada, dependendo do motivo que a causa:

Perda de carga

- **Perda de Carga Distribuída**: a parede dos dutos retilíneos causam a perda de pressão distribuída ao longo do comprimento do tubo, fazendo com que a pressão total vá diminuindo gradativamente ao longo do comprimento e por isso é denominada de Perda de Carga Distribuída.

- **Perda de Carga Localizada**: este tipo de perda de carga é causado pelos acessórios de canalização, isto é, as diversas peças necessárias para a montagem da tubulação e para o controle do fluxo do escoamento, que provocam variação brusca da velocidade, em módulo ou direção, intensificando a perda de energia nos pontos onde estão localizadas, sendo por isso conhecidas como Perdas de Carga Localizadas. O escoamento sofre perturbações bruscas em pontos da instalação tais como em válvulas, curvas, reduções, etc.

Perda de carga distribuída

- A perda de carga distribuída ocorre ao longo dos trechos retos de tubulação devido ao atrito.

- Esta perda de carga depende do diâmetro D e do comprimento L do tubo; da rugosidade ε da parede; das propriedades do fluido, da massa específica ρ e a viscosidade μ; e por fim da velocidade V do escoamento.

- A rugosidade da parede depende do material de fabricação do tubo bem como do seu estado de conservação. De maneira geral, um tubo usado apresenta uma rugosidade maior que um tubo novo.

- A tabela a seguir apresenta valores da rugosidade para alguns tipos de tubos mais comuns, incluindo a condição de uso para alguns tipos:

Perda de carga distribuída

MATERIAL	Rugosidade Absoluta (mm)
Aço comercial novo	0,045
Aço laminado novo	0,04 a 0,10
Aço soldado novo	0,05 a 0,10
Aço soldado limpo, usado	0,15 a 0,20
Aço soldado moderadamente oxidado	0,4
Aço soldado revestido de cimento centrifugado	0,10
Aço laminado revestido de asfalto	0,05
Aço rebitado novo	1 a 3
Aço rebitado em uso	6
Aço ou ferro galvanizado	0,15
Ferro forjado	0,05
Ferro fundido novo	0,25 a 0,50
Ferro fundido com leve oxidação	0,30
Ferro fundido velho	3 a 5
Ferro fundido centrifugado	0,05
Ferro fundido com cimento centrifugado (uso)	0,10
Ferro fundido com revestimento asfáltico	0,12 a 0,20
Ferro fundido oxidado	1 a 1,5
Cimento amianto novo	0,025
Concreto centrifugado novo	0,16
Concreto armado liso, vários anos de serviço	0,20 a 0,30
Concreto com acabamento normal	1 a 3
Concreto protendido Freyssinet	0,04
Cobre, latão, aço revestido de epoxi, PVC,	0,0015

Perda de carga distribuída

- Dentre as propriedades do fluido, a viscosidade é a mais importante na dissipação de energia. Além de ser proporcional à perda de carga, sua relação com as forças de inércia do escoamento fornece um número adimensional, o número de Reynolds, Re, que é o parâmetro que indica o regime do escoamento.

- Para tubulações de seção circular, o número de Reynolds é calculado conforme a equação abaixo e é admitido o valor 2300 como o limite de transição entre o escoamento laminar e o turbulento.

- A viscosidade cinemática da água varia com a temperatura, mas na prática, para água fria, é usado o valor referente à temperatura de 20 ºC, que vale: ν_{20} = 1,007.10^-6 m²/s.

$$Re = \frac{v.D}{\nu}$$

Método de cálculo de perda de carga distribuída

- Além do apoio teórico, várias experiências foram efetuadas para o desenvolvimento de fórmulas que expressem satisfatoriamente os valores da perda de carga distribuída, destacando-se, entre outros, os trabalhos de Moody-Rouse, Hazen-Williams e Darcy-Weisbach.

- As perdas de carga em geral são expressas pela fórmula:

$$Hp = \xi . \frac{v^2}{2.g}$$

Hp : perda de carga distribuída
v : velocidade
g : aceleração da gravidade
ξ : coeficiente de perda de carga

Método de Moody-Rouse

- O ábaco de Moody-Rouse é um dos mais utilizados para o cálculo de perda de carga distribuída. Entra-se com o valor de D/ε (rugosidade relativa) e o número de Reynolds (Re), obtendo-se o valor de f (coeficiente de atrito).

- A fórmula de perda de carga para aplicação do ábaco de Moody-Rouse é:

$$Hp = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2.g}$$

Hp : perda de carga
f : coeficiente de atrito
L : comprimento da tubulação
D : diâmetro da tubulação
v : velocidade
g : aceleração da gravidade

- A rugosidade relativa é expressa pelo quociente entre o diâmetro da tubulação e a rugosidade absoluta (D/ ε).
- O coeficiente de atrito f deve ser escolhido de maneira que produza a perda de carga correta, portanto, não pode ser uma constante, pois depende da velocidade, diâmetro, massa específica, viscosidade e rugosidade (ábaco de Moody-Rouse).

Método de Moody-Rouse

Material	Tubos novos	Tubos velhos (2)
aço galvanizado	0,00015 a 0,00020	0,0046
aço rebitado	0,0010 a 0,0030	0,0060
aço revestidp	0,0004	0,0005 a 0,0012
aço soldado	0,00004 a 0,00006	0,0024
chumbo	lisos	lisos
cimento-amianto	0,000025	
cobre ou latão	lisos	lisos
concreto bem acabado	0,0003 a 0,0010	
concreto ordinário	0,0010 a 0,0020	
ferro forjado	0,00004 a 0,00006	0,0024
ferro fundido	0,00025 a 0,00050	0,0030 a 0,0050
ferro fundido com revestimento asfático	0,00012	0,0021
madeira em aduelas	0,0002 a 0,0010	
manilhas cerâmicas	0,0006	0,0030
vidro	lisos (3)	lisos (3)
plásticos	lisos (1)	lisos (1)

Rugosidade dos tubos (valores de ε em metros)

USP EESC · USP crhea Núcleo de Hidrometria

Método de Hazen-Williams

- É o método mais empregado no transporte de água e esgoto em canalizações diversas com diâmetro maior que 50 mm. Sua forma é:

$$\Delta h = L.\frac{10,641}{C^{1,85}}.\frac{Q^{1,85}}{D^{4,87}}$$

  - C: coeficiente que depende da natureza do material empregado na fabricação dos tubos e das condições de suas paredes internas
  - Q : vazão, m³/s
  - D: diâmetro, m
  - L : comprimento da tubulação, m

- O coeficiente experimental, denotado por C, assume valores entre 70 e 140 crescendo à medida que o tubo fica mais liso.

Método de Hazen-Williams

- Na tabela abaixo são apresentados os valores do coeficiente C para os tubos mais usados atualmente:

Tipo de Tubo	C
Aço soldado com 30 anos de uso	75
Aço soldado com 20 anos de uso	90
Ferro fundido, usado.	90
Ferro fundido, com 15 anos de uso	100
Aço galvanizado, usado.	100
Aço galvanizado com costura.	125
Aço galvanizado sem costura, novo.	130
Cobre e latão.	130
Plástico PVC, até 75mm	125
Plástico PVC, até 100mm	135
Plástico PVC, mais de 100mm	140

Método de Darcy-Weisbach ou Fórmula Universal

$$\Delta Hp = C_f \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

L : comprimento do encanamento [m]
v : velocidade média do fluido [m/s]
D : diâmetro da canalização [m]
g : constante da aceleração da gravidade, 9,8 [m/s²]
C_f: fator de atrito ou coeficiente de atrito ou fator de resistência [admensional]

USP EESC · USP crhea Núcleo de Hidrometria

Método de Darcy-Weisbach ou Fórmula Universal

A equação da perda de carga pode ser simplificada:

$$\Delta Hp = C_f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad \Rightarrow \quad \Delta Hp = C_f * \frac{L}{D} * \frac{1}{2g} * \left(\frac{4 * Q}{\pi * D^2}\right)^2$$

$$\Delta Hp = \frac{16}{2 * 9{,}81 * \pi^2} * C_f * \frac{L}{D^5} * Q^2$$

$$\Delta Hp = 0{,}0826 * C_f * \frac{L}{D^5} * Q^2$$

Método de Darcy-Weisbach ou Fórmula Universal

- Para o cálculo de C_f temos a fórmula de Swamee e Jain que alia grande simplicidade e é uma ótima aproximação nos regimes de escoamento normalmente encontrados nas instalações de Máquinas Hidráulicas.

$$C_f = \frac{1{,}325}{\left[\ln\left(\frac{\varepsilon}{3{,}7\,D} + \frac{5{,}74}{Re^{0.9}}\right)\right]^2}$$

Método de Darcy-Weisbach ou Fórmula Universal

Exemplos:

- Para ε = 0,00025mm, D = 100mm e Re = 4000:

$$C_f = \frac{1{,}325}{\left(ln\left(\frac{\varepsilon}{3{,}7 * D} + \frac{5{,}74}{Re^{0{,}9}}\right)\right)^2} = \frac{1{,}325}{\left(ln\left(\frac{0{,}00025}{3{,}7 * 100} + \frac{5{,}74}{4000^{0{,}9}}\right)\right)^2} = 0{,}040539$$

- Desprezando o termo $5{,}74/Re^{0{,}9}$:

$$C_f = \frac{1{,}325}{\left(ln\left(\frac{\varepsilon}{3{,}7 * D}\right)\right)^2} = \frac{1{,}325}{\left(ln\left(\frac{0{,}00025}{3{,}7 * 100}\right)\right)^2} = 0{,}040539$$

Método de Darcy-Weisbach ou Fórmula Universal

Ou seja:

$$C_f = \frac{1{,}325}{\left(ln\left(\frac{\varepsilon}{3{,}7 * D} + \frac{5{,}74}{Re^{0{,}9}}\right)\right)^2} \cong \frac{1{,}325}{\left(ln\left(\frac{\varepsilon}{3{,}7 * D}\right)\right)^2}$$

Perda de carga localizada

- A perda localizada ocorre sempre que um acessório é inserido na tubulação, seja para promover a junção de dois tubos, ou para mudar a direção do escoamento, ou ainda para controlar a vazão.

- A ocorrência da perda de carga é considerada concentrada no ponto provocando uma queda acentuada da pressão no curto espaço compreendido pelo acessório.

- A seguir veremos os métodos de cálculo da perda de carga localizada.

Método do Comprimento Equivalente

- É definido como um comprimento de tubulação, L_{eq}, que causa a mesma perda de carga que o acessório. Os comprimentos equivalentes dos acessórios presentes na tubulação são adicionados ao comprimento físico da tubulação fornecendo um comprimento equivalente, L_{eq}.
- Matematicamente, o comprimento equivalente pode ser calculado pela expressão:

$$L_{eq} = L + \sum l_{eq}$$

- Este comprimento equivalente permite tratar o sistema de transporte de líquido como se fosse um único conduto retilíneo. Nessa condição a perda de carga total do sistema pode ser avaliada pela equação da Fórmula Universal:

$$\Delta Hp = 0{,}0826 * C_f * \frac{L}{D^5} * Q^2$$

onde o comprimento L é substituído pelo comprimento equivalente L_{eq}.

Método do comprimento equivalente

- O comprimento equivalente de cada tipo de acessório pode ser determinado experimentalmente, e o valor obtido é válido somente para o tubo usado no ensaio.

- Para uso em tubos diferentes os valores devem ser corrigidos em função das características do novo tubo.

- Existem também tabelas de fácil utilização onde são constados os comprimentos equivalentes dos principais componentes de um sistema hidráulico.

Método do coeficiente de perda em função da carga cinética

- O acessório tem sua perda de carga localizada calculada através do produto de um coeficiente característico pela carga cinética que o atravessa.

- Cada tipo de acessório tem um coeficiente de perda de carga característico, normalmente indicado pela letra K.

- A perda causada pelo acessório, em m.c.a, é calculada pela expressão:

$$\Delta h_i = K_i \frac{v^2}{2g}$$

Método de coeficiente de perda em função da carga cinética

- A perda de carga total do sistema é dada pela somatória das perdas de carga dos acessórios mais a perda distribuída do tubo, resultando na expressão abaixo, na qual a carga cinética foi colocada em evidência.

$$\Delta Hp = (C_f \frac{Leq}{D} + \sum K_i) \frac{v^2}{2g}$$

- O método de cálculo através da carga cinética é mais geral, pois o valor do coeficiente K não depende do tubo usado no ensaio como ocorre com o comprimento equivalente.

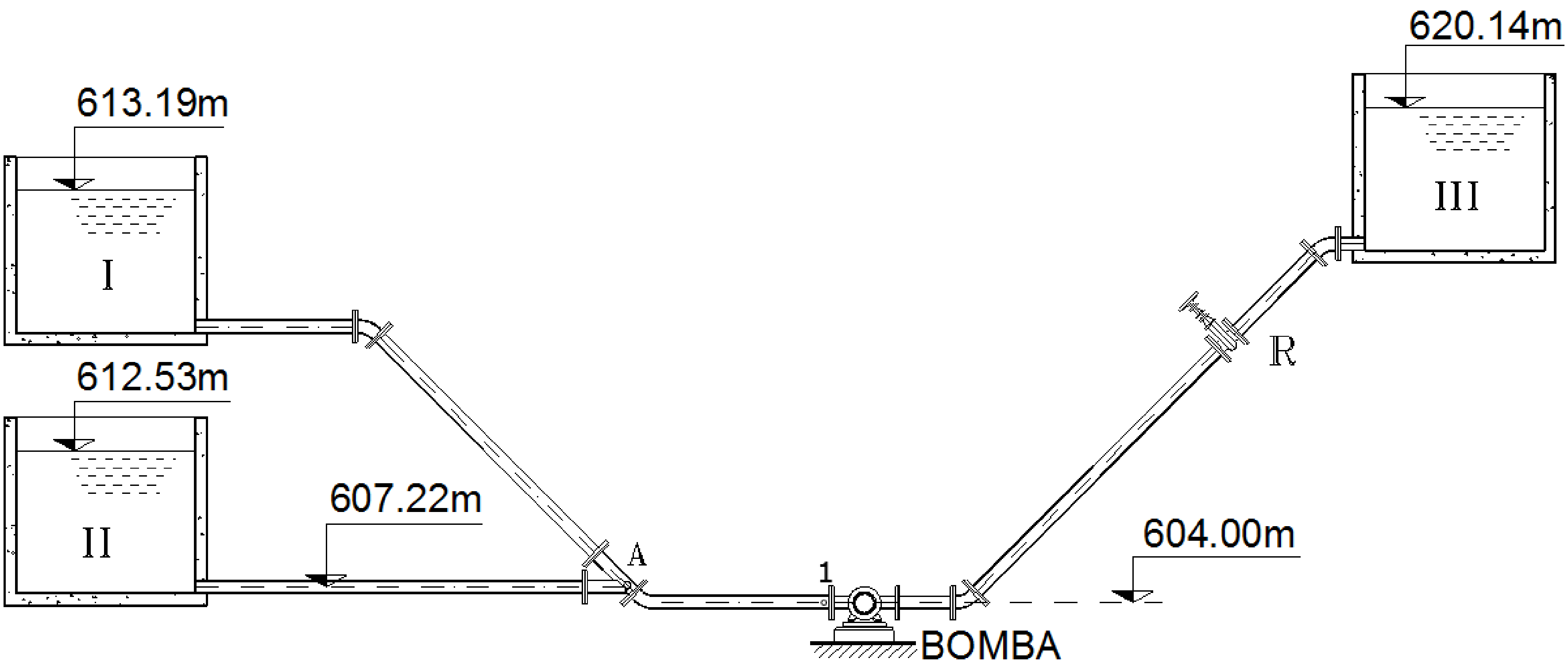
USP EESC · USP crhea Núcleo de Hidrometria

Exercício 1

O sistema de recalque mostrado na figura possui uma bomba com 10 cv de potência e 75% de rendimento. A tubulação que liga o reservatório I até o ponto A é de 4" de diâmetro e transporta uma vazão de 10 l/s com uma perda unitária J = 3,14 m/100 m, e a tubulação que liga o reservatório II ao ponto A é de 4"de diâmetro e transporta uma vazão de 16 l/s com uma perda unitária J = 5,10 m/100 m. A distância do reservatório II ao ponto A é 65 m, da bomba até o registro é 100 m e do registro até o reservatório III é 155 m. Impondo-se que a pressão disponível imediatamente antes da bomba seja 3,0 m.c.a., e sabendo que a perda de carga unitária entre o ponto A e o reservatório III é J = 2,55 m/ 100 m, determine:

a) a distância do reservatório I ao ponto A;
b) a distância do ponto A até a bomba;
c) a perda de carga no registro.

Exercício 1



Dados:

Pot_B = 10 cv ; η_B = 75 %

$D_{I\text{-}A}$ = 4″ = 101,6 mm; $Q_{I\text{-}A}$ = 10 l/s = 0,01 m³/s; $J_{I\text{-}A}$ = 3,14 m /100 m

$D_{II\text{-}A}$ = 4″ = 101,6 mm; $Q_{II\text{-}A}$ = 16 l/s = 0,016 m³/s; $J_{II\text{-}A}$ = 5,10 m /100 m

$L_{II\text{-}A}$ = 65 m; $L_{B\text{-}R}$ = 100 m; $L_{R\text{-}III}$ = 155 m; $J_{A\text{-}III}$ = 2,55 m/ 100 m

Pressão disponível imediatamente antes da bomba (ponto 1) = 3,0 mca

Exercício 1

a) Determinar $L_{I\text{-}A}$:

Aplicando Bernoulli entre o R_{II} e o ponto A, temos:

$$\cancelto{0}{\frac{p_{II}}{\gamma}} + \cancelto{0}{\frac{V_{II}^2}{2g}} + z_{II} = \frac{p_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + z_A + \Delta H_{II-A}$$

$$612{,}53 = \frac{p_A}{\gamma} + \frac{1}{19{,}62} \cdot \left(\frac{4 \times 0{,}016}{\pi \cdot (0{,}1016)^2} \right)^2 + 607{,}22 + \left(\frac{5{,}10}{100} \times 65 \right) \Rightarrow \frac{p_A}{\gamma} = 1{,}8\,\text{mca}$$

Aplicando Bernoulli entre o R_I e o ponto A:

$$\cancelto{0}{\frac{p_I}{\gamma}} + \cancelto{0}{\frac{V_I^2}{2g}} + z_I = \frac{p_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + z_A + \Delta H_{I-A}$$

$$\mathbf{613{,}19 = 1{,}8 + \frac{1}{19{,}62} \cdot \left(\frac{4 \times 0{,}01}{\pi \cdot (0{,}1016)^2} \right)^2 + 607{,}22 + \left(\frac{3{,}14}{100} \times L_{I-A} \right)} \Rightarrow L_{I-A} = 130{,}6\,\text{m}$$

Exercício 1

b) Determinar $L_{A\text{-}B}$:

Aplicando Bernoulli entre o ponto A e o ponto 1:

$$\frac{p_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + z_A = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + \Delta H_{A-1}$$

$$V_A = V_1$$

$$\mathbf{1{,}8 + 607{,}22 = 3{,}0 + 604 + \left(\frac{2{,}55}{100} \times L_{A-1}\right)} \Rightarrow L_{A-1} = \mathbf{79{,}22}\,\mathrm{m}$$

Exercício 1

c) Determinar Δ_{hp}:

Aplicando Bernoulli entre o ponto 1 e o R_{III}:

$$\frac{p_1}{\gamma}+\frac{V_1^2}{2g}+z_1+H_B=\cancel{\frac{p_{III}}{\gamma}}^{0}+\cancel{\frac{V_{III}^2}{2g}}^{0}+z_{III}+\Delta H_{1-III}$$

$$Pot_B=\frac{\gamma H_B\left(Q_{I-A}+Q_{II-A}\right)}{75\,\eta}\Rightarrow H_B=\frac{75\times 0{,}75\times 10}{1000\times 0{,}026}\Rightarrow \quad H_B=21{,}6\,m$$

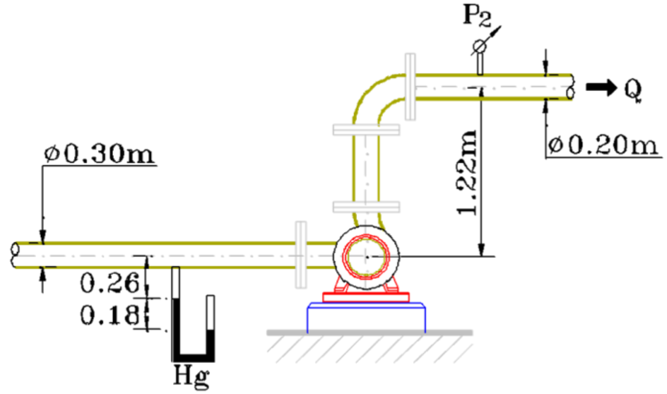
Logo,

$$\mathbf{3{,}0+\frac{1}{19{,}62}\cdot\left(\frac{4\times 0{,}026}{\pi\cdot(0{,}1016)^2}\right)^2+604+21{,}6=620{,}14+\left[\Delta h_R+\left(\frac{2{,}55}{100}\times 255\right)\right]}$$

$$\Delta h_R=\mathbf{2{,}48}\,mca$$

Exercício 2

Uma bomba tem uma vazão de 9000 l/min de água. Seu conduto de sucção horizontal tem um diâmetro de 30 cm e possui um manômetro, como indicado na figura. Seu conduto de saída horizontal tem um diâmetro de 20 cm, e sobre seu eixo, situado a 1,22 m acima do precedente, reina uma pressão P = 0,70 kgf/cm², superior a atmosférica. Supondo o rendimento da bomba igual a 80%, qual a potência necessária para realizar este trabalho? Dado γ_{Hg} = 13600 kgf/m³.



No dúvidas???

No questions???

Todos understand???

Simples...

Fácil...

Prático...

Ao alcance de qualquer mentalidade