



Hidráulica e hidrometria

Hidráulica e hidrometria

Tiago Borges Ferreira

Julio César Gomes Marques

© 2017 por Editora e Distribuidora Educacional S.A.
Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida ou transmitida de qualquer modo ou por qualquer outro meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia, gravação ou qualquer outro tipo de sistema de armazenamento e transmissão de informação, sem prévia autorização, por escrito, da Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Presidente

Rodrigo Galindo

Vice-Presidente Acadêmico de Graduação

Mário Ghio Júnior

Conselho Acadêmico

Alberto S. Santana
Ana Lucia Jankovic Barduchi
Camila Cardoso Rotella
Cristiane Lisandra Danna
Danielly Nunes Andrade Noé
Emanuel Santana
Grasiele Aparecida Lourenço
Lidiane Cristina Vivaldini Olo
Paulo Heraldo Costa do Valle
Thatiane Cristina dos Santos de Carvalho Ribeiro

Revisão Técnica

Isabella Alice Gotti
Julio César Gomes Marques
Tiago Borges Ferreira

Editoração

Adilson Braga Fontes
André Augusto de Andrade Ramos
Cristiane Lisandra Danna
Diogo Ribeiro Garcia
Emanuel Santana
Erick Silva Griep
Lidiane Cristina Vivaldini Olo

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F383f Ferreira, Tiago Borges.
Hidráulica e hidrometria / Tiago Borges Ferreira, Julio César Gomes Marques. – Londrina : Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017.
200 p.

ISBN 978-85-522-0620-0

1. Hidráulica. 2. Hidrometria. I. Marques, Julio César Gomes. II. Título.

CDD 627

2017
Editora e Distribuidora Educacional S.A.
Avenida Paris, 675 – Parque Residencial João Piza
CEP: 86041-100 – Londrina – PR
e-mail: editora.educacional@kroton.com.br
Homepage: <http://www.kroton.com.br/>

Sumário

Unidade 1 escoamento em tubulações _____	7
Seção 1.1 - Regimes de escoamento _____	9
Seção 1.2 - Número de Reynolds e perda de carga _____	21
Seção 1.3 - Perdas de carga e cálculo de tubulações _____	35
Unidade 2 Sistemas hidráulicos de tubulações e hidráulica de sistema de recalque _____	51
Seção 2.1 - Conduitos equivalentes e tubulações em série em paralelo _____	53
Seção 2.2 - Bombas e reservatórios _____	67
Seção 2.3 - Sistemas de tubulações _____	81
Unidade 3 Regimes de escoamento em canais _____	99
Seção 3.1 - Elementos geométricos dos canais _____	101
Seção 3.2 - Cálculo de canais em regime uniforme _____	121
Seção 3.3 - Perímetro molhado _____	133
Unidade 4 Hidrometria _____	151
Seção 4.1 - Processos de medição de vazões _____	153
Seção 4.2 - Medidores _____	167
Seção 4.3 - Hidrometria aplicada _____	181

Palavras do autor

Prezado aluno, é com muito prazer que trazemos a você a disciplina de Fundamentos de hidráulica e hidrometria, que proporcionará à sua formação o conhecimento das questões relacionadas ao transporte de líquidos em tubulações fechadas e canais, além de conhecimentos importantes para lidar com a escolha e o dimensionamento de bombas hidráulicas. Outro aspecto de extrema relevância que será trabalhado neste livro é a capacidade de desenvolver e/ou utilizar equipamentos de medição de vazão e velocidade desses escoamentos. Tais fatores tornam o conteúdo desta disciplina essencial para o engenheiro moderno, o qual está ciente da importância da água, da sua dinâmica e do comportamento em estruturas naturais e artificiais.

A disciplina está dividida em quatro unidades gerais, sendo a primeira relacionada ao escoamento em tubulações fechadas, com a introdução dos conceitos de regimes de escoamento e perdas de carga. A segunda contempla as associações de tubulação e os desta na perda de carga e vazão, além de abordar, de maneira didática e simplificada, as bombas hidráulicas. A terceira unidade é responsável pelo escoamento em canais, apresentando conceitos importantes para o entendimento, dimensionamento e uso desses condutos. A quarta e última aborda os equipamentos de medida de vazão e velocidade – hidrometria –, conceituando e demonstrando a correta utilização de cada um deles. Esses equipamentos são de extrema relevância no monitoramento dos escoamentos, tanto em tubulações quanto em canais.

Partindo desses preceitos, convidamos-lhe a usufruir do conhecimento reunido neste material para que você se desenvolva como futuro engenheiro, apto a resolver problemas de hidráulica e hidrometria que possam surgir em sua trajetória profissional, sempre com a superior capacidade técnica que adquirirá neste semestre de estudo.

Escoamento em tubulações

Convite ao estudo

O início de uma nova atividade sempre nos traz diferentes sensações, algumas delas um tanto difíceis, porém outras muito motivadoras. Ao deparar com conceitos novos, é normal tratá-los com pré-conceito, o que dificulta seu entendimento. Por isso, convido-o a aproveitar ao máximo a primeira unidade, deixando de lado essa primeira impressão. Pois, apesar de se tratar de uma unidade introdutória, esta traz conceitos muito importantes com relação a todo o restante do nosso curso.

A utilização de uma classificação dos escoamentos pode parecer sem sentido quando vista pela primeira vez, mas quero lhe convidar a enxergar essa classificação com bons olhos, pois ela explicará muito do que buscamos entender sobre os escoamentos. Uma área que sofre influência dessa classificação por exemplo, é a própria perda de carga, haja vista sua direta relação com a velocidade do escoamento. A junção desses aspectos, do regime de escoamento e das perdas de carga tem influência direta no dimensionamento de tubulações, sendo muito relevante o entendimento desses fatores isolados e inter-relacionados.

Para que você possa entender melhor a aplicação desses conteúdos, nesta unidade de ensino trabalharemos com uma situação hipotética na qual você, engenheiro contratado para integrar uma equipe de projetos hidráulicos, foi escalado para o projeto de uma estação de tratamento de água (ETA). Partindo do fato de que nesse projeto você será o engenheiro que analisará os escoamentos, deve estar ciente de que a água, quando está em movimento no interior de uma tubulação, tem determinadas características fluidodinâmicas, sendo a disposição e a trajetória das partículas desse líquido uma delas. Essas propriedades são classificadas de forma que o simples fato de saber em qual dessas categorias o escoamento se enquadra já define o comportamento geral deste. Essa conduta vai desde a regularidade da trajetória das partículas do líquido até a perda de energia causada pelo atrito e acessórios hidráulicos instalados na tubulação. Logo que iniciar seu trabalho, seu primeiro desafio será justamente realizar a determinação da perda de carga em tubulação sob pressão. Por isso, é de extrema importância o completo entendimento desses princípios.

Para conseguir se sair bem no primeiro desafio, quais conceitos você necessitará conhecer? Você acha que será importante conhecer a classificação dos escoamentos em regimes e saber qual é o parâmetro classificatório? Como cada um desses regimes influenciam na perda de carga ocorrida em tubulações sob pressão? Como calcular as perdas para cada um deles?

Assim, gostaria de motivá-lo a estudar esta primeira unidade com afinco, construindo uma boa base a respeito dos conceitos nela apresentada, pois isso lhe aportará conhecimentos essenciais para o aprofundamento do conteúdo. Muitas vezes, deparamos com escoamentos líquidos e nem imaginamos as características básicas, se há classificações definidas, qual é o parâmetro de classificação. Esta unidade dará a você um novo ponto de vista sobre os escoamentos. Animado para enxergá-los com outra perspectiva?

Seção 1.1

Regimes de escoamento

Diálogo aberto

A simples classificação dos escoamentos em categorias (regimes), segundo suas características fluidodinâmicas, facilita bastante o entendimento do comportamento geral dessas correntes de fluidos.

Retomando a situação proposta no início desta unidade, você é o responsável por sanar todas as dúvidas teóricas e práticas sobre esse tema, haja vista seu cargo de engenheiro. Sendo assim, na parte teórica do projeto, necessita-se da classificação de dois escoamentos específicos da ETA. Essa classificação deve agrupar fatores como velocidade e viscosidade, pois isso influencia diretamente na “agitação” da água, auxiliando o processo em diversos momentos, porém prejudicando em outras fases do tratamento.

O primeiro desses escoamentos tem vazão de 20 L/s, em tubulação de 300 mm, sem limitação de comportamento, pois se trata de um trecho inicial do processo. O segundo é um trecho situado após a unidade de coagulação/floculação, sendo obrigatório que haja uma movimentação suave para manutenção dos floculos. O escoamento é composto por uma vazão de 5 L/s e sua tubulação tem 400 mm de diâmetro. Quais categorias você usaria para classificá-lo? Qual é a importância da classificação? Há diferença nas características fluidodinâmicas de cada regime de escoamento?

Não pode faltar

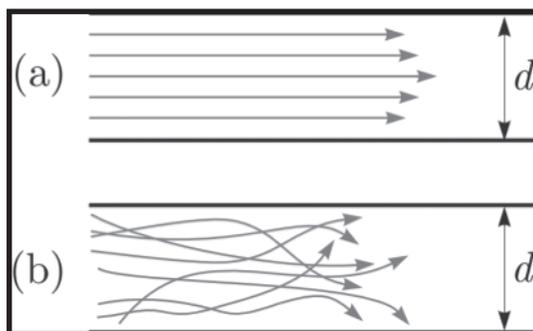
Muito bem, futuro engenheiro. A partir deste momento, o escoamento de líquidos terá outro sentido para você. O ato de escoar em condutos, fechados ou abertos, proporciona aos líquidos diversas características, a começar pela velocidade que eles adquirem. As ligações intermoleculares têm influência na velocidade adquirida, assim como em outras características. A forma com que as moléculas do líquido se encontram interligadas diz respeito ao atrito causado no interior do líquido quando

em movimento. Partindo dessa visão interna do líquido e voltando à velocidade com que ele escoar, podemos relacionar o fato de ter mais ou menos viscosidade com a facilidade de ele escoar. Isso nos remete à ideia de uma relação direta das forças viscosas com a velocidade que o líquido obtém e, conseqüentemente, com suas forças inerciais – relacionadas à energia cinética contida, ou ainda, à tendência de se manter em movimento.

Com base nessa explanação, pode-se pensar em uma forma de classificar o regime de escoamento, padronizando-se as características intrínsecas de cada regime e facilitando o entendimento de diversos fenômenos relacionados a eles.

Uma primeira categoria, denominada regime de escoamento laminar, de forma simplificada, trata-se do escoamento em baixa velocidade, em que as trajetórias das partículas do líquido são bem definidas e constantes. Esse regime de escoamento tem esse nome justamente por haver a formação de lâminas (camadas ao longo do escoamento), como podemos observar na Figura 1.1(a).

Figura 1.1 | Representação da trajetória das partículas do escoamento laminar (a) e turbulento (b).



Fonte: Paumier (2008).

Nesse regime, as forças viscosas têm grande importância, prevalecendo sobre as inerciais. Por isso, em geral, o regime laminar agrupa escoamentos de líquidos muito viscosos e/ou em baixas velocidades (PORTO, 2006).

Se pensarmos em duas categorias de escoamento plenamente estabelecidas, a outra é o escoamento turbulento. Ela representa, em geral, os escoamentos em elevadas velocidades, o que torna a trajetória dessas partículas desordenadas e indefinidas (Figura 1.1(b)).

Em se tratando de escoamentos reais, ou seja, considerando a viscosidade do líquido e o atrito dele com as paredes da tubulação (ou canal), há uma diferente forma de distribuição da velocidade do escoamento nesses dois regimes. Ao introduzir-se o conceito de perda de carga, o contato do líquido com a parede rígida que o limita

(tubulação ou canal) representa uma redução da energia contida nele. No caso do escoamento laminar em tubulações, essa perda de carga se distribui de forma linear ao longo do perfil de escoamento, ou seja, a camada que se encontra em contato direto com a parede tem velocidade nula (camada limite), pelo princípio da aderência, formando um gradiente de aumento até atingir o eixo central da tubulação, local onde a velocidade é máxima (Figura 1.1(a)).



Vocabulário

Camada limite: camada de líquidos que está em contato direto com a parede da tubulação ou canal.

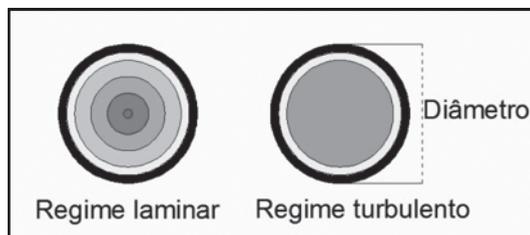
Por outro lado, nossa outra categoria de escoamento – turbulento – não tem essa característica bem definida. Suas partículas se encontram em desordem, havendo muitos deslocamentos no perfil do escoamento e formação de movimentos vorticosos (Figura 1(b)). Esse comportamento impossibilita a definição de gradiente de velocidade perfeito, apesar de apresentar camada limite, com velocidade zero próxima à parede da tubulação e velocidade praticamente uniforme na área interna a ela.

Movimentos vorticosos: relacionados aos movimentos rotacionais, como a formação de pequenos redemoinhos.

Por essas características, na Figura 1.1 podem ser notados diferentes perfis frontais, sendo que o escoamento laminar tem uma frente parabólica justamente pelo gradiente de velocidade bem definido e o escoamento turbulento. Pela irregularidade de suas trajetórias, o escoamento tem um perfil frontal praticamente linear.

Essas particularidades de cada uma das categorias de escoamento configuram diferentes distribuições de velocidades ao longo do perfil, como já comentado, podendo ser representadas pela seguinte Figura 1.2.

Figura 1.2 | Distribuição da velocidade perpendicularmente ao sentido do escoamento



Fonte: elaborada pelo autor.

No regime laminar há uma distribuição coaxial (Figura 1.2), justamente pela formação de camadas, sendo que elas têm velocidades distintas, com seu valor máximo e mínimo no centro e laterais, respectivamente. Diferentemente, no regime turbulento, também há formação de camada limite (camada mais clara), porém, por haver intensa e desordenada movimentação das partículas, a camada contida entre ela tem semelhante velocidade.



Refleta

O regime de escoamento em que se encontra determinada corrente de líquido pode se tratar de fator limitante a diversas operações. Um exemplo é o escoamento de água que passou por processo de coagulação/floculação, pois ele contém sensíveis floculos, os quais podem ser danificados se imposto um regime turbulento, o que reduziria a eficiência do processo. Sabendo disso, você acha útil o conhecimento das características fluidodinâmicas de cada escoamento? Quais são as particularidades desejáveis para um escoamento como esse descrito anteriormente?

Agora que você já conhece as características de cada uma das duas principais categorias de escoamento, necessitamos definir o parâmetro utilizado para incluir um escoamento em uma ou em outra categoria. Apresentemos, então, o número de Reynolds: parâmetro adimensional que relaciona as forças inerciais (referentes à velocidade das partículas de um fluido, pois pode ser aplicado a gases também) com as forças viscosas (oriundas da viscosidade deste fluido).



Saiba mais

Osborne Reynolds foi um engenheiro irlandês que viveu de 1842 a 1912 (PORTO, 2006), e se tornou um dos grandes nomes da hidrodinâmica ao publicar, em 1883, o artigo que consolidou a classificação dos regimes de escoamento. Em reconhecimento, o número adimensional utilizado como parâmetro para essa classificação leva seu nome.

Esse número é conhecido por Re e calculado pela seguinte fórmula matemática:

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu}$$

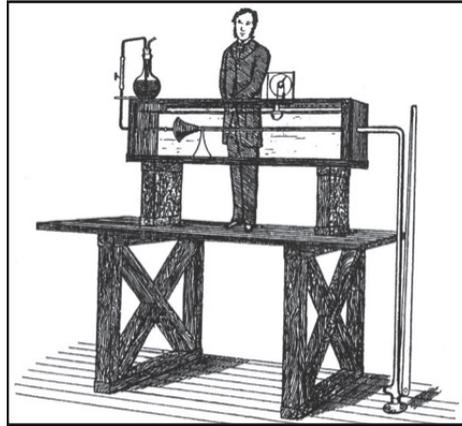
Em que: ρ = massa específica ($\frac{kg}{m^3}$).

v = velocidade do escoamento ($\frac{m}{s}$).

D = diâmetro da tubulação (m).

μ = viscosidade absoluta ou dinâmica ($\frac{N.s}{m^2}$).

Figura 1.3 | Clássica figura do experimento de Reynolds sobre escoamentos



Fonte: Reynolds (1883, anexo 2).

Utilizando esse parâmetro como fator de classificação do escoamento, Osborne Reynolds definiu valores específicos para a transição de cada uma dessas categorias, sendo que, atualmente, após diversos estudos, esses números foram convencionados nos seguintes valores:

Regime laminar de escoamento: $Re \leq 2000$.

Regime turbulento: $Re \geq 4000$.

Há um intervalo entre as duas classificações, o qual não tem comportamento bem definido, variando inconstantemente entre as características de ambas as outras categorias. Essa terceira classificação é conhecida como escoamento de transição e tem número de Reynolds entre 2000 e 4000.



Refleta

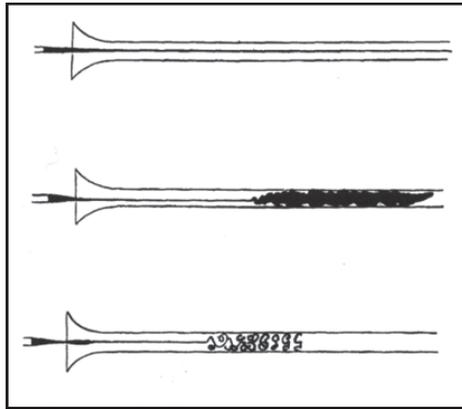
Com base na teoria exposta e na equação de Reynolds,

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu}$$

Para a alteração do regime de escoamento, você deve ter notado que, na prática, o único parâmetro facilmente alterável é a velocidade, sendo ela a principal ferramenta dos profissionais que lidam com esta área. Por isso, quando necessitar alterar o regime de um escoamento, qual deverá ser o primeiro parâmetro? Outros que influem diretamente na velocidade também devem ser considerados?

É nítida a passagem de um regime de escoamento para outro, sendo que Reynolds os classificou justamente por sua aparência visual (Figura 1.4).

Figura 1.4 | Comportamentos verificados por Reynolds



Fonte: Reynolds (1883, p. 942).

A injeção do corante no interior do escoamento se mantém na forma de um fio linear quando em regime laminar, justamente por ocorrer em camadas, sem nenhuma, ou quase nenhuma, transferência de partículas entre elas. No regime de transição, a linha de pigmento introduzido permanece linear por um curto espaço, dispersando-se a partir de determinado ponto. Diferentemente dos demais, o regime de escoamento turbulento causa uma rápida dispersão do pigmento, proporcionada pela intensa agitação e pelo intenso intercâmbio de partículas no perfil do escoamento.



Assimile

Classificação dos escoamentos em duas categorias de regimes:

- **Regime de escoamento laminar:** escoamento suave, com formação de camadas (lâminas) de diferentes velocidades e pouca, ou nenhuma, passagem de partículas de uma para outra. A velocidade mínima (nula) e máxima se encontram no eixo central e na borda em contato com a parede do tubo, respectivamente, com formação de uma frente parabólica.

• **Regime de escoamento turbulento:** escoamento caracterizado pela elevada agitação molecular, com trajetórias desordenadas e intenso deslocamento de partículas no perfil. A velocidade no eixo formado internamente entre as camadas limites é praticamente a mesma, com formação de uma frente de escoamento reta.

Essa classificação depende de um único parâmetro, isto é, o número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu}$$

- Regime laminar: $Re \leq 2000$.
- Regime de transição: $2000 < Re < 4000$.
- Regime turbulento: $Re \geq 4000$.



Exemplificando

Há um trecho da tubulação da estação de tratamento de água que tem diâmetro de 50 cm e escoava uma vazão de 40 L/s. Como sabemos que a massa específica da água é 1000 kg/m^3 e a viscosidade dinâmica a 20 °C é 10^{-3} , podemos, a partir desses dados, descobrir em qual regime o escoamento se encontra e, assim, seu comportamento geral.

$$Q = v \times A \rightarrow v = \frac{Q}{A} = \frac{0,04}{\pi \times \left(\frac{0,5}{2}\right)^2} = 0,2 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} = \frac{1000 \times 0,2 \times 0,5}{10^{-3}} = 100000$$

O valor de Re de 100000 nos demonstra que o fluxo, sem sombra de dúvidas, encontra-se em regime turbulento. Isso nos adverte para as características que ele apresenta, sendo a principal delas a alta taxa de colisões entre as partículas, por não terem trajetória ordenada. Assim, temos uma ideia das possibilidades de uso desse trecho, com a restrição para processos que necessitem de fluxo suave para manutenção de alguma característica física sensível – como é o caso da água após a formação dos flóculos oriundos do processo de coagulação/floculação.



Pesquise mais

Você pode encontrar outras abordagens dos regimes de escoamento e do número de Reynolds nos materiais a seguir:

- Capítulo 2 do livro *Fundamentos de Engenharia hidráulica*, do Prof. Dr. Márcio Baptista. O livro trata da mecânica dos fluidos na hidráulica, trabalhando com conceitos de regime laminar e turbulento de forma muito didática.
- BAPTISTA, M.; LARA, M. A mecânica dos fluidos na hidráulica. In: BAPTISTA, M.; LARA, M. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014. p. 35-65.
- Primeiro capítulo do livro *Hidráulica básica*, do Prof. Dr. Rodrigo Porto, autoridade na área de hidráulica, que traz de forma simplificada os conceitos de regime laminar e turbulento.
- PORTO, R. de M. Conceitos básicos. In: PORTO, R. de M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006. p. 3-27.

Agora que você já conhece a classificação dos escoamentos em regimes, seu parâmetro de classificação e suas principais características podemos aplicá-los na resolução da situação-problema e, claro, em nossa vida cotidiana.

Sem medo de errar

Lembre-se de que você foi indagado com algumas questões relacionadas à classificação dos escoamentos ao assumir o cargo de engenheiro do projeto da estação de tratamento de água. Você deve responder que as categorias possíveis dizem respeito ao regime de escoamento laminar e turbulento classificadas segundo o número de Reynolds – número adimensional que relaciona as forças cinéticas com as forças viscosas. A definição do regime em que se encontra um determinado escoamento tem relação direta com o comportamento que ele apresentará. Além disso, a definição do regime é justificada pelas diferenças fluidodinâmicas de cada uma das categorias. Algumas características são limitantes para certas aplicações desse escoamento, como foi o caso da incompatibilidade de um escoamento turbulento com a água floculada.

Os trechos carentes de classificação podem ser facilmente classificados com a utilização da fórmula de Reynolds (Re):

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu}$$

Trecho 1

$$Q = v \times A \rightarrow v = \frac{Q}{A} = \frac{0,02}{\pi \times \left(\frac{0,3}{2}\right)^2} = 0,283 \text{ m/s}.$$

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} = \frac{1000 \times 0,283 \times 0,3}{10^{-3}} = 84900.$$

Trecho 2

$$Q = v \times A \rightarrow v = \frac{Q}{A} = \frac{0,005}{\pi \times \left(\frac{0,4}{2}\right)^2} = 0,04 \text{ m/s}.$$

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} = \frac{1000 \times 0,04 \times 0,4}{10^{-3}} = 16000.$$

O regime de escoamento de ambos os trechos é turbulento ($Re \geq 4000$). Para o trecho 1, esse regime não interfere em nada, pois, segundo a própria solicitação que lhe foi feita, não há restrição. Já no caso do trecho 2, o escoamento deve ser em regime laminar, pois a turbulência poderia reduzir a eficiência do tratamento.

Portanto, como vimos que na prática o fator de maior influência na mudança de regime é a velocidade, a sugestão é que se reduza a vazão e, conseqüentemente, a velocidade do escoamento. Como estamos em fase de projeto, outra possibilidade, apesar de mais custosa, seria o aumento do diâmetro da tubulação, pois, como é possível verificar nas fórmulas matemáticas, o incremento desse fator também causaria a redução de velocidade. Apesar de o diâmetro se encontrar no dividendo da fórmula de Re , a redução de velocidade possui expoente 2 (equação da área), o que o torna mais expressivo.

Exemplo: a mudança do diâmetro para 1.600 mm ocasionaria os seguintes resultados:

$$Q = v \times A \rightarrow v = \frac{Q}{A} = \frac{0,005}{\pi \times \left(\frac{1,6}{2}\right)^2} = 249 \times 10^{-3} \text{ m/s}.$$

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} = \frac{1000 \times (2,49 \times 10^{-3}) \times 16}{10^{-3}} = 3984.$$

Assim, poderia ser o caso de utilizar desses dois artifícios para a redução do número de Re e, conseqüentemente, o enquadramento do escoamento no regime laminar.

Avançando na prática

Classificação de nova tubulação da ETA

Descrição da situação-problema

No mesmo projeto da estação de tratamento de águas há outro trecho de tubulação sem a devida classificação e, conseqüentemente, sem conhecimento de suas características hidrodinâmicas. O engenheiro-chefe solicita a você uma classificação do regime de escoamento. Ele afirma que naquele trecho não poderá haver turbulência. A tubulação em questão é composta por um tubo de 600 mm de diâmetro, no qual há vazão prevista de 25 L/s. Sabemos que a massa específica da água é 1000 kg/m^3 e a viscosidade dinâmica a 20°C é 10^{-3} N.s/m^2 . Para responder à solicitação, determine a velocidade do escoamento; o número de Reynolds; classifique-o, segundo esse parâmetro (regime laminar ou turbulento); e encontre a velocidade máxima para que esse escoamento não seja turbulento ($\text{Re} < 4000$).

Resolução da situação-problema

- Cálculo da velocidade média a partir da vazão:

$$Q = v \times A \rightarrow v = \frac{Q}{A} = \frac{0,025}{\pi \left(\frac{0,6}{2}\right)^2} = 0,09 \text{ m/s}.$$

- Cálculo do número de Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} = \frac{1000 \times 0,09 \times 0,6}{10^{-3}} = 54000.$$

- Classificação: regime de escoamento turbulento ($\text{Re} > 4000$).
- Velocidade máxima para que o regime não seja turbulento ($\text{Re} < 4000$).

$$\text{Re} = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} \rightarrow 4000 = \frac{1000 \times v \times 0,6}{10^{-3}} \rightarrow v = \frac{4000 \times 10^{-3}}{1000 \times 0,6} = 6,6 \times 10^{-3} \text{ m/s}.$$

Faça valer a pena

1. O escoamento de fluidos no interior de tubulações tem características fluidodinâmicas condicionadas pela viscosidade e energia cinética presente nesses fluidos. Isso pressupõe diferentes classificações do escoamento com respeito à forma com que essas características se apresentam, por exemplo: o regime de escoamento.

A determinação de categorias, ou melhor, regimes de escoamentos dessas correntes, simplificou o domínio de suas características gerais. Os estudos determinantes para essa categorização ocorreram no Século XIX e seus resultados perduram até os dias de hoje. Quais são os dois principais regimes de escoamento?

- a) Rotacional e irrotacional.
- b) Líquido e gasoso.
- c) Bidimensional e tridimensional.
- d) Laminar e turbulento.
- e) Rápido e lento.

2. Um número adimensional relaciona diferentes parâmetros que influenciam determinado fenômeno. O número de Reynolds é um desses números. Ele relaciona as forças viscosas com as forças inerciais, resultando em um valor numérico sem unidade (adimensional), utilizado para classificação de escoamentos.

Considerando a massa específica da água (ρ) de 1000 kg/m^3 e viscosidade dinâmica (μ) de 10^{-3} N.s/m^2 , qual será o valor do número de Reynolds e o regime que se enquadra num escoamento de água com velocidade de $1,5 \text{ m/s}$ em uma tubulação de 10 cm de diâmetro?

- a) 15000000 – regime laminar.
- b) 15000000 – regime turbulento.
- c) 150000 – regime turbulento.
- d) 150 – regime laminar.
- e) 15000 – regime turbulento.

3. A classificação dos regimes de escoamento implica no conhecimento das características básicas da corrente. Na prática, o fator utilizado para alteração desse parâmetro e, conseqüentemente, das características fluidodinâmicas, é a velocidade. Essa variável está diretamente relacionada à vazão imposta à tubulação.

Para um escoamento de água ($\rho = 1000\text{kg/m}^3$ e $\mu = 10^{-3}\text{N.s/m}^2$) em tubulação de 350 mm, qual é a vazão máxima para que esse escoamento se enquadre no regime laminar e, assim, mantenha as características adequadas ao uso que seu proprietário planeja para ele?

- a) 0,55 L/s.
- b) $0,008\text{ m}^3/\text{s}$.
- c) 8 L/s.
- d) $5,5 \cdot 10^{-6}\text{ m}^3/\text{s}$.
- e) $5,8 \cdot 10^{-3}\text{ m}^3/\text{s}$.

Seção 1.2

Número de Reynolds e perda de carga

Diálogo aberto

O dimensionamento de determinada tubulação é condicionado pelo comportamento do líquido que está sendo conduzido por ela, sendo as perdas de carga um dos fatores mais importantes. O projeto da estação de tratamento de água (ETA) tem várias tubulações a serem dimensionadas, nas quais se deve levar em consideração os diferentes regimes de escoamento, a velocidade e a viscosidade, além do diâmetro da tubulação, pois são os fatores diretamente relacionados às perdas de carga. Você, como um engenheiro perspicaz, deve ter imaginado que o ato de escoar implica em vencer forças de resistência a esse movimento, fato que tem como consequência a redução da energia disponível, ou seja, as perdas de carga. Imagine que, durante a reunião semanal da equipe, você é indagado sobre as seguintes questões:

O regime de escoamento interfere na dissipação de energia (perda de carga) sofrida pelo escoamento? Essas perdas de carga podem ter influência da composição estrutural (material e acessórios hidráulicos) da tubulação?

Não pode faltar

Recapitulando de forma resumida a seção anterior, o número de Reynolds é o fator de classificação do regime de escoamento. Ele é o número adimensional que relaciona as forças inerciais com as viscosas. Valores inferiores a 2000 são classificados como escoamento laminar, prevalecendo as forças viscosas. Para valores superiores a 4000, o regime de escoamento é classificado como turbulento. Neste último regime, há predominância das forças inerciais, relacionadas à velocidade.

Partindo desse ponto, introduziremos novos conceitos, avançando no tema e na construção do raciocínio sobre o escoamento em tubulações.

Daniel Bernoulli (1700 - 1782) propôs a teoria da constância da carga de energia, independentemente da forma em que ela se apresenta, por unidade de volume de

líquido (PORTO, 2006). Em outras palavras, ele afirmou que a carga de energia seria constante, apesar de se encontrar em três formas distintas:

$\frac{P}{\gamma}$ = carga de pressão → Essa parcela da energia diz respeito à pressão presente no líquido naquele momento. Os escoamentos em tubulação geralmente são maiores que a pressão atmosférica e, por isso, são denominados de escoamento sob pressão.

Z = carga de posição → Essa fração de energia está relacionada à posição geométrica, também conhecida como carga de posição, ou carga geométrica, justamente por esse fato.

$\frac{v^2}{2g}$ = carga cinética → A parcela da energia contida nela é atribuída à energia cinética do escoamento.



Saiba mais

Daniel Bernoulli foi um matemático holandês, que viveu de 1700 a 1782 e produziu uma das mais importantes teorias hidráulicas (PORTO,2006).

Assim, Bernoulli afirmou que a soma dessas três formas de energia presentes em uma unidade volumétrica de líquido seria constante, sendo que todas elas são representadas em unidade de metro de coluna de água através da letra m , de metro. Porém, um ponto essencial dessa teoria é a desconsideração da viscosidade e, conseqüentemente, do atrito, ou seja, somente verdade para escoamentos ideais.

$$\frac{P}{\gamma} + Z + \frac{v^2}{2g} = \text{constante.}$$

Essa é uma das teorias mais importantes da hidrodinâmica, sendo aplicável a diversas áreas desta ciência.

Para aplicá-la a dois pontos distintos em escoamentos reais, considerando a viscosidade e o atrito, deve-se acrescentar a citada perda de energia – perda de carga –, resultando na seguinte equação:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H_T$$

Em que: ΔH_T = perda de carga total (m).

Essa equação demonstra que apesar de a energia ser constante, há perdas de carga no sentido do escoamento, pois elas são as dissipações de energia necessárias para vencer as forças de resistências ao movimento (atrito e acidentes físicos internos à tubulação).

As perdas de carga podem ser classificadas em duas grandes categorias: perda de carga distribuída e de carga localizada.

Perda de carga distribuída: essa categoria trata da energia dissipada ao longo da tubulação, caracterizada por uma pequena quantidade de dissipação por unidade de comprimento de tubulação. Ela é condicionada pela velocidade do escoamento, do diâmetro e da rugosidade da tubulação.

Para calcular a fração das perdas de carga, existem diversas fórmulas, todas elas baseadas em experimentos práticos, sendo que uma das principais é a fórmula universal de perda de carga, ou equação de Darcy-Weisbach:

$$\Delta H = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

Em que: ΔH = perda de carga distribuída (m).

f = fator de atrito.

L = comprimento da tubulação (m).

D = diâmetro da tubulação (m).

v = velocidade do escoamento (m/s).

g = gravidade (m/s²).



Pesquise mais

Henri-Philibert-Gaspard Darcy (1803 - 1858) foi um engenheiro francês que, assim como Ludwig-Julius Weisbach (1806 - 1871), engenheiro e professor alemão, contribuiu para a criação da fórmula universal, conhecida também como equação de Darcy-Weisbach (PORTO, 2006).

A obtenção do fator de atrito exemplifica de forma prática a influência do regime de escoamento nas perdas de carga. Para determinado escoamento classificado como regime laminar, o cálculo do fator é simplificado, ficando condicionado somente ao número de Reynolds:

$$f = \frac{64}{Re}$$

Em que: f = fator de atrito.

Re = número de Reynolds.

Para o caso de escoamentos em regime turbulento, esse fator terá influência de outras variáveis, sendo que as fórmulas utilizadas para seu cálculo são mais complexas. A obtenção do fator de atrito (f) para esse caso pode ser realizada por algumas equações propostas para esse fim. Segundo Porto (2006), em 1939, Colebrook e

White apresentaram a primeira delas:

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

Esta fórmula é de resolução complexa por não conseguir explicitar o fator de atrito – ele se encontra nos dois lados da equação. Então, ainda de acordo com Porto (2006), em 1944, Lewis Ferry Moody cria um diagrama no qual representa: no eixo das abscissas, o número de Reynolds; no eixo das ordenadas à direita, a rugosidade relativa ($\frac{\varepsilon}{D}$) (Quadro 1.1); e o fator de atrito (f) na ordenada oposta. Essa proposta de Moody passou a ser expandida e melhorada. A versão mais recente foi montada por Swamee-Jain, e é popularmente conhecida como diagrama de Moody (Figura 1.5).

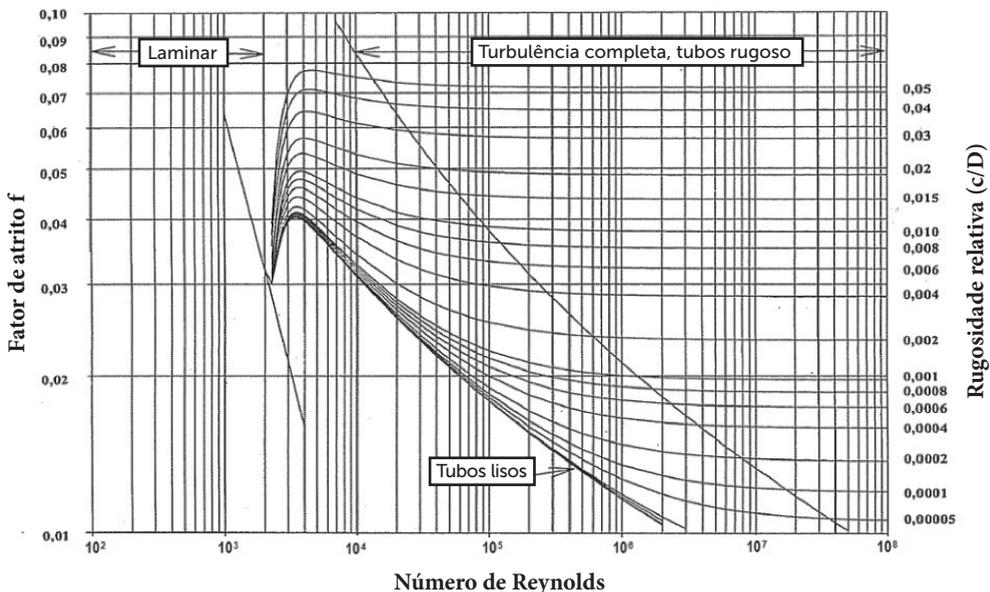


Pesquise mais

Lewis Ferry Moody foi um engenheiro americano que viveu de 1880 a 1953 e produziu a ideia inicial da configuração que conhecemos como diagrama de Moody, justamente em sua homenagem (PORTO,2006).

O vídeo a seguir trata-se de uma rápida e clara explanação sobre como utilizar o diagrama de Moody para obtenção do fator de atrito (f). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=K3EpLD9Y4s4>>. Acesso em: 15 dez. 2016.

Figura 1.5 | Diagrama de Moody



Fonte: Porto (2006, p. 47)

Quadro 1.1 | Rugosidade absoluta de tubulações constituídas de diversos materiais

Material	ϵ (mm) rugosidade
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 revestido de cimento centrifugado	0,1
Aço laminado revestido de asfalto	0,05
Aço rebitado novo	1 a 3
Aço rebitado em uso	6
Aço galvanizado, com costura	0,15 a 0,20
Aço galvanizado, sem costura	0,06 a 0,15
Ferro forjado	0,05
Ferro fundido novo	0,25 a 0,50
Ferro fundido velho	3 a 5
Ferro fundido em uso com cimento centrifugado	0,1
Ferro fundido revestido de asfalto	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 uso	0,20 a 0,30
Concreto protendido <i>Freyssinet</i>	0,04
Cobre, latão, aço revestido de epóxi, PVC, plásticos em geral, tubo extrudado	0,0015 a 0,010

Fonte: adaptada de Porto (2006).



Assimile

Como se pode notar no diagrama de Moody, o fator de atrito (f) demonstra a importância do regime de escoamento na perda de carga. Quando em regime laminar, ele pode ser calculado de forma simplificada, pois se encontra condicionado somente ao número de Reynolds.

$$f = \frac{64}{Re}$$

No caso do escoamento em regime turbulento, haverá a necessidade de utilização do diagrama ou de alguma outra fórmula. Há influência de outros fatores não contemplados pelo número de Reynolds, como a rugosidade, por exemplo. Isso ocorre pelas diferentes predominâncias de forças em cada um dos regimes: viscosas, no caso do laminar, e inerciais, para os turbulentos.



Exemplificando

Como engenheiro contratado pela empresa de projetos, você é indagado sobre o conceito de perda de carga distribuída. Após sua explanação, o engenheiro-chefe solicita o cálculo da dissipação de energia para uma tubulação com as seguintes características:

Comprimento total: 65 m.

Diâmetro: 0,15 m.

Fator de atrito: 0,04.

Velocidade do escoamento: 1,6 m/s.

Calculando:

$$\Delta H_D = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} = 0,04 \frac{65}{0,15} \frac{1,6^2}{2 \times 9,8} = 2,26m.$$

Voltando à classificação das perdas de carga, a outra categoria inclui a energia dissipada em pontos específicos, sendo denominada perda de carga localizada.

Perda de carga localizada: são dissipações pontuais de energia causadas por um obstáculo qualquer que interfere na seção interna da tubulação. Geralmente, são atribuídas aos acessórios hidráulicos presentes na tubulação, dentre os quais se podem citar os registros de gaveta, de esfera, curvas, cotovelos, joelhos etc.

As perdas de carga localizadas podem ser representadas por um coeficiente de perda de carga (k), ou ainda, de forma análoga à perda de carga distribuída, por comprimento equivalente (Le), os quais são tabelados e, em geral, fornecidos pelos fabricantes. O comprimento equivalente é a representação equivalente em tubulação linear de um acidente qualquer.

Partindo dessas duas possíveis representações da perda de carga localizada, as equações utilizadas para cada uma delas, apesar de semelhantes, diferem-se em alguns fatores.

Perda de carga localizada a partir do coeficiente de perda de carga (k) (Quadro 1.2)

$$\Delta H_L = k \frac{v^2}{2g}$$

Em que: ΔH_L = perda de carga localizada (m).

k = coeficiente de perda de carga.

v = velocidade (m/s).

g = gravidade (m/s²).

Perda de carga localizada empregando comprimento equivalente (Le):

$$\Delta H_L = f \frac{Le v^2}{D 2g}$$

Em que: ΔH_L = perda de carga localizada (m).

f = fator de atrito.

Le = comprimento equivalente (m).

D = diâmetro (m).

v = velocidade (m/s).

g = gravidade (m/s²).

Quadro 1.2 | Valores de coeficientes de perda de carga para diversos acessórios hidráulicos

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	Válvula de boia	6

Fonte: Porto (2006, p. 77).

Apresentadas as duas possíveis categorias de perda de carga, podemos concluir o raciocínio do cálculo da perda de carga total com a fórmula geral:

$$\Delta H_T = \Delta H_D + \sum \Delta H_L$$

Em que: ΔH_T = perda de carga total (m).

ΔH_D = perda de carga distribuída (m).

ΔH_L = soma das perdas de carga localizada (m).



Exemplificando

Após calcular e apresentar a perda de carga distribuída da tubulação solicitada pelo engenheiro-chefe e a perda de carga solicitada pelo seu colega, o engenheiro de campo lhe informa que houve uma falha na comunicação, pois na tubulação existem acessórios hidráulicos, que também causam a perda de carga localizada, além da distribuída. Desculpando-se, ele solicita a você o cálculo completo, abordando a perda de carga total.

Recalculando todo o trecho:

Comprimento total: 65 m.

Diâmetro: 0,15 m.

Fator de atrito: 0,04.

Velocidade do escoamento: 1,6 m/s.

Acessórios presentes: uma válvula de gaveta e dois cotovelos de 90° raio longo.

Valor de k unitário dos citados acessórios: 0,2 e 0,6, respectivamente.

$$\Delta H_T = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + \sum k \frac{v^2}{2g} = 0,04 \frac{65}{0,15} \frac{1,6^2}{2 \times 9,8} + (0,2 + 2 \times 0,6) \frac{1,6^2}{2 \times 9,8} = 2,44m.$$



Assimile

Com o valor da perda de carga total de um determinado trecho de tubulação, você poderá analisar a representatividade da perda de carga distribuída e localizada. Isso possibilita redimensionamentos e alterações dos acessórios hidráulicos contido no trecho, a fim de reduzir as perdas de cargas.

Outro importante uso do valor final das perdas de carga é na aplicação de Bernoulli a dois pontos, pois, como se pode notar na equação, ele trata-se de um dos fatores, sendo que seu conhecimento permite obter a dinâmica da energia entre as três cargas possíveis.

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H_T.$$

Com base nessa equação, pode-se fazer o dimensionamento preliminar da tubulação, com os possíveis ajustes de diâmetro, número e disposição dos acessórios hidráulicos.



Refleta

Segundo o texto, as perdas de carga devem ser levadas em consideração no momento do pré-dimensionamento de uma tubulação. Você acha que as perdas de cargas podem inviabilizar o uso de determinado número de curvas, registros ou qualquer outro acessório? Quais seriam as consequências de uma elevada perda de carga localizada em uma tubulação? Poderia ser o aumento da necessidade de adição externa de energia ao escoamento?



Pesquise mais

No vídeo indicado a seguir, o Professor Lourinaldo explica, de forma bastante clara, sobre a equação de Bernoulli, ressaltando os critérios que devem ser seguidos para sua adequada aplicação. Posteriormente, ele introduz e discorre sobre o conceito de perda de carga.

CONCEITO de perda de carga. ProfessorLourinaldo: vídeo do **Youtube**, 15 nov. 2012. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=e6G4KZz8xs0>>. Acesso em: 15 dez. 2016.

Assim, fechamos as explicações sobre os regimes de escoamento e as perdas de carga, além de suas inter-relações. Cabe a você analisar o tema e aplicá-lo na resolução da situação-problema proposta, preparando-se para as questões que possam surgir em seu dia a dia profissional.

Sem medo de errar

Assim, podemos retomar nossa questão inicial sobre a influência do regime de escoamento e a tubulação no cálculo das perdas de carga.

O regime de escoamento interfere nas perdas de carga sofridas pelo escoamento? Essas perdas podem ter influência da composição estrutural (material e acessórios hidráulicos) da tubulação?

Sabemos que a adutora tem as seguintes características:

Q: 400 l/s.

Diâmetro: 40 cm.

Comprimento: 130 m.

Material: ferro fundido com rugosidade ($\epsilon=0,0002591\text{m}$).

Viscosidade dinâmica da água 20 °C - $\mu= 10^{-3}\text{N.s/m}^2$.

Uma válvula de gaveta ($k= 0,2$).

Como você calcularia o valor da perda de carga total desse trecho?

Respondendo a partir do início dos questionamentos, o regime de escoamento é um fator que influencia muito na perda de carga, pois em cada um dos regimes há uma predominância de forças diferentes. No regime laminar, as forças que predominam são as viscosas, condicionando a perda de carga distribuída. Já no caso do regime turbulento, as forças predominantes são as inerciais, pois uma característica marcante desse regime são os elevados valores de velocidades de escoamento. Prova disso são as distintas fórmulas de se calcular as perdas de carga distribuídas.

Sim, as perdas de carga são influenciadas pelo material e pelos acessórios hidráulicos. O material e, conseqüentemente, sua rugosidade, condicionam as perdas de carga pelo atrito causado entre o líquido e a parede da tubulação. Essa variável tem influência direta na perda de carga distribuída. Já os acessórios hidráulicos possuem relação com as perdas de carga localizadas. Esses acessórios oferecem uma maior resistência ao fluxo do líquido, comportando-se como um obstáculo a ser vencido pelo escoamento. Para tal, é necessária uma dissipação de energia maior que em um trecho sem sua presença.

Para o cálculo das perdas de carga, você necessitará calcular os parâmetros necessários.

Cálculo da velocidade necessária na equação de Reynolds:

$$Q = v \times A \rightarrow v = \frac{Q}{A} = \frac{0,4}{(\pi \times 0,2^2)} = 3,18 \text{ m/s}$$

Cálculo do número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} = \frac{1000 \times 3,18 \times 0,4}{10^{-3}} = 1,27 \times 10^6$$

Para obter o fator de atrito da fórmula da perda de carga distribuída, você necessitará, além do número de Reynolds, do valor da rugosidade relativa ($\frac{\epsilon}{D}$):

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,0002591}{0,4} = 6,48 \times 10^{-4}.$$

Com os dois parâmetros calculados, utiliza-se do diagrama de Moody para obtenção do fator de atrito.

$$(f) = 0,02.$$

Depois de calcular todos esses fatores, deve-se aplicá-los nas equações de perda de carga distribuída:

$$\Delta H_D = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} = 0,02 \frac{130}{0,4} \frac{3,18^2}{2 \times 9,8} = 3,35m,$$

e também perda de carga localizada, promovida pela válvula de gaveta:

$$\Delta H_L = k \frac{v^2}{2g} = 0,2 \frac{3,18^2}{2 \times 9,8} = 0,10m.$$

Então, como se sabe que a perda de carga total é a somatória de todas as perdas de carga,

$$\Delta H_T = \Delta H_D + \Delta H_L = 3,35 + 0,10 = 3,45m.$$

Avançando na prática

Perda de carga da tubulação interna

Descrição da situação-problema

Após verificar seu domínio e sua facilidade no cálculo de perda de carga, seu chefe pediu que você calculasse a perda de carga total de outra tubulação, dessa vez, em um trecho interno à estação de tratamento de água, que tem as seguintes características:

Q: 30 l/s

Diâmetro: 15 cm.

Comprimento: 17 m.

Material: aço soldado novo.

Massa específica da água: 1000 kg/m³.

Viscosidade dinâmica da água 20°C - $\mu = 10^{-3}$ N.s/m².

Gravidade: 9,8 m/s².

Tem uma válvula de gaveta e dois cotovelos 90° raio longo.

Qual é o valor da perda de carga total nesse trecho?

Resolução da situação-problema

Assim como demonstrado no exercício anterior, deve-se calcular os parâmetros necessários para satisfazer a equação da perda de carga total (distribuída + localizada):

$$\Delta H_T = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + \sum k \frac{v^2}{2g}.$$

Assim, necessita-se calcular a velocidade do escoamento (v) e o fator de atrito (f).

Usamos a fórmula da vazão para obtenção da velocidade:

$$Q = v \times A \rightarrow v = \frac{Q}{A} = \frac{0,03}{(\pi \times 0,075^2)} = 1,7 \text{ m/s}.$$

De posse do valor da velocidade, podemos calcular o número de Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} = \frac{1000 \times 1,7 \times 0,15}{10^{-3}} = 2,5 \times 10^5.$$

Outro parâmetro necessário para obtenção do fator de atrito é a rugosidade relativa:

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,000075}{0,15} = 5 \times 10^{-4}.$$

Assim, com esses valores anteriormente calculados, podemos obter o fator de atrito pelo diagrama de Moody:

$$f = 0,026.$$

E, finalmente, aplicá-los à fórmula de perda de carga total:

$$\Delta H_T = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + \sum k \frac{v^2}{2g} = 0,026 \frac{17}{0,15} \frac{1,7^2}{2 \times 9,8} + (0,2 + 2 \times 0,6) \frac{1,7^2}{2 \times 9,8} = 0,434 + 0,21 = 0,644 \text{ m}.$$

Faça valer a pena

1. O regime de escoamento de determinada corrente líquida fornece suas características gerais. Essas particularidades determinam as forças predominantes durante o escoamento e, conseqüentemente, a forma de se calcular as perdas de cargas.

Uma determinada tubulação conduz água tratada da estação de tratamento até o trocador de calor da indústria. O escoamento de água, nas condições proporcionadas pela tubulação, resulta em um regime turbulento. Analisando as alternativas seguintes, marque aquela

que descreve o valor mínimo do número de Reynolds e a fórmula utilizada para cálculo da perda de carga distribuída para esse regime de escoamento.

a) 2000 e $\Delta H_D = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$.

b) 4000 e $\Delta H_D = k \frac{v^2}{2g}$.

c) 4000 e $\Delta H_D = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$.

d) 2000 e $\Delta H_D = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$.

e) 2000 e $\Delta H_D = k \frac{v^2}{2g}$.

2. As perdas de cargas de um escoamento ocorrem pela necessidade de se transpor as forças de resistências, exercidas, principalmente, pelo atrito e por acidentes internos à tubulação. Elas podem ser divididas em perda de carga localizada e de carga distribuída.

Analise as alternativas seguintes e marque aquela que descreve somente as características da perda de carga localizada.

- a) Perda de carga devido ao atrito do líquido e à parede interna da tubulação.
- b) Perda de carga causada pela consideração da viscosidade.
- c) Perda de carga devido ao atrito viscoso e aos acessórios hidráulicos.
- d) Perda de carga causada pelos acessórios hidráulicos instalados na tubulação.
- e) Perda de carga causada pelo atrito e pelas válvulas de controle de vazão.

3. A perda de carga total de determinado trecho de tubulação é a soma de todas as perdas de energia presentes nele. Seu valor final tem influência direta no dimensionamento de sistemas hidráulicos, podendo contribuir para excessivos custos de instalação e manutenção desses sistemas.

Aplicando os conceitos e as fórmulas de perda de carga, determine as perdas de carga totais e a representação, em porcentagem, das perdas de carga localizadas de uma tubulação com as seguintes características:

Q: 12 l/s.

Diâmetro: 10 cm.

Comprimento: 32 m.

Material: ferro fundido ($\varepsilon = 0,0002591\text{m}$).

Massa específica: 1000 kg/m^3 .

Viscosidade dinâmica da água $20 \text{ }^\circ\text{C}$ – $\mu = 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$.

Gravidade: $9,8 \text{ m/s}^2$.

Uma válvula de gaveta (0,2) e um cotovelo de 90° raio longo (0,6).

a) 1,53 m/s e 8,5%.

b) 0,031 e 1,53 m/s.

c) 1,53 m/s e $2,6 \times 10^{-3}$.

d) 1,53 m/s e 149.940.

e) 1,28 m e 8,5%.

Seção 1.3

Perdas de carga e cálculo de tubulações

Diálogo aberto

As perdas de carga mantêm estreita relação com o regime de escoamento, sendo condicionadas por eles. Sabemos que, na prática, o fator determinante para a mudança de regime e/ou aumento de perdas de carga é a velocidade do escoamento, ou seja, a vazão imposta à tubulação.

Retomando a situação hipotética em que você se encontra, após executar as diversas tarefas que lhe foram encaminhadas durante seus primeiros dias como engenheiro, você, finalmente, terá tempo de se dedicar à sua tarefa principal. Voltando ao trecho-problema inicial, você o dividiu em duas partes e as analisou, notando que, apesar de elas terem os mesmos comprimentos e diâmetros, uma delas tinha perda de carga diferente da outra. Ao verificar ambas as partes de forma detalhada, você notou que a tubulação de maior perda de carga era justamente aquela que tinha os componentes acessórios (válvulas de gaveta e curvas).

Com base em seus conhecimentos e em suas análises, você deve preparar um relatório técnico para apresentar na reunião semanal. No relatório você deverá apresentar as perdas de carga do trecho em questão, localizadas e distribuídas, além de incluir um cálculo do percentual da perda de carga localizada, pois, dependendo da sua porcentagem, esse fator poderá ser repensado.

Segundo os valores obtidos nos cálculos, as perdas de carga são muito representativas? Você sugeriria uma reestruturação da tubulação por conta desses acessórios? Veja a seguir os dados do trecho-problema:

Vazão: 25 L/s.

Comprimento: 135 m.

Diâmetro: 20 cm.

Material da tubulação: ferro fundido ($\epsilon = 0,0002591$).

Acessórios hidráulicos: duas válvulas de gaveta ($k = 0,2$), um cotovelo de 90° ($k = 0,9$) e dois de 45° ($k = 0,4$).

Após o cálculo, finalize seu relatório com todas as informações obtidas até aqui, estruturando-o na forma de um relatório técnico: com Introdução, análises e memorial de cálculos, além de um parecer final (conclusões).

Não pode faltar

Partindo do fato de que já temos o conhecimento da teoria de classificação em regimes de escoamento de qualquer fluxo de fluido em tubulações, agora, trataremos o tema de um ponto de vista mais prático.

Reynolds descreveu as características gerais das três categorias distintas da classificação dos escoamentos em regimes: laminar, de transição e turbulento.

De forma simplificada, podemos descrever o escoamento laminar como o mais calmo e suave, pois ele acontece em baixa velocidade e as trajetórias das partículas do líquido são bem definidas. Seu nome é esse justamente por ter a formação de lâminas, ou seja, camadas ao longo do escoamento. Outro ponto que vale a pena ressaltar é o de haver uma predominância das forças viscosas, fato que explica o enquadramento dos escoamentos de líquidos muito viscosos e/ou em baixas velocidades nesse regime (PORTO, 2006).

O regime de transição não tem características próprias. Ele oscila entre as particularidades dos regimes laminar e turbulento.

Assim como o laminar, o regime turbulento tem características bem definidas e constantes. Suas partículas têm trajetórias indefinidas e variáveis, o que acarreta uma elevada taxa de colisões entre elas. Não há formação de lâminas.

Esses dois regimes de escoamento, desconsiderando a fase de transição, têm distribuição da velocidade de formas distintas. Pela formação de lâminas e por ter um gradiente de velocidade bem definido, o regime laminar apresenta distribuição coaxial e frente de escoamento com formato parabólico. Já no regime turbulento, não há gradiente bem definido, pois há um elevado intercâmbio de partículas ao longo do perfil do escoamento. A frente desse perfil tende à forma linear.

Como havíamos visto na Seção 1.1, o número de Reynolds trata da relação das forças inerciais com as viscosas, sendo ele o atual parâmetro de classificação do regime de escoamento:

$$\text{Re} = \frac{\rho \times v \times D}{\mu}$$

Em que: ρ = massa específica ($\frac{kg}{m^3}$).

v = velocidade do escoamento ($\frac{m}{s}$).

D = diâmetro da tubulação (m).

μ = viscosidade absoluta ou dinâmica ($\frac{N.s}{m^2}$).

Atualmente, convencionaram-se os seguintes valores para essa classificação:

Regime laminar de escoamento: $Re \leq 2000$.

Regime de transição: $2000 < Re < 4000$.

Regime turbulento: $Re \geq 4000$.

É nítida a passagem de um regime de escoamento para outro, sendo que Reynolds os classificou, em seu clássico experimento, justamente por sua aparência visual.

Esse experimento, reproduzido em nossa aula prática, trata-se da injeção de pigmento no interior do escoamento, sendo que ele escoou por um trecho da tubulação que permite a visualização do comportamento do pigmento.

O pigmento injetado no centro do escoamento se mantém na forma de "fio" linear quando em regime laminar, justamente por se apresentar em lâminas, com pouca ou nenhuma transferência de partículas entre elas. O regime de transição apresenta um curto espaço do "fio" linear, dispersando-o a partir de determinado ponto. De forma diferente, o regime turbulento causa uma rápida dispersão do pigmento, justamente pela sua intensa agitação e intercâmbio de partículas no perfil do escoamento.



Exemplificando

A tubulação de água tratada que sai da estação de tratamento de uma indústria tem diâmetro e vazão de 400 mm e 24 L/s, respectivamente. Sabendo que a massa específica da água é 1000 kg/m^3 e sua viscosidade dinâmica é 10^{-3} N.s/m^2 , o valor do número de Reynolds e o regime do escoamento seriam os seguintes:

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} = \frac{1000 \times 0,76 \times 0,2}{10^{-3}} = 152000.$$

$$Q = v \times A \rightarrow v = \frac{Q}{A} = \frac{0,024}{\pi \times (0,10^2)} = 0,76 \text{ m/s}.$$

Regime turbulento.

O regime de escoamento em que determinada corrente de água se enquadra tem influência em diversos aspectos, como é o caso das perdas de carga.

Bernoulli foi o criador da teoria que afirma que um fluido ideal, sem viscosidade, não tem perdas de energia. Essa teoria afirma que, apesar de se intercambiarem, as cargas de energia, quando somadas, resultariam sempre no mesmo valor.

$$\frac{P}{\gamma} + Z + \frac{v^2}{2g} = \text{constante.}$$

Essa teoria se tornou uma das mais importantes da hidrodinâmica, sendo aplicável a diversas áreas dessa ciência.

Para aplicação a dois pontos e extrapolação da afirmação de Bernoulli para os fluidos reais, considerando a viscosidade e, conseqüentemente, o atrito, deve-se acrescentar a citada perda de energia – perda de carga –, ocasionando a seguinte equação:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H_T$$

Em que: ΔH_T = perda de carga total (m).

A equação demonstra que, apesar da somatória das cargas de energia ser constante para fluidos ideais, na vida real (fluidos reais) há perdas de carga no sentido do escoamento. Essas perdas são as dissipações de energia necessárias para o vencimento das forças de resistências ao movimento (atrito e acidentes físicos internos à tubulação).

As perdas de carga são divididas em dois grupos: perda de carga distribuída e de carga localizada.

Perda de carga distribuída: esse grupo trata-se das energias dissipadas ao longo dos trechos retilíneos, caracterizadas por pequenas reduções por unidade de comprimento linear de tubulação.

Para a fórmula que possibilita o cálculo do valor da perda de carga, há diversas equações propostas, todas elas baseadas em experimentos práticos. Uma das principais é a fórmula universal de perda de carga, ou equação de Darcy-Weisbach:

$$\Delta H = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

Em que: ΔH = perda de carga distribuída (m).

f = fator de atrito.

L = comprimento da tubulação (m).

D = diâmetro da tubulação (m).

v = velocidade do escoamento (m/s).

g = gravidade (m/s²).

As perdas de carga distribuídas são o grupo que exemplifica, de forma mais nítida, a influência do regime de escoamento, sendo que as mais utilizadas para o cálculo de seu fator de atrito diferem-se bastante.

Os escoamentos classificados em regime laminar têm seu fator de atrito (f) calculado pela seguinte fórmula:

$$f = \frac{64}{Re}$$

Em que: f = fator de atrito.

Re = número de Reynolds.

Caso o escoamento tenha comportamento turbulento, seu fator de atrito terá maior influência de outros fatores. As fórmulas utilizadas para seu cálculo são mais complexas e todas elas foram criadas a partir de experimentos práticos, sendo a pioneira elaborada por Colebrook e White, em 1939 (PORTO, 2006).

Anos mais tarde, em 1944, Lewis Ferry Moody cria um diagrama que facilita bastante a obtenção do fator de atrito. O diagrama representa, no eixo das abscissas, o número de Reynolds; no eixo das ordenadas à direita, a rugosidade relativa ($\frac{\epsilon}{D}$); e o fator de atrito (f) na ordenada oposta (PORTO, 2006).

A proposta de Moody tem sido trabalhada desde então, sendo que, segundo Porto (2006), a versão mais recente foi publicada por Swamee-Jain e ficou popularmente conhecida com um nome bem sugestivo: diagrama de Moody.

Voltando à divisão das perdas de carga em dois grupos, o segundo deles inclui a energia dissipada de forma pontual, sendo denominada perda de carga localizada.



Refleta

As perdas de carga de uma tubulação têm estreita relação com o regime de escoamento. Como sabemos que o fator que tem maior influência

no regime de escoamento é a velocidade da corrente líquida, você acha que ele também tem influência na perda de carga? Uma maior velocidade representa perdas de carga maiores ou menores?

Perda de carga localizada: são dissipações de energia que acontecem em pontos localizados, causadas por um acidente qualquer que interfira na região interna do tubo. Em geral, as dissipações de energia ocorrem em acessórios hidráulicos necessários ao adequado uso da tubulação, dentre os quais se pode citar as válvulas de gaveta, a válvula de esfera, as curvas, os cotovelos, os joelhos etc.

O cálculo das perdas de carga localizadas pode ser realizado de duas formas: utilizando-se o comprimento equivalente (Le) ou o coeficiente de perda de carga (k). O comprimento equivalente (Le) é a representação do acessório em comprimento linear de tubulação de mesmo diâmetro em relação à perda de carga. Já o coeficiente de perda de carga (k) é um coeficiente criado para representar a perda de carga do acessório, dependendo de sua geometria. Ambos são calculados e fornecidos pelos fabricantes dos tubos.

Partindo dessas duas possíveis representações da perda de carga localizada, as equações utilizadas para cada uma delas, apesar de semelhantes, diferem-se em alguns fatores.

Perda de carga localizada empregando-se o comprimento equivalente (Le):

$$\Delta H_L = f \frac{Le}{D} \frac{v^2}{2g}$$

Em que: ΔH_L = perda de carga localizada (m).

f = fator de atrito.

Le = comprimento equivalente (m).

D = diâmetro (m).

v = velocidade (m/s).

g = gravidade (m/s²).

Perda de carga localizada a partir do coeficiente de perda de carga (k):

$$\Delta H_L = k \frac{v^2}{2g}$$

Em que: ΔH_L = perda de carga localizada (m).

k = coeficiente de perda de carga.

v = velocidade (m/s).

g = gravidade (m/s²).

Apresentados os dois grupos que compõem as perdas de carga, pode-se concluir o raciocínio do cálculo da perda de carga total com a fórmula geral.

$$\Delta H_T = \Delta H_D + \sum \Delta H_L$$

Em que: ΔH_T = perda de carga total (m).

ΔH_D = perda de carga distribuída (m).

ΔH_L = soma das perdas de carga localizada (m).

Observação: todos os coeficientes empregados nas fórmulas de perdas de carga, bem como o diagrama de Moody, se encontram na Seção 1.2.



Exemplificando

A tubulação descrita no exemplo anterior é constituída de ferro fundido (ϵ : 0,000010 m), tem 70 m de comprimento, uma válvula de gaveta e dois cotovelos de 90° raio longo. Utilizando as tabelas e o diagrama de Moody da Seção 1.2, o cálculo da perda de carga total desse trecho seria o seguinte:

Comprimento total: 70 m.

Diâmetro: 200 mm.

Válvula de gaveta e cotovelo 90° raio longo: $k = 0,2$ e $0,6$, respectivamente.

$$Q = v \times A \rightarrow v = \frac{Q}{A} = \frac{0,024}{\pi \times (0,10^2)} = 0,76 \text{ m/s.}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} = \frac{1000 \times 0,76 \times 0,2}{10^{-3}} = 152000.$$

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0,000010}{0,2} = 5 \times 10^{-5}.$$

$$f = 0,027.$$

$$\Delta H_T = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + \sum k \frac{v^2}{2g} = 0,027 \frac{70}{0,2} \frac{0,76^2}{2 \times 9,8} + (0,2 + 2 \times 0,6) \frac{0,76^2}{2 \times 9,8} = 0,319 \text{ m.}$$

Esta seção traz, de forma simplificada, todo o conteúdo teórico exposto anteriormente, justamente para que seja desenvolvido um raciocínio linear a respeito da unidade. Além disso, ela inclui uma atividade prática, na qual será apresentado o contexto aqui explanado, a fim de torná-lo mais didático. Gostaríamos de salientar a importância da entrega da atividade desta unidade (ou desta seção) – determinação das perdas de carga de tubulação sob pressão –, que nada mais é que colocar seu conhecimento na resolução da situação-problema apresentada no contexto de aprendizagem. Assim como lembrado no item *Diálogo Aberto*, essa entrega deverá ser elaborada separadamente, na forma de um relatório técnico: com apresentação de memorial de cálculos e um parecer final.



Assimile

A classificação dos escoamentos em regimes facilitou a identificação do comportamento geral deles. O parâmetro classificatório é o número de Reynolds.

Convencionaram-se os seguintes valores:

Regime laminar: $Re \leq 2000$.

Regime de transição: $2000 < Re < 4000$.

Regime turbulento: $Re \geq 4000$.

Essa classificação tem influência nas dissipações de energia intrínsecas do ato de escoar. As fórmulas empregadas no cálculo das perdas de carga distribuídas são condicionadas ao regime, pois há uma distinta predominância de forças em cada um deles. O cálculo das perdas de carga localizadas, diferentemente das anteriores, não se difere de um regime para outro. Porém, como descrito, elas podem ser calculadas pelo comprimento equivalente (L_e) e coeficiente de perda de carga (k). As perdas de carga totais são resultantes da somatória das perdas de carga distribuídas e localizadas.



Pesquise mais

O Capítulo 8, Seção 8.7, *Cálculo da perda de carga*, descreve as duas categorias de perda de carga, apresentando fórmulas e explicações adicionais sobre o tema.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 884p.

Os capítulos 2 e 3 reúnem um vasto material sobre perdas de cargas distribuídas e localizadas, respectivamente. Incluem-se tabelas e figuras muito úteis.

PORTO, R. de M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006. 540p.

Sem medo de errar

Agora que recordamos todo o conteúdo desta unidade, podemos aplicá-lo na resolução do problema que foi proposto no início desta seção.

Como o trecho da tubulação foi dividido em dois, teremos duas partes de 67,5 m de comprimento. Uma delas tem duas válvulas de gaveta ($k = 0,2$), um cotovelo de 90° ($k = 0,9$) e dois de 45° ($k = 0,4$).

Como essa tubulação tem vazão e diâmetro de 25 l/s e 20 cm, respectivamente, seus cálculos são os seguintes:

$$Q = v \times A \rightarrow v = \frac{Q}{A} = \frac{0,025}{(\pi \times 0,1^2)} = 0,8 \text{ m/s}.$$

$$\text{Re} = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} = \frac{1000 \times 0,8 \times 0,2}{10^{-3}} = 1,60 \times 10^5.$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,0002591}{0,2} = 1,3 \times 10^{-3}.$$

$$f = 0,03.$$

Trecho sem acessórios

$$\Delta H_T = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + \sum k \frac{v^2}{2g} = 0,03 \frac{67,5}{0,2} \frac{0,8^2}{2 \times 9,8} + 0 = 0,33 \text{ m}.$$

Trecho com acessórios

$$\Delta H_T = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + \sum k \frac{v^2}{2g} = 0,03 \frac{67,5}{0,2} \frac{0,8^2}{2 \times 9,8} + (2 \times 0,2 + 0,9 + 2 \times 0,4) \frac{0,8^2}{2 \times 9,8} = 0,33 + 0,069 = 0,399m.$$

$$\frac{\Delta H_L}{\Delta H_T} \times 100 = \frac{0,069}{0,399} \times 100 = 17,3\%.$$

As perdas de carga localizadas representam 17,3% das perdas de carga totais. É um valor pouco significativo. A reestruturação da tubulação seria uma tarefa difícil, haja vista a grande utilidade de todos esses acessórios, além de resultar em uma perda de carga total pequena, o que não a justifica.

O relatório técnico que deverá ser entregue à empresa sobre seu trabalho, que, em nosso caso concreto, você deverá entregar ao professor, deverá contemplar a seguinte estrutura:

- **Introdução:** tratar de forma sucinta a classificação dos escoamentos, com o intuito de contextualizar o tema seguinte. As perdas de carga deverão ser trabalhadas com mais detalhes, buscando-se a relação dos regimes com elas e apresentando as explicações teóricas sobre o fenômeno. O número de páginas é livre, mas convenhamos que você tem capacidade para abordar o tema de forma profissional. Não se atenha ao volume do conteúdo.

- **Memorial de cálculos:** apresentar todos os cálculos feitos, ressaltando as respostas finais e justificando o uso de cada um deles.

- **Parecer final:** apresentar a conclusão do relatório, respondendo às questões levantadas e expondo suas posições sobre elas (baseando-se nos cálculos e na pesquisa teórica realizada).

Avançando na prática

Representatividade das perdas de carga localizadas

Descrição da situação-problema

Uma tubulação interna da ETA interliga alguns pontos de estação. Esse trecho tem diversos acessórios hidráulicos, necessários ao controle do fluxo nesta parte da unidade. Determine as perdas de carga totais e a fração que é representada pelas perdas de carga localizadas. Como engenheiro do projeto, você tentaria reduzir as perdas desse trecho?

Características da tubulação:

Vazão: 18 l/s.

Comprimento: 25 m.

Diâmetro: 10 cm.

Material da tubulação: ferro fundido ($\epsilon = 0,0002591$).

Acessórios hidráulicos: quatro válvulas de gaveta ($k = 0,2$), dois cotovelos de 90° ($k = 0,9$) e dois de 45° ($k = 0,4$).

Obs.: apesar de a tubulação ter uma possível representatividade elevada, pode ser que sua função de controle de fluxo e direcionamento seja mais importante. Analise o contexto!

Resolução da situação-problema

$$Q = v \times A \rightarrow v = \frac{Q}{A} = \frac{0,018}{(\pi \times 0,05^2)} = 2,3 \text{ m/s}.$$

$$\text{Re} = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} = \frac{1000 \times 2,3 \times 0,1}{10^{-3}} = 2,3 \times 10^5.$$

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0,0002591}{0,1} = 2,6 \times 10^{-3}.$$

$$f = 0,03.$$

$$\Delta H_T = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + \sum k \frac{v^2}{2g} = 0,03 \frac{25}{0,1} \frac{2,3^2}{2 \times 9,8} + (4 \times 0,2 + 2 \times 0,9 + 2 \times 0,4) \frac{2,3^2}{2 \times 9,8} = 2,02 + 0,92 = 2,94 \text{ m}.$$

$$\frac{\Delta H_L}{\Delta H_T} \times 100 = \frac{0,92}{2,94} \times 100 = 31,3\%.$$

A fração da perda de carga total representada pelas perdas localizadas é elevada (31,3%), porém, por sua função de controle de fluxo, pode ser inapropriada qualquer alteração nesse trecho. Seria prudente analisar o contexto de forma mais específica.

Faça valer a pena

1. O escoamento de líquidos em tubulação sob pressão tem algumas características fluidodinâmicas, relacionadas às características do líquido e do escoamento em si. As forças viscosas e cinéticas são exemplo dessas particularidades, sendo elas, referentes ao líquido e ao escoamento, respectivamente.

O número de Reynolds (Re) é um número adimensional que relaciona as forças viscosas e inerciais. Adotado como parâmetro classificatório, é o fator utilizado para definir em qual regime de escoamento se encontra determinada corrente de líquido. Com base nisso e nas características dos escoamentos, analise as seguintes afirmações:

I. O regime laminar é objetivamente definido como escoamento de número de $Re < 2000$.

II. No regime laminar, as partículas do líquido têm trajetórias bem definidas.

III. Entre os dois regimes de comportamento definido – laminar e turbulento – há um regime transitório.

IV. O regime turbulento tem número de $Re > 2000$.

V. A frente de escoamento do regime turbulento é parabólica.

Assinale a alternativa que agrupa todas as alternativas verdadeiras.

a) I, II, III e IV.

b) I e II.

c) I, II e III.

d) I, II, III, IV e V.

e) Somente V.

2. O simples fato de escoar no interior de uma tubulação causa intrinsecamente uma redução da energia do escoamento. Esse é o princípio da perda de carga. Como se trata de um fator influenciado pelas características fluidodinâmicas, o regime do escoamento é um fator importante no momento do cálculo das perdas de carga. Principalmente pelo fato de o regime de escoamento laminar ter predominância de forças viscosas; e o regime turbulento, de forças inerciais.

O cálculo das perdas de carga distribuídas têm fórmulas distintas segundo o regime de escoamento, justamente por se tratar de fenômenos regidos por forças distintas. Com base nisso, marque a alternativa que descreve a equação do cálculo de perda de carga distribuída em regime de escoamento laminar.

a) $\Delta H_D = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$.

b) $\Delta H_D = f \frac{L_e}{D} \frac{v^2}{2g}$.

$$c) \Delta H_D = k \frac{v^2}{2g}$$

$$d) \Delta H_D = f \frac{v^2}{2g}$$

$$e) \Delta H_D = \frac{64}{\text{Re}}$$

3. O dimensionamento de um sistema hidráulico deve contemplar as perdas de carga com a efetiva importância que lhe cabe, pois elas são responsáveis pela redução da energia disponível no líquido. Isso pode acarretar na elevação desnecessária da quantidade de energia que deverá ser transferida ao escoamento por meio de um conjunto motobomba, muitas das vezes, inviabilizando o sistema.

Determine as perdas de carga totais de uma tubulação de ferro fundido ($\varepsilon = 0,0002591\text{m}$), 15 cm de diâmetro e 47 m de comprimento, na qual há o escoamento de água ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ e $\mu = 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$) com vazão de 18 L/s. A tubulação ainda tem uma válvula de gaveta ($k = 0,2$) e dois cotovelos de 90° raio longo ($k = 0,6$).

Dado: gravidade: $9,8 \text{ m/s}^2$.

- a) 0,474 m.
- b) 5,75 m.
- c) 1,02 m/s.
- d) $1,5 \times 10^5 \text{ m}$.
- e) 1,02 m.

Referências

BAPTISTA, M.; LARA, M. A mecânica dos fluidos na hidráulica. In: _____. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014. p. 35-65.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. Conceitos fundamentais. In: _____. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 884p.

PAUMIER, G. (Ed.). **Laminar and turbulent flows, depending on the Reynolds number**. 2008. Elaborado por Dubaj. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laminar_and_turbulent_flows.svg?uselang=pt-br#filelinks>. Acesso em: 16 dez. 2016.

PORTO, R. de M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006, 540p.

REYNOLDS, O. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**. v. 174, p. 935-982, 1 jan. 1883. Disponível em: <<http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/174/935.full.pdf+html>>. Acesso em: 2 jan. 2016.

Sistemas hidráulicos de tubulações e hidráulica de sistema de recalque

Convite ao estudo

A segunda unidade do nosso curso de Fundamentos de Hidráulica e Hidrometria avançará no estudo do comportamento fluidodinâmico em tubulações e bombas hidráulicas. Ela reforçará os conceitos de regime de escoamento e perda de carga, apresentados na primeira unidade, porém, trará ainda as diferentes formas da disposição das tubulações e influência da vazão nesses parâmetros já estudados. Permitirá também compreender a técnica de dimensionamento de tubulações e bombas para atendimento de reservatórios. O primeiro objetivo específico será apresentar as possibilidades de associação de tubulações e o conceito dos condutos equivalentes, abordados na Seção 2.1. Já na Seção 2.2, o objetivo central será estudar as técnicas de determinação do melhor diâmetro de tubulação, além de abordar o contexto geral, a tubulação e a bomba, de uma unidade elevatória. A Seção 2.3, por sua vez, tratará, de forma mais objetiva e prática, essa apresentação, que contempla o dimensionamento de estação elevatória, a determinação da tubulação e das bombas ideais, além de verificar a possibilidade do seu adequado funcionamento nas condições disponíveis.

Trazendo o tema para o contexto do cotidiano, sabemos que o projeto da estação de tratamento de água (ETA), inicialmente descrito na unidade anterior, continuará com a mesma equipe, ou seja, você ainda é um de seus engenheiros. Haverá a necessidade do dimensionamento da rede de adução de água bruta (captação no corpo hídrico). Essa adutora deverá possibilitar a captação de $110 \text{ m}^3/\text{h}$, sendo que a diferença de cota topográfica é de 20 m. De posse desses dados e pensando em todas as possibilidades, surgem algumas questões básicas.

Sabendo que há possibilidade de dividir a vazão bombeada em mais de uma adutora, qual seria o comportamento desses arranjos de tubulação? Como você dimensionaria o conjunto motobomba? Este sofre influência do dimensionamento da tubulação? Há um diâmetro de tubo mais

eficiente e econômico? Seria possível o dimensionamento integrado da tubulação e conjunto motobomba?

Ao concluir este estudo, respondendo a todos os questionamentos anteriores, você deverá preparar um relatório técnico ao chefe da equipe, explicando, por meio de uma análise da estação elevatória, os efeitos da vazão e da tubulação nesta unidade.

Este estudo aportará a você conhecimento para analisar de forma criteriosa essas questões e fornecerá bagagem para que você responda a todos esses questionamentos levantados, de modo que estará apto a preparar o relatório solicitado. Animado para se tornar um exímio conhecedor de tubulação e bombas?

Seção 2.1

Conduitos equivalentes e tubulações em série e em paralelo

Diálogo aberto

A associação de tubulações é uma necessidade em diversos cenários de projetos hidráulicos. O conhecimento do comportamento da vazão e perda de carga desses arranjos é de essencial importância para adequada utilização dessa técnica.

Em uma das reuniões da equipe de trabalho, apresentaram-lhe a necessidade de dimensionamento da adutora de água bruta. Citaram também a possível divisão do fluxo total em mais de um conduto durante o trecho inicial, pois existe no local uma adutora utilizada anteriormente e que se encontra em boas condições. Essa antiga adutora não tem nem diâmetro nem comprimento para ser utilizada como única tubulação. De posse dessas condições, há possibilidade de se fazer associações de tubulações, tanto em arranjo em paralelo, enquanto utilizar a tubulação antiga, quanto em série, a partir do ponto em que não a haja. Surge, então, a necessidade de se pensar como ficaria o escoamento em cada uma dessas situações.

O que acontece com a vazão total quando há uma divisão em duas outras tubulações, como acontecerá no trecho inicial? No caso de serem tubulações de diâmetros diferentes, qual(is) fator(es) rege(m) a essa distribuição? Já o segundo trecho será uma única tubulação. Então, o que acontecerá com a vazão e a perda de carga? É possível simplificar essas questões utilizando apenas uma tubulação equivalente? O que seria uma tubulação equivalente em ambos os casos?

Após a reflexão sobre esses questionamentos, realize a análise da influência das tubulações no regime de escoamento.

Não pode faltar

Relembrando de forma resumida o conteúdo tratado na unidade anterior, o tema inicial foi a classificação do escoamento segundo o regime de escoamento. Naquele tópico, tratamos dos dois principais regimes: laminar e turbulento, conceituando cada um deles, apresentando o parâmetro de classificação – número de Reynolds –, e suas respectivas características. O outro tema abordado foi a perda de carga. Relatamos sua classificação em distribuída e localizada, além de destacarmos a importância do regime de escoamento na determinação deste fator. A unidade foi concluída com a apresentação do cálculo de perda de carga total, fato de suma importância no aprofundamento do tema.

A forma com a qual a disposição da tubulação é pensada e associada tem influência sobre as perdas de carga e sobre a vazão que essas tubulações transportarão. Essa associação de tubulações pode ocorrer por diversos motivos, por exemplo, uma adutora que se encontra em uso há vários anos, mas que atualmente, não consegue suprir a necessidade de uma cidade que passou por um intenso processo de urbanização e teve sua população aumentada. Outro exemplo seria uma tubulação de um projeto de irrigação previamente dimensionada para conduzir determinada vazão de água a um ponto específico, porém seu proprietário resolveu ampliar o projeto de irrigação, necessitando levar água duas vezes mais distante do ponto de captação. Esses são exemplos banais da necessidade de se fazer associações de tubulação, tanto de forma paralela, como no primeiro exemplo, quanto em série, no caso do segundo. Assim, o conhecimento das alterações causadas nas características do escoamento por essa prática se faz importante.



Refleta

Conhecendo o contexto geral das associações de tubulações e sabendo que há duas formas de disposição: em série e em paralelo, quais são as diferenças na vazão e perda de carga de cada uma delas?

Associação de tubulações

- Tubulações em série

Para exemplificar de forma mais clara, imagine o seguinte contexto: um produtor de hortaliças não tinha irrigação em toda a sua horta, que tem 80 metros de comprimento. Ele irrigava somente os primeiros 20 metros, mais próximos da captação no corpo hídrico. Por motivos agronômicos, ele terá de passar essa cultura que mais precisa de irrigação para o final da horta, 40 metros mais longe. Sabendo que deveria estender a adutora, ele foi até a loja que o vendeu todo o

equipamento e comprou os 40 metros adicionais com diâmetro inferior à existente em seu sistema. Com a devida redução, o agricultor chegou em casa e instalou os 40 metros adicionais.

Esse é um exemplo de associação de tubulações em série, pois o que a caracteriza é a passagem de toda a vazão de água bombeada por toda a extensão da tubulação.

As perdas de carga desse sistema, por outro lado, tem alteração, justamente pelo fato de se tratar de uma adição de perda de energia, causada pelas forças resistivas desse novo trecho de conduto. A perda de carga total pode ser representada pela seguinte equação:

$$\Delta H_T = \Delta H_{antiga} + \Delta H_{nova}.$$

$$\text{Em que: perda de carga total da tubulação antiga} - \Delta H_{antiga} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + \sum k \frac{v^2}{D}.$$

$$\text{Perda de carga total da tubulação nova} - \Delta H_{nova} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + \sum k \frac{v^2}{D}.$$

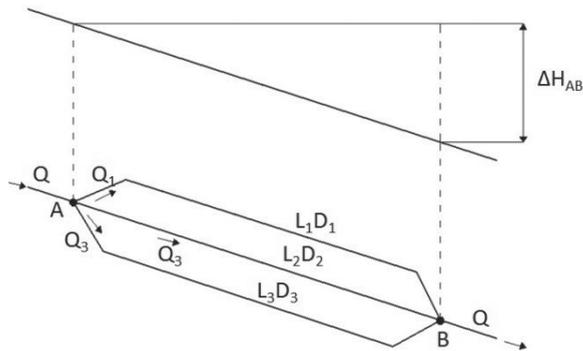
De forma prática e resumida, o que acontece na associação de tubulações em série é a manutenção da vazão e adição das perdas de carga referentes ao novo trecho.

- Tubulações em paralelo

Imaginemos uma cidade que teve sua ETA projetada na época da ditadura militar. Curiosamente, essa foi uma fase em que o Brasil avançou bastante em saneamento. No entanto, atualmente, o país um número de habitantes duas vezes maior que a população máxima do projeto. Analisando o projeto da estação, uma equipe de projetistas resolveu somente ampliá-la, implantando mais duas unidades de ciclo completo. A vazão que chega à estação está em seu nível máximo, sendo necessária a instalação de outra adutora. Ao analisarem o conjunto motobomba instalado no ponto de captação, depararam com uma unidade superdimensionada, com capacidade de bombear vazão superior à necessidade atual. Assim, resolveram implantar uma tubulação paralela e interligá-la a mesma bomba hidráulica.

Esse é um exemplo de uma associação de tubulações em paralelo, sendo ela um pouco mais complexa do que a associação em série. Quando a associação em paralelo ocorre, há uma redistribuição da vazão de forma inversamente proporcional à resistência hidráulica oferecida (PORTO, 2006). A perda de carga nesse tipo de associação é dada pela diferença de cotas piezométricas na entrada e saída do sistema, sendo a mesma em todos os trechos: $\Delta H_{AB} = \Delta H_1 = \Delta H_2 = \Delta H_3$ (Figura 2.1).

Figura 2.1 | Associação de tubulação em paralelo



Fonte: adaptada de Porto (2006).



Pesquise mais

A indicação seguinte trata-se de um vídeo do professor Marllus Gustavo Neves sobre a explicação teórica de associação de tubulações. Ele explana o tema de forma bastante didática, explicando, inclusive, o fato da perda de carga ser igual à diferença da cota piezométrica.

EXERCÍCIO - Enade - Conduitos em série ligando 2 reservatórios. Marllus Gustavo Neves, 2014. Vídeo do YouTube. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=lfjEZZwdPHI>>. Acesso em: 4 jan. 2017.

Conduitos equivalentes

Os conduitos equivalentes são trechos que, com o objetivo de simplificar cálculos na determinação de características geométricas e de rugosidade, podem ser substituídos de determinada tubulação ou de sistemas de tubulação (PORTO, 2006).

Para que o conduto possa ser considerado equivalente à determinada tubulação ou sistema de tubulações, ele deve ter a mesma perda de carga quando transportando vazões iguais (PORTO, 2006).



Exemplificando

A associação em paralelo representada na Figura 2.1 tem perda de carga de valor figurado ΔH_{AB} para uma vazão Q . Assim, um conduto qualquer, para ser considerado equivalente a ela, necessitará ter perda de carga

$\Delta H_{AB'}$ quando escoar a vazão Q .

Segundo Porto (2006), as equivalências podem ser analisadas da seguinte forma: equivalência entre dois condutos simples e equivalência entre um conduto simples e um sistema.

- Equivalência entre dois condutos simples

Com base no critério relativo à perda de carga e vazão descrito, emprega-se a seguinte fórmula para relacionar a citada condição com as características desejadas do conduto:

$$\Delta H = 0,0827 \frac{f \times L \times Q^2}{D^5}$$

Em que: f = fator de atrito.

L = comprimento.

Q = vazão.

D = diâmetro.

Porto (2006) ainda desenvolve as operações matemáticas necessárias e apresenta duas equações para o cálculo do comprimento do segundo conduto utilizando os dados do primeiro. A primeira delas, (1) relacionada com o fator de atrito (f), e a segunda (2), obtida a partir da aplicação da primeira na fórmula de Hazen-Williams.

$$L_2 = L_1 \frac{f_1}{f_2} \left[\frac{D_2}{D_1} \right]^5 \quad (1) \qquad L_2 = L_1 \left[\frac{C_1}{C_2} \right]^{1,85} \left[\frac{D_2}{D_1} \right]^{4,87} \quad (2)$$



Pesquise mais

A fórmula de Hazen-Williams foi criada baseada em experimentos práticos, com o objetivo de obter a perda carga unitária (m/m) e, então, simplificar a obtenção do valor das perdas de carga totais.

Fórmula de Hazen-Williams: $J = \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} \times D^{4,87}}$.

Em que: J = perda de carga unitária.

Q = vazão.

C = coeficiente de rugosidade (tabelado).

D = diâmetro .

- Equivalência de conduto a um sistema

Sistema em série

Como vimos anteriormente, a associação de tubulações em série faz com que a vazão total passe por todos os trechos associados e as perdas de cargas sejam a soma das perdas de cada um desses trechos. Segundo Porto (2006), podemos, então, determinar o conduto equivalente a um sistema de n tubulações, sendo que ele terá comprimento L , diâmetro D e coeficiente de atrito f pela seguinte fórmula:

$$\Delta H = \alpha \frac{f \times L}{D^5} Q^2 = \sum_{i=1}^n \alpha \frac{f_i \times L_i}{D_i^5} Q^2, \text{ logo, } \frac{f \times L}{D^5} = \sum_{i=1}^n \frac{f_i \times L_i}{D_i^5}$$

Assim como ocorreu para o conduto equivalente a um só conduto, o autor aplica a Equação 4 à fórmula de Hazen-Williams, resultando em:

$$\frac{L}{C^{1,85} \times D^{4,87}} = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{C_i^{1,85} \times D_i^{4,87}}$$

Sistema em paralelo

Assim como apresentado na Figura 2.1, a associação de tubulações em paralelo, em que cada uma tem diâmetro, comprimento e rugosidade distintos, proporciona vazões diferentes em cada uma delas, pois esta distribuição ocorre de forma inversamente proporcional à resistência oferecida. Com a vazão de entrada representada por Q e a perda de carga por ΔH_{AB} , temos a seguinte relação dentro do sistema em paralelo:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3.$$

$$\Delta H_{AB} = \Delta H_1 = \Delta H_2 = \Delta H_3.$$

Porto (2006) nos apresenta um raciocínio bastante didático sobre o desenvolvimento de um conduto equivalente ao sistema.

Partindo da fórmula da perda de carga relacionada à vazão ($\Delta H = 0,0827 \frac{f \times L \times Q^2}{D^5}$) e substituindo o valor 0,0827 por α , podemos determinar a vazão em determinado sistema pela seguinte fórmula:

$$Q = \sqrt{\frac{\Delta H_i \times D_i^5}{\alpha \times f_i \times L_i}}$$

O conduto equivalente de comprimento, representado pela letra L , diâmetro representado pela letra D , e coeficiente de atrito representado por f , deverá transportar, por definição, a mesma vazão do sistema, ou seja, Q . Além dessa prerrogativa, o conduto deverá ter a mesma perda de carga do sistema (ΔH).

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \rightarrow \sqrt{\frac{\Delta H \times D^5}{\alpha \times f \times L}} = \sqrt{\frac{\Delta H_1 \times D_1^5}{\alpha \times f_1 \times L_1}} + \sqrt{\frac{\Delta H_2 \times D_2^5}{\alpha \times f_2 \times L_2}} + \sqrt{\frac{\Delta H_3 \times D_3^5}{\alpha \times f_3 \times L_3}}$$

Sabendo que a perda de carga é constante, e desenvolvendo-se matematicamente a equação, chegamos a:

$$\frac{D^{2,5}}{f^{0,5} \times L^{0,5}} = \frac{D_1^{2,5}}{f_1^{0,5} \times L_1^{0,5}} + \frac{D_2^{2,5}}{f_2^{0,5} \times L_2^{0,5}} + \frac{D_3^{2,5}}{f_3^{0,5} \times L_3^{0,5}}$$

Com base na fórmula supradescrita, você deve adotar o diâmetro comercial que deseja ter em seu conduto equivalente e, assim, obterá o comprimento necessário. Caso faça o contrário, ou seja, defina o comprimento para que o diâmetro seja calculado, provavelmente você encontrará um valor que não seja vendido comercialmente.

Assim como o fez para as demais relações, Porto (2006) ainda apresenta esta equação anterior aplicada na fórmula de Hazen-Williams:

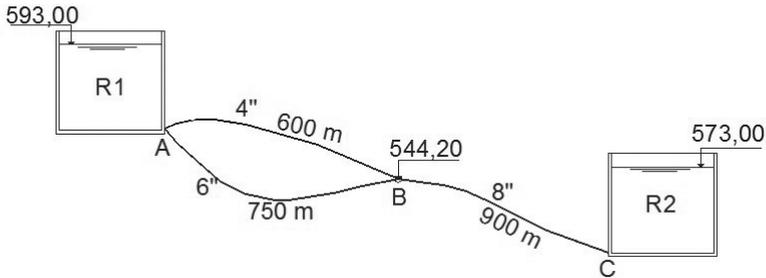
$$\frac{C \times D^{2,63}}{L^{0,54}} = \frac{C_1 \times D_1^{2,63}}{L_1^{0,54}} + \frac{C_2 \times D_2^{2,63}}{L_2^{0,54}} + \frac{C_3 \times D_3^{2,63}}{L_3^{0,54}}$$



Exemplificando

Porto (2006) apresenta um exemplo interessante sobre conduto equivalente a um sistema. Analisemos os dois reservatórios mantidos em níveis constantes interligados por um sistema de tubulações, representado pela Figura 2.2.

Figura 2.2 | Sistema de tubulações da interligação dos reservatórios R1 e R2



Fonte: adaptada de Porto (2006).

Considerando um coeficiente de atrito (f) constante para todas as tubulações e de valor 0,020, desprezando as perdas localizadas e as cargas cinemáticas, podemos determinar a vazão que chega à R2 e as vazões nos trechos de 6" e 4".

Como o trecho BC tem diâmetro de 8", uma forma de simplificar o problema seria calcular um conduto equivalente ao trecho AB com diâmetro de 8" também.

Calculemos o comprimento equivalente do trecho AB utilizando a equação anteriormente obtida. No entanto, como o fator de atrito é constante, nós o desconsideramos:

$$\frac{8^{2,5}}{L^{0,5}} = \frac{6^{2,5}}{750^{0,5}} + \frac{4^{2,5}}{600^{0,5}} \therefore L \cong 1600m$$

Com isso, o problema se simplifica: que consideraremos uma adutora de 2500 m de comprimento (900 + 1600) e diâmetro de 8", sujeita a diferença de cotas piezométricas de 20 m (593 – 573).

Como sabemos que as perdas de carga de um sistema são a própria diferença de cota piezométrica, então, podemos calcular a vazão que chega ao reservatório R2 aplicando a seguinte fórmula:

$$\Delta H = 0,0827 \frac{f \times L \times Q^2}{D^5} \rightarrow 20 = 0,0827 \frac{0,020 \times 2500 \times Q^2}{0,20^5} \rightarrow$$

$$Q = 0,0393 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Sabendo qual é a vazão Q que percorre toda a extensão da tubulação, podemos determinar a cota piezométrica no ponto B, utilizando, para isso, a perda de carga do trecho BC:

$$C.P_B - \Delta H_{BC} = 573,0 \rightarrow C.P_B = 0,0827 \times 0,020 \frac{900}{0,20^5} \times 0,0393^2 + 573,0 \rightarrow$$

$$C.P_B = 580,2 \text{ m}.$$

Relembrando a propriedade dos trechos em paralelo, as perdas de carga nos condutos de 4" e 6" são iguais entre si e à diferença de cotas piezométricas entre os pontos A e B. Dessa forma, podemos calcular a vazão da seguinte forma:

$$\Delta H_{AB} = 593 - 580,2 = 0,0827 \times 0,20 \times \frac{750}{0,15^5} \times Q_6^2 \therefore Q_6 = 0,028 \text{ m}^3/\text{s}.$$

$$\Delta H_{AB} = 593 - 580,2 = 0,0827 \times 0,20 \times \frac{600}{0,10^5} \times Q_4^2 \therefore Q_4 = 0,0114 \text{ m}^3/\text{s}.$$



Assimile

As associações de tubulação podem ocorrer de duas formas: em série ou em paralelo. Os parâmetros que devem ser levados em consideração nesses arranjos são vazão (Q) e perda de carga (ΔH).

As representações a seguir representam esses dois parâmetros dependendo da associação.

- Associação em série: $Q = Q_1 = Q_2$ e $\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2$.

- Associação em paralelo: $Q = Q_1 + Q_2$ e $\Delta H = \Delta H_1 = \Delta H_2$.

O conduto equivalente deve ter a mesma perda de carga (ΔH) que a tubulação ou sistema de tubulações quando estiver conduzindo vazão igual (Q).

As fórmulas empregadas no cálculo do conduto equivalente são condicionadas à forma de associação; em série ou em paralelo.

- Conduto equivalente para associação de tubulações em série:

$$\frac{f \times L}{D^5} = \sum_{i=1}^n \frac{f_i \times L_i}{D_i^5}.$$

- Conduto equivalente para associação de tubulações em paralelo:

$$\frac{D^{2,5}}{f^{0,5} \times L^{0,5}} = \frac{D_1^{2,5}}{f_1^{0,5} \times L_1^{0,5}} + \frac{D_2^{2,5}}{f_2^{0,5} \times L_2^{0,5}}.$$

Agora que conhecemos o comportamento dos escoamentos submetidos às associações de tubulações, além de sabermos da possibilidade de simplificação das análises por meio dos condutos equivalentes, teremos como foco os problemas do nosso projeto de ETA.

Sem medo de errar

As associações de tubulação são artifícios muito úteis na vida prática de uma equipe de projetos hidráulicos, pois podem atender a diferentes necessidades. Esse fato ficou evidente na reunião da equipe de trabalho com a qual você está integrando, pois a sugestão de aproveitamento da tubulação antiga tem como propósito a economia de recursos.

Essa reunião resultou nos questionamentos a seguir:

- O que acontece com a vazão total de uma tubulação quando ela é dividida em duas outras, como acontecerá no trecho inicial da adutora?

- No caso de serem tubulações de características diferentes, qual(is) fator(es) rege(m) essa distribuição?

- O segundo trecho será uma única tubulação. O que acontecerá com a vazão e a perda de carga?

- É possível simplificar essas questões utilizando apenas uma tubulação equivalente? O que seria uma tubulação equivalente, em ambos os casos?

As respostas para estas questões auxiliarão no desenvolvimento da análise da influência da disposição das tubulações no regime do escoamento, mais especificamente na unidade elevatória solicitada pelo relatório técnico.

Iniciando a explanação sobre as dúvidas que surgiram, deve-se lembrar que, em associações de tubulações em paralelo, a vazão é dividida de forma inversamente

proporcional à resistência oferecida em cada um dos trechos. Em outras palavras, quando houver maior resistência ao escoamento (maior rugosidade, menor diâmetro, maior comprimento), haverá menor vazão.

Sendo assim, podemos representar a vazão em associações em paralelo da seguinte forma:

$$Q = Q_1 + Q_2.$$

No caso do segundo trecho, em que a adutora antiga não será utilizada, deverá ser dimensionada uma tubulação que suporte a vazão toda, pois ela deverá percorrer toda sua extensão. As perdas de carga deverão ser calculadas e somadas às perdas do trecho anterior. Haverá a configuração de associação em série, adicionando-se esse trecho único ao anterior, composto por duas tubulações.

Há a possibilidade de se calcular um conduto equivalente ao primeiro trecho ou ao sistema todo. Esse conduto seria o tratamento simplificado correspondente ao sistema em paralelo, no caso do primeiro trecho, e em série, para a somatória de ambos os trechos. Para a determinação do conduto equivalente, deve-se atender ao seguinte critério: o conduto deve ter perda de carga igual ao sistema representado, quando conduzindo a mesma vazão.

Avançando na prática

Tubulação de interligação de dois reservatórios

Descrição da situação-problema

Há a possibilidade de se fazer a associação de tubulações entre dois reservatórios, prática bastante utilizada no armazenamento de água já tratada, antes da distribuição. A equipe de projetos que você integra também será a responsável pelas instalações do sistema de armazenamento e distribuição da água tratada. No sistema de reservatórios que serão construídos, há dois interligados por um sistema de tubulações. Esse reservatório é dividido em duas partes, sendo a primeira composta por três tubulações dispostas em paralelo e a segunda por um sistema de duas tubulações, também em paralelo.

Sabendo da teoria que rege as associações de tubulações, responda às seguintes questões:

- Como se comportam a vazão e perda de carga na primeira parte?
- Para facilitar o tratamento analítico do sistema, seria possível dimensionar condutos equivalentes, tanto para as partes isoladas quanto para o sistema todo? Qual é o critério para tal prática?

- Determinados os condutos equivalentes de cada parte, podemos considerar a associação desses dois condutos como associação em série? Quais são as características em relação à vazão e à perda de carga desse tipo de associação?

Resolução da situação-problema

Por se tratar de uma associação em paralelo, a vazão total da associação será a somatória das três tubulações. A perda de carga da associação é igual à diferença de carga piezométrica entre os pontos iniciais e finais, sendo a mesma de cada uma das tubulações.

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3.$$

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3.$$

Sim, é possível calcular condutos equivalentes para as associações em paralelo de forma independente e também para o sistema como um todo. O critério a ser atendido é que esse conduto deve ter a mesma perda de carga que o sistema representado quando estiver conduzindo a mesma vazão.

Sim, a associação de ambos os condutos equivalentes representa o sistema completo, e pode ser considerada uma associação em série. A vazão total percorre todo o sistema, não se dividindo como na associação em paralelo. A perda de carga da associação é a somatória das perdas de carga de cada um dos condutos equivalentes.

Faça valer a pena

1. A associação de tubulações pode ser uma técnica muito útil em determinados casos. Ela pode ser feita com duas configurações básicas: associação em série ou em paralelo. A primeira delas é a simples ligação de um segundo trecho linear de tubulação em sequência ao primeiro, aumentando a distância de condução. Já a segunda é a ligação de um trecho adicional, aumentando a capacidade de condução, pois é feito paralelamente à tubulação.

Sabendo das duas possibilidades de associação de tubulações, analise as alternativas seguintes:

I. A associação de tubulações em série faz com que a vazão total seja a mesma em toda a extensão do sistema.

II. A perda de carga na associação em série é a soma das perdas de carga de cada trecho.

III. A associação de tubulações em paralelo causa a divisão da vazão de forma inversamente proporcional à resistência oferecida em cada um dos trechos.

IV. As perdas de carga em determinada associação de tubulações em paralelo têm perdas iguais a qualquer um de seus trechos, pois todos têm a mesma perda.

V. A soma das perdas de carga de cada trecho de uma associação em paralelo resulta no valor das perdas de carga do sistema.

Marque a alternativa que apresenta todas as afirmações corretas.

- a) I, II, III e IV.
- b) I, II, III e V.
- c) I, III, IV e V.
- d) I, II e III.
- e) I, II, III, IV e V.

2. Com o intuito de simplificar as análises a respeito de uma associação ou até mesmo de uma tubulação linear, podemos utilizar a técnica dos condutos equivalentes. O único critério a ser seguido na determinação do conduto equivalente é o fato de ele ter perda de carga igual ao trecho que representará, quando escoando a mesma vazão.

Considere um sistema de tubulações em série, no qual o primeiro trecho tem diâmetro de 6" e comprimento de 120 m e o segundo, 8" e 180 m. Considere que os escoamentos de ambos os trechos têm fator de atrito (f) de 0,03. Assumindo que o conduto equivalente desse sistema deverá ter 4", determine seu comprimento.

- a) 64,28 m.
- b) 21,43 m.
- c) 6,43 m.
- d) 19,55 m.
- e) 23,5 m.

3. O conduto equivalente pode ser uma tubulação de comprimento, diâmetro e rugosidade diferentes da tubulação do sistema. No entanto, deve atender ao seguinte critério: ter a mesma perda de carga que esse sistema, quando transportando a mesma vazão.

Imagine um sistema composto por três tubulações em paralelo, as quais têm diâmetros de 0,2; 0,3 e 0,35 m e comprimentos de 35, 268 e 579 para os tubos 1, 2 e 3, respectivamente. Sabendo que o fator de atrito é o mesmo para todo o sistema ($f = 0,028$), determine o comprimento do conduto equivalente considerando que ele tenha o mesmo fator de atrito do sistema (0,028) e diâmetro de 0,25 m.

- a) 0,018 m.
- b) 103,5 m.
- c) 18 m.
- d) 11,96 m.
- e) 180 m.

Seção 2.2

Bombas e reservatórios

Diálogo aberto

A demanda por água tratada em abastecimentos urbanos não é constante. Mesmo de forma intuitiva, podemos deduzir que há momentos de picos de consumo e outros de consumos ínfimos. No projeto da estação de tratamento de água para consumo há necessidade de se resolver essa questão, pois não seria viável dimensioná-la para a vazão de pico sendo que durante grande parte do dia ela necessita de vazão expressivamente inferior.

Em nossa situação hipotética, essa questão é colocada em discussão durante a reunião semanal, sendo que você, como engenheiro da equipe, propõe o uso de reservatórios interligados.

Ao notar a reação de espanto por parte dos integrantes da equipe, o engenheiro-chefe faz alguns questionamentos a você sobre essa proposta:

- Como você acha que é o comportamento dessas interligações entre os reservatórios? Quais reservatórios são abastecedores e quais são de compensação?

- Em situações em que a topografia não favorece a passagem de fluxo de água por gravidade entre dois reservatórios, Como devem ser feitas as interligações?

- Como dimensionar uma adutora de modo eficiente? Quais fatores devem ser levados em consideração?

A Seção 2.2 apontará a você o conhecimento necessário para essas perguntas. Além de apresentar os passos básicos do dimensionamento de tubulação, na qual a vazão tem grande influência, este conteúdo lhe dará base para desenvolver justamente essa parte do relatório, relativa à influência da vazão no escoamento, que deverá ser entregue ao final desta unidade.

Animado para conhecer a forma adequada de dimensionar essas importantes obras hidráulicas?

Vamos lá!

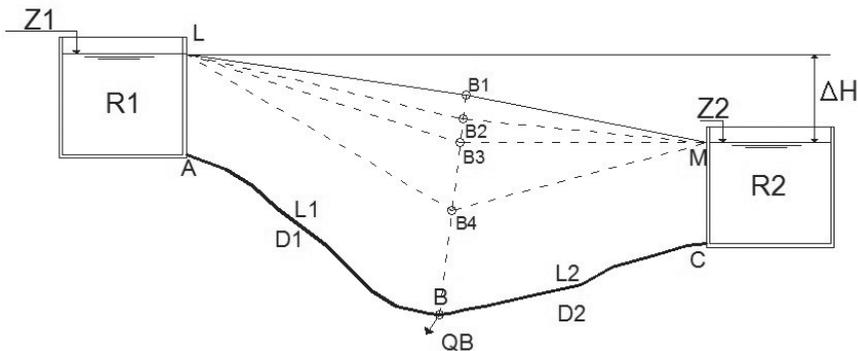
Não pode faltar

A Unidade 2 apresenta os conceitos hidráulicos aprendidos na unidade anterior, no entanto, de forma mais avançada e aplicada. A Seção 2.1 nos trouxe a possibilidade de associar tubulações, o que amplia nosso leque de oportunidades, permitindo executar projetos com diferentes disposições de tubo. O conceito de conduto equivalente também auxilia nesse sentido, pois simplifica o tratamento analítico desses sistemas mais complexos, substituindo-os por um conduto de mesma perda de carga, quando operando com mesma vazão.

Assim, como dissemos, daremos início à Seção 2.2, continuando os estudos de escoamentos em condutos forçados, porém com tratamentos mais aplicados.

Partindo do tema de associação de tubulações discutido na seção anterior, podemos expandir a ideia, estudando, assim, o comportamento de tubulações que interligam reservatórios. Essa prática é muito utilizada em abastecimento urbano, pois nesses sistemas há grande variação do consumo ao longo do dia, atingindo demandas de vazão muito grandes para apenas um reservatório (Figura 2.3).

Figura 2.3 | Dinâmica do funcionamento do reservatório abastecedor e de compensação interligados



Fonte: adaptada de Porto (2006).

A ideia central é ter um reservatório em cota topográfica mais elevada (R1), fornecer água para outro que está situado em cota inferior (R2) e suprir a vazão demandada em B (QB). Esses reservatórios localizados em cotas inferiores são intitulados reservatórios de compensação (PORTO, 2006).

A tubulação AB tem diâmetro D_1 e comprimento L_1 , assim como a tubulação BC tem diâmetro D_2 e comprimento L_2 . Quando o consumo é nulo, toda a vazão que sai do ponto A chega ao C, comportando-se como uma associação de tubulações em série. Sua cota piezométrica é LB_1M e, assim como estudamos nesse tipo de

associação, sua perda das cargas é dada pela soma das de cada conduto. Segundo Porto (2006), a vazão pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 = 0,0827 \times Q^2 \left(\frac{f_1 \times L_1}{D_1^5} + \frac{f_2 \times L_2}{D_2^5} \right) \therefore Q = \sqrt{\frac{\Delta H}{0,0827 \times \left(\frac{f_1 \times L_1}{D_1^5} + \frac{f_2 \times L_2}{D_2^5} \right)}}$$

Conforme aumenta a vazão retirada em B (Q_B), há uma redução da cota piezométrica neste ponto e, conseqüentemente, da vazão que chega a R2. Esse processo continua até que se atinja a cota piezométrica B3, igualando-se ao nível d'água em R2. Nesse ponto não há mais fluxo de B para C, sendo que a vazão em B pode ser calculada com a seguinte fórmula (PORTO, 2006):

$$Q_B = \sqrt{\frac{(Z_1 - Z_2) \times D_1^5}{0,0827 \times f_1 \times L_1}}$$

Quando Q_B atinge a posição B4 da cota piezométrica em B, o reservatório R2 auxilia no abastecimento da rede, sendo a vazão em B a somatória de ambos os trechos (PORTO, 2006).

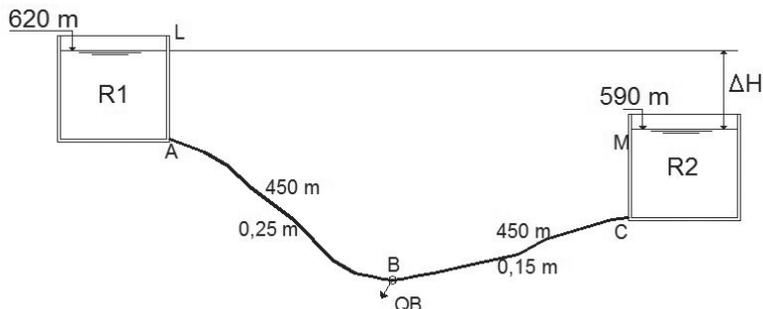
$$Q_B = \sqrt{\frac{(Z_1 - B4) \times D_1^5}{0,0827 \times f_1 \times L_1}} + \sqrt{\frac{(Z_2 - B4) \times D_2^5}{0,0827 \times f_2 \times L_2}}$$



Exemplificando

Imagine dois reservatórios interligados, assim como na figura seguinte:

Figura 2.4 | Abastecimento de água a partir de dois reservatórios interligados



Fonte: adaptada de Porto (2006).

O reservatório R1 se encontra em cota topográfica de 620 m e R2, de 590 m. Há uma tomada de água (ponto B) no meio da tubulação que os interliga. A tubulação que vai do ponto A (R1) para o ponto B tem 450 m de comprimento e diâmetro de 25 cm. Já a tubulação que vai da tomada de água (ponto B) ao segundo reservatório (ponto C) é constituída de 450 m de tubo de 15 cm de diâmetro. Assumindo que o fator de atrito de ambas as tubulações é igual ($f = 0,03$), determine:

- A vazão máxima que R2 receberia.
- A vazão máxima em B fornecida somente por R1.
- A vazão em B se a cota piezométrica nesse ponto for 510 m.

$$Q = \sqrt{\frac{\Delta H}{0,0827 \times \left(\frac{f_1 \times L_1}{D_1^5} + \frac{f_2 \times L_2}{D_2^5} \right)}} =$$

$$\sqrt{\frac{30}{0,0827 \times \left(\frac{0,03 \times 450}{0,25^5} + \frac{0,03 \times 450}{0,15^5} \right)}} = 0,0435 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Vazão máxima que R2 receberia se não houvesse saída em B: $0,0435 \text{ m}^3/\text{s}$.

$$Q_B = \sqrt{\frac{(Z_1 - Z_2) \times D_1^5}{0,0827 \times f_1 \times L_1}} = \sqrt{\frac{(620 - 590) \times 0,25^5}{0,0827 \times 0,03 \times 450}} = 0,162 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Vazão máxima proporcionada pelo R1 em B: $0,162 \text{ m}^3/\text{s}$.

$$Q_B = \sqrt{\frac{(Z_1 - B4) \times D_1^5}{0,0827 \times f_1 \times L_1}} + \sqrt{\frac{(Z_2 - B4) \times D_2^5}{0,0827 \times f_2 \times L_2}} =$$

$$\sqrt{\frac{(620 - 510) \times 0,25^5}{0,0827 \times 0,03 \times 450}} + \sqrt{\frac{(590 - 510) \times 0,15^5}{0,0827 \times 0,03 \times 450}} = 0,310 + 0,074 = 0,384 \text{ m}^3/\text{s}.$$

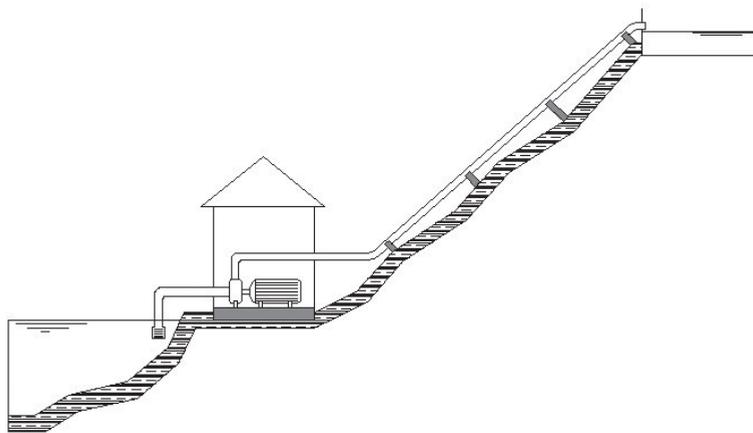
Vazão em B caso sua cota piezométrica fosse 510 m: $0,384 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ainda analisando a ideia de reservatórios interligados, a diferença da altura geométrica entre eles pode ser um obstáculo. Imaginemos a seguinte situação: um determinado reservatório se encontra em cota topográfica (geométrica) inferior a um segundo reservatório, sendo que o fluxo deve ser, necessariamente, no sentido da cota inferior para a superior. Haverá necessidade da instalação de uma estrutura

hidráulica que forneça energia ao líquido, a fim de vencer essa diferença, denominada de *estação elevatória*.

Estação elevatória: são unidades responsáveis por bombear determinado líquido que se encontra em cota topográfica inferior ao ponto que se objetiva alcançar, localizado em cota topográfica mais elevada. Em outras palavras, são unidades dimensionadas para fornecer a energia necessária ao vencimento da diferença de cota topográfica entre o ponto em que se encontra o líquido e o final almejado (Figura 2.5).

Figura 2.5 | Representação de estação elevatória



Fonte: elaborada pelo autor.

Essas unidades são compostas por três partes: tubulação de sucção, tubulação de recalque e conjunto motobomba.

Tubulação de sucção: tubulação localizada antes do conjunto motobomba, é a responsável pelo transporte da água desde o ponto de captação (corpo hídrico ou poço subterrâneo) até a bomba hidráulica.

Conjunto motobomba: é a unidade transferidora de energia ao escoamento. Ele é formado pela bomba hidráulica e motor. Geralmente, essa instalação é protegida das intempéries por uma estrutura de alvenaria, conhecida como casa de máquinas ou de bombas.

Tubulação de recalque: tubulação localizada após o conjunto motobomba. Sua função é conduzir a água desde a bomba até o destino desejado (reservatório, estação de tratamento etc.).

O dimensionamento dessa unidade ocorre, inicialmente, pela tubulação de recalque, pois, além de ser a parte mais extensa da tubulação, é fator determinante nas perdas de carga do sistema.

Para determinação do diâmetro da tubulação de recalque, deve-se atentar para a relação deste com as perdas de carga e conseqüente necessidade de transferência de energia. Esta advém da altura geométrica a ser vencida, além das perdas de carga do sistema.

Segundo Porto (2006), como a altura geométrica e a vazão são fixos e preestabelecidos, os custos totais da tubulação e do conjunto elevatório, incluindo o custo anual de energia, dependem, de formas opostas, do diâmetro escolhido.

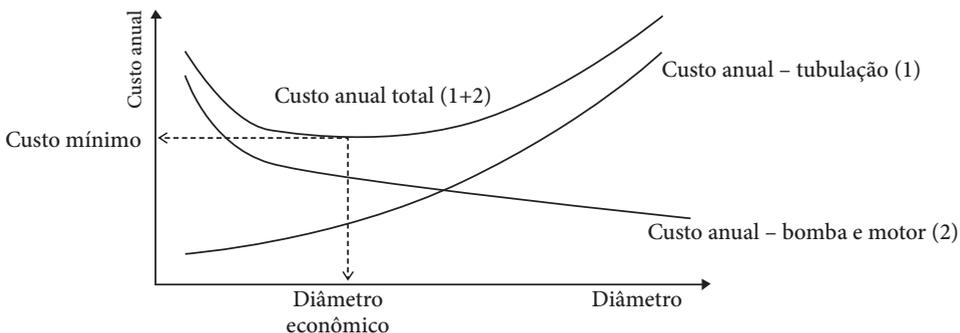
Primeira possibilidade: o diâmetro de recalque escolhido é demasiadamente grande. Isso implicaria em baixa perda de carga e conseqüente baixa potência necessária ao motor, no entanto, o custo da tubulação seria mais elevado.

Segunda possibilidade: o diâmetro escolhido é inferior ao adequado, o que elevaria as perdas de carga e, conseqüentemente, a potência necessária ao motor. Essa possibilidade elevaria o custo operacional do sistema, apesar de reduzir o custo de implantação da tubulação.

Essas questões são explicadas por duas fórmulas. A primeira delas relaciona o custo anual da tubulação, incluindo instalação e depreciação. A segunda trata do custo anual do conjunto motobomba, incluindo custos operacionais e de manutenção. Porto (2006) demonstra essas fórmulas, que são uma interessante fonte de pesquisa para quem necessita desenvolvê-las.

Para o nosso caso, a análise do gráfico resultante dessas equações é suficiente ao entendimento conceitual (Figura 2.6).

Figura 2.6 | Análise gráfica do custo mínimo e, conseqüentemente, diâmetro econômico



Fonte: adaptada de Porto (2006).

A terceira curva, situada na parte superior, é a somatória do custo anual de instalação (referente à tubulação) e operação (referente ao conjunto motobomba). O ponto de mínimo custo, parâmetro apresentado nas ordenadas, é justamente o ponto de *diâmetro econômico*, no eixo das abscissas (Figura 2.6).

Há diversas formas de se calcular o diâmetro econômico, sendo algumas delas bastante precisas, porém complexas. Segundo Porto (2006), para instalações simplificadas, pequena potência e turno de trabalho de 24 horas por dia, pode-se utilizar a fórmula de Bresse como forma de cálculo preliminar:

$$D(m) = K \sqrt{Q(m^3 / s)} .$$

Em que K depende do custo material, operacional e situação econômica do local, variando de 0,7 a 1,3.

No entanto, segundo esse mesmo autor, a fórmula de Bresse necessita de algumas observações:

- Simplificação de questões complexas e muitas variáveis econômicas, devendo ser empregadas somente em fases de pré-projeto.

- Para sistemas com adutora de até 6", o diâmetro é aceitável.

- A fixação de K é equivalente à adoção de uma velocidade média de recalque, denominada *velocidade econômica*. Em geral, varia de 0,6 a 3,0 m/s, sendo mais comum velocidades entre 1,5 e 2 m/s.

- A fórmula de Bresse somente deve ser utilizada para turnos de operação de 24 h/dia. Sempre que seu funcionamento for por período inferior a 24 horas por dia, deve-se utilizar a fórmula sugerida na NBR 5626:

$$D(m) = 1,3^4 \sqrt{X} \sqrt{Q(m^3 / s)} .$$

Em que: X = fração do dia trabalhada $\frac{\text{turno}}{24}$.

Em qualquer um dos métodos, Bresse ou NBR 5626, deve-se escolher o diâmetro comercial mais próximo do valor obtido.



Refleta

Conhecendo as duas possíveis equações utilizadas para o cálculo preliminar do diâmetro econômico, equações de Bresse e NBR 5626, qual é o parâmetro que determinará qual equação se deve usar?

Se você aplicar a equação da NBR para um turno de 24 horas ou aplicar Bresse com coeficiente $k = 1,3$, haverá diferença?



Exemplificando

Uma pequena estação elevatória deverá ser construída para bombear uma vazão de 12 L/s. O turno de operação será de 18 horas por dia. Sabendo disso, como seria a forma correta de se calcular, mesmo que de forma inicial, o diâmetro econômico da tubulação de recalque dessa unidade? Qual seria seu valor?

Por se tratar de uma unidade pequena, a qual necessitará de pequena potência no conjunto motobomba e operará 18 horas por dia, devermos utilizar a fórmula sugerida pela NBR 5626:

$$D(m) = 1,3\sqrt[4]{X} \sqrt{Q(m^3/s)} = 1,3\sqrt[4]{\frac{18}{24}} \sqrt{0,012} = 0,133m .$$

Como a fórmula resultou em diâmetro inferior a 6" (152mm), esse valor seria aceitável como diâmetro definitivo (critério da fórmula de Bresse). O próximo passo seria buscar a tabela de diâmetros comerciais do tubo que será empregado (PVC, ferro fundido) e adotar o diâmetro comercial mais próximo.

Definido o diâmetro econômico, mesmo que de forma prévia e simplificada, o próximo passo para avançarmos no estudo da estação elevatória será a definição do diâmetro da tubulação de sucção. Esse trecho da tubulação que se situa antes da bomba hidráulica deve ter a mínima perda de carga possível, por alguns motivos, descritos a seguir.

- As perdas de carga representam dissipações de energia que não são aproveitadas no sistema, havendo necessidade de reposição dessa energia por parte do conjunto motobomba. Assim, quanto menores as perdas de carga, menor será a potência do motor e, conseqüentemente, o consumo de energia.

- Outro ponto importante é a manutenção de uma quantidade de energia livre na entrada da bomba, denominada NPSH (*Net Positive Suction Head*). Quanto menores forem as perdas de carga nesse trecho, maior será a energia disponível e menor será o risco de ocorrer cavitação no interior da bomba. O tema da cavitação será devidamente abordado na Seção 2.3.

Assim, para a tubulação de sucção, indica-se a adoção do primeiro diâmetro comercial superior ao determinado para a tubulação de recalque. Essa prática tem como objetivo reduzir a velocidade no interior do tubo e, conseqüentemente, reduzir a perda de carga.



Assimile

Reservatórios interligados têm comportamento condicionado ao nível da cota piezométrica. Em geral, o reservatório que se encontra em cota topográfica mais elevada é o abastecedor, sendo que os outros serão de compensação, podendo receber ou fornecer água.

Para fazer a conexão de reservatórios que não se encontram em cotas topográficas que favoreçam, o fluxo natural, por gravidade utilizam-se as estações elevatórias. Essas unidades são formadas por tubulação de sucção, conjunto motobomba e tubulação de recalque. Esta última é parte decisiva para o dimensionamento dessas estruturas. Seu diâmetro econômico pode ser estimado por duas fórmulas simplificadas: Bresse ou equação sugerida pela NBR 5626, sendo o turno de trabalho diário o parâmetro decisivo.

Calculado o diâmetro econômico, deve-se escolher, utilizando-se uma tabela de medidas comerciais, a medida mais próxima para a tubulação de recalque. Para a tubulação de sucção, deve-se empregar o primeiro diâmetro comercial superior ao escolhido para o recalque.



Pesquise mais

A indicação a seguir é uma vídeoaula produzida pelo professor Marllus Gustavo Neves. Na aula, ele avança no tema de reservatórios interligados, desenvolvendo situações de três ou mais reservatórios de uma forma bastante didática. Além disso, ele apresenta durante o vídeo algumas importantes referências para demais pesquisas sobre o tema.

Vídeo-aula 24: condutos interligando 3 ou mais reservatórios. Marllus Gustavo Neves, 2014. Vídeo do YouTube. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=whRuU4yqGpc>>. Acesso em: 5 jan. 2017.

Outras indicações são os Capítulos 4 e 5 de Porto (2006). O capítulo 4 aborda o tema de reservatórios interligados de forma clara e prática, enquanto o capítulo 5 trata do tema de estação elevatória.

PORTO, R. de M. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006, 540p.

Assim, conclui-se a Seção 2.2, a qual abordou os temas de reservatórios interligados e tubulações, introduzindo a concepção de estações elevatórias. Esse conteúdo lhe proporciona conhecimento para a resolução de questões profissionais e/ou cotidianas sobre esses assuntos.

Sem medo de errar

Agora que sabemos mais sobre a possibilidade de interligar reservatórios, além de termos visto a aplicação, constituição e início do dimensionamento de estação elevatória, podemos retomar nosso problema inicial.

- Como você acha que é o comportamento dessas interligações entre os reservatórios? Quais reservatórios são abastecedores e quais são de compensação?

- Em situações em que a topografia não favorece o fluxo de água por gravidade entre dois reservatórios, como deve ser feito?

- Como dimensionar uma adutora de modo eficiente? Quais fatores devem ser levados em consideração?

Reservatórios interligados são um fato comum em sistemas de abastecimento de água potável. O principal motivo é a demanda irregular de água, com momentos de pico de fornecimento. Esse contexto inicia o desenvolvimento do raciocínio, pois se há momentos de grande necessidade e outros de demandas inferiores, qualquer outra forma de distribuição oneraria muito o sistema. Haveria a necessidade de sistemas de abastecimentos superdimensionados. O sistema de reservatórios interligados trabalha de forma tal que o reservatório situado em cota topográfica superior é sempre o abastecedor, tanto dos reservatórios inferiores quanto da própria demanda urbana. Já os reservatórios situados em cotas inferiores operam em alguns momentos recebendo água e, em outros, abastecendo, também. Eles são intitulados reservatórios de compensação.

Em locais nos quais a topografia não permite que haja um fluxo por gravidade entre os reservatórios, é necessária a implantação de estações elevatórias. Essas unidades têm como objetivo fornecer energia para a corrente líquida, a fim de possibilitar a transposição dessa diferença geométrica. De forma simplificada, podemos citar os dois principais fatores influentes no dimensionamento dessas unidades: custo de instalação e de operação. Esses dois fatores são separados em duas equações, no entanto, ambas as equações tratam do custo em relação ao diâmetro. Quando representadas em gráfico, pode-se obter uma terceira curva, resultante da somatória delas, a qual explicita nas ordenadas o custo mínimo e, nas abscissas, o diâmetro econômico. Essa é a técnica mais apropriada para dimensionamento de adutora: metodologia do diâmetro econômico.

Sabendo que os fatores que mais influenciam no diâmetro econômico são as perdas de carga da tubulação, a determinação do diâmetro mais eficiente tem esse fator como prioritário. Logo, a determinação do diâmetro econômico deve ser feita na fase inicial do dimensionamento, pois sabemos que esse parâmetro condiciona todos os demais (tubulação de sucção e conjunto motobomba).

A vazão tem influência direta no dimensionamento da tubulação. Caso trate de uma tubulação já estabelecida, o incremento da vazão acarretaria na alteração do regime de escoamento, pois aumentaria a velocidade e, conseqüentemente, as perdas de carga. Assim como a disposição da tubulação, discutida na Seção 2.1, a alteração da vazão tem influência direta no regime de escoamento. Esses fatos deverão ser discutidos no relatório que será entregue ao final desta unidade.

Avançando na prática

Tubulação de interligação de dois reservatórios

Descrição da situação-problema

Agora que possui conhecimento suficiente a respeito de reservatórios interligados e estações elevatórias, você foi indicado para representar a equipe de projetos na reunião com um grupo de investidores.

Há entre eles um engenheiro com alguns conhecimentos de sistemas hidráulicos que propõe a você as seguintes questões:

- Sabemos que o abastecimento público utiliza a técnica de reservatórios interligados. Por que a empregam?
- Quando não há possibilidade de haver fluxo por gravidade entre dois reservatórios, qual é o artifício utilizado?
- Qual é a metodologia ideal para se dimensionar determinada adutora?
- Qual é a equação simplificada que pode ser empregada em dimensionamentos preliminares de adutoras? E qual é a equação caso seja uma adutora que não trabalha 24 h/dia?

Resolução da situação-problema

Emprega-se a técnica de reservatórios interligados para que, em momentos de pico de demanda, os dois consigam fornecer a vazão necessária. Por outro lado, em situações em que a demanda seja menor, o segundo reservatório se recarrega. É uma prática que evita superdimensionamento de estações de tratamento, pois pode armazenar água para os momentos de elevada demanda.

Quando não há possibilidade de realizar a interligação de dois reservatórios, deverá ser utilizada a estação elevatória. Essa unidade é composta por tubulações e conjunto motobomba. São usadas para transferir energia ao líquido, a fim de possibilitar a transposição da diferença topográfica.

O diâmetro ideal é aquele que carece de menor custo. Há diversas técnicas que fazem o cálculo do diâmetro econômico. No entanto, em geral, relacionam os custos de instalação e de operação com o diâmetro da adutora.

A equação simplificada para esse cálculo é a fórmula de Bresse ($D=k\sqrt[3]{Q}$), na qual k é o coeficiente que relaciona aspectos econômicos. Em geral, são escolhidos valores entre 0,7 e 1,3. Ainda falando dos parâmetros utilizados nesta equação, Q é a vazão em m^3/s e D é o diâmetro em m.

Caso o turno de trabalho da estação não seja 24 h, deve-se aplicar a equação sugerida pela NBR 5626 ($D=1,3\sqrt[4]{X\sqrt[3]{Q}}$), em que X é a fração do dia trabalhada ($\frac{\text{turno}}{24}$).

Faça valer a pena

1. A interconexão de reservatórios é uma técnica muito empregada em sistemas de abastecimento urbano de água tratada. O motivo é a possibilidade de dimensionamento de sistemas mais eficientes, com estações de tratamento menores, pois elas não necessitarão atender à demanda de pico, momento em que os reservatórios de compensação também abastecerão o sistema.

Sabendo que os reservatórios de compensação contribuem com o abastecimento nos momentos de maior demanda, marque a alternativa que apresenta a fórmula que melhor representa a equação empregada no cálculo da vazão nesses períodos.

$$\text{a) } Q = \sqrt{\frac{\Delta H}{0,0827 \times \left(\frac{f_1 \times L_1}{D_1^5} + \frac{f_2 \times L_2}{D_2^5} \right)}}$$

$$\text{b) } Q = 0,0827 \times v^2 \left(\frac{f_1 \times L_1}{D_1^5} + \frac{f_2 \times L_2}{D_2^5} \right)$$

$$\text{c) } Q_B = \sqrt{\frac{(Z_1 - B) \times D_1^5}{0,0827 \times f_1 \times L_1}} + \sqrt{\frac{(Z_2 - B) \times D_2^5}{0,0827 \times f_2 \times L_2}}$$

$$\text{d) } Q_B = \sqrt{\frac{(Z_1 - Z_2) \times D_1^5}{0,0827 \times f_1 \times L_1}}$$

$$\text{e) } Q_B = \sqrt{\frac{(Z_1 - B) \times D_1^5}{0,0827 \times f_1 \times L_1}}$$

2. As estações elevatórias têm como função transferir energia a água, a fim de possibilitar o vencimento da diferença topográfica existente entre dois pontos. Elas são compostas por tubulações e conjunto motobomba, sendo que, possivelmente, o trecho de maior importância no momento do dimensionamento seja a tubulação de recalque.

Com base na afirmação dada e em seus conhecimentos, faça o dimensionamento preliminar de uma adutora para as seguintes condições:

$$Q = 6 \text{ l/s.}$$

Turno de trabalho = 24 h.

k em relação a situação econômica do país = 1,3.

Marque entre a alternativa que apresenta o diâmetro correto da adutora.

- a) 0,1 m.
- b) 0,15 m.
- c) 1,5 m.
- d) 1 m.
- e) 1,51 m.

3. Para dimensionamentos de pequenas unidades elevatórias, com pequeno diâmetro de tubulação e necessidade de pequena potência, há métodos simplificados. Os dois principais são a fórmula de Bresse e a equação sugerida pela NBR 5626.

Com base nos critérios necessários para a aplicação das fórmulas simplificadas de dimensionamento preliminar de tubulação de recalque, determine o diâmetro econômico da tubulação sob as seguintes condições:

$$Q = 11 \text{ l/s.}$$

Turno de trabalho = 10 h/dia.

k em relação a situação econômica atual = 1,2.

Marque a alternativa que apresenta o diâmetro econômico verdadeiro.

- a) 0,13 m.
- b) 0,12 m.
- c) 0,11 m.
- d) 0,10 m.
- e) 0,5 m.

Seção 2.3

Sistemas de tubulações

Diálogo aberto

As estações elevatórias são unidades de transferência de energia ao líquido. Em geral, essa energia suplementar adicionada tem como objetivo transpor diferenças topográficas. Seu dimensionamento parte da escolha do diâmetro mais adequado (diâmetro econômico) com posterior escolha do conjunto motobomba ideal para o projeto.

O projeto da estação de tratamento de água (ETA) que você integra inclui a parte antecedente à estação, ou seja, a adutora de água bruta e o conjunto motobomba (unidade elevatória). Sabendo da necessidade do pré-dimensionamento da unidade elevatória da ETA, a equipe pediu a você que a calcule com base nas seguintes condições:

Turno de trabalho e vazão: 18 h/dia e $110 \text{ m}^3/\text{h}$, respectivamente.

Diferença geométrica e altura estática de sucção: 20 e 1,1 m, respectivamente.

Material do tubo e rendimento do motor elétrico: ferro fundido e 85%, respectivamente.

Comprimento da tubulação de recalque e sucção: 465 e 5,2, respectivamente.

Acessórios hidráulicos:

Quant.	Sucção	Le (m)	Quant.	Recalque	Le (m)
1	Válvula de pé com crivo	39,75	1	Válvula de retenção	8,36
1	Curva 90° R/D = 1,5	1,92	1	Registro de gaveta	0,7
			2	Curva 45°	1,56

Le: comprimento equivalente.

Pré-dimensionada a unidade, deverá ser preparado o relatório técnico com a análise de dois temas:

- Efeito do aumento da vazão no sistema. Exemplo: como seria se sua vazão aumentasse 100% ou reduzisse 50%?

- Efeito da inclusão de associações de tubulações na adutora. Exemplo: como seria se a adutora fosse uma associação em série ou em paralelo?

O conteúdo necessário para a confecção do relatório foi trabalhado, de forma fracionada, nas seções desta unidade. Agora, é o momento de você reunir todas as informações para finalizar sua análise da influência da vazão e da tubulação no regime de escoamento sob pressão.

Não pode faltar

Como vimos na Seção 2.2, as estações elevatórias são unidades dimensionadas para transferir ao líquido a energia necessária ao vencimento de uma diferença de cota topográfica. Essas unidades são compostas pelo conjunto motobomba (bomba hidráulica e motor) e tubulação (sucção e recalque). A Seção 2.2 apresentou o conceito de diâmetro econômico e discorreu sobre a importância de sua aplicação no dimensionamento das tubulações.

Definido os diâmetros de ambas as tubulações: recalque e sucção, o próximo passo deve ser a determinação das perdas de carga existentes nelas.

Estudamos na unidade anterior a fórmula universal ou equação de Darcy-Weisbach para as perdas de carga distribuídas. Para as localizadas, foi apresentada a possibilidade de se usar as equações que empregam o coeficiente de perda de carga (k) ou comprimento equivalente (L_e).

Existem outras equações propostas para o cálculo das perdas de carga. Algumas delas as tratam desde um ponto de vista mais prático, sendo a equação de Hazen-Williams uma das mais conhecidas. Esta se baseia em dados e coeficientes experimentais, apresentando boa aproximação e simplificando bastante o cálculo.

$$J = 10,65 \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} \times D^{4,87}}$$

Em que: J = perda de carga unitária (m/m).

Q = vazão (m^3/s).

C = coeficiente relacionado ao material da tubulação ($m^{0,367}/s$).

D = diâmetro (m).

O coeficiente C, relacionado ao material da tubulação, trata-se de um fator resultado de experimentações e, por isso, é apresentado em quadros (Quadro 2.1).

Quadro 2.1 | Materiais mais utilizados na confecção de tubos hidráulicos e seus respectivos coeficientes C

Tubo	Coeficiente C	Tubo	Coeficiente C
Aço corrugado (chapa ondulada)	60	Cobre	130
Aço com junta <i>lock-bar</i> , tubo novo	130	Concreto, com acabamento	130
Aço com junta <i>lock-bar</i> , em uso	90	Concreto, acabamento comum	120
Aço galvanizado	125	Ferro fundido, novo	130
Aço rebitado, tubo novo	110	Ferro fundido, usado	90
Aço rebitado, em uso	85	Ferro fundido, após 15-20 anos de uso	100
Aço soldado, tubo novo	130	Ferro fundido revestido de cimento	130
Aço soldado, em uso	90	Madeira em aduelas	120
Aço soldado com revestimento especial	130	Tubo extrudado, P.V.C	150

Fonte: Adaptado de Azevedo Netto e Alvarez (1973).

Podemos calcular as perdas de carga totais pela seguinte fórmula:

$$\Delta H_T = J \times L_{Total}$$

Em que: ΔH_T = perda de carga total (m).

J = perda de carga unitária.

L_{total} = comprimento total da tubulação.

Para utilização desta metodologia, as perdas de carga localizadas, referentes aos acessórios hidráulicos, devem ser empregadas somente na forma de comprimento equivalente (Quadro 2.2), obtendo ao final o total (L_{total}).

Quadro 2.2 | Acessórios mais utilizados e seus respectivos comprimentos equivalentes

Acessório hidráulico										
Diâmetro externo mm - ref.	Cotovelo 90°	Cotovelo 45°	Curva 90°	Curva 45°	Entrada normal	Saída de canalização	Válvula pé com crivo	Válvula retenção leve	Registro globo aberto	Registro gaveta aberto
25 - ¾"	1,2	0,5	0,5	0,3	0,4	0,9	9,5	2,7	11,4	0,2
32 - 1"	1,5	0,7	0,6	0,4	0,5	1,3	13,3	3,8	15	0,3
40 - 1 ¼"	2,0	1,0	0,7	0,5	0,6	1,4	15,5	4,9	22	0,4
50 - 1 ½"	3,2	1,3	1,2	0,6	1,0	3,2	18,3	6,8	35,8	0,7
60 - 2"	3,4	1,5	1,3	0,7	1,5	3,3	23,7	7,1	37,9	0,8
75 - 2 ½"	3,7	1,7	1,4	0,8	1,6	3,5	25	8,2	38	0,9
85 - 3"	3,9	1,8	1,5	0,9	2,0	3,7	26,8	9,3	40	0,9
110 - 4"	4,3	1,9	1,6	1,0	2,2	3,9	28,6	10,4	42,3	1,0
140 - 5"	4,9	2,4	1,9	1,1	2,5	4,9	37,4	12,5	50,9	1,1
160 - 6"	5,4	2,6	2,1	1,2	2,8	5,5	43,4	13,9	56,7	1,2

Fonte: adaptada de ABNT (1998 apud PORTO, 2006).



Exemplificando

Determinada tubulação de aço galvanizado, com diâmetro de 15 cm e comprimento de 35 m, tem uma válvula de gaveta e dois cotovelos de 90°. Sabendo que a tubulação tem vazão de 10 L/s, podemos calcular a perda de carga unitária pela fórmula de Hazen-Williams:

$$J = 10,65 \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} \times D^{4,87}} = 10,65 \frac{0,010^{1,85}}{125^{1,85} \times 0,15^{4,87}} = 2,89 \times 10^{-3} \text{ m/m}$$

Para determinar L_T , precisamos incluir os comprimentos equivalentes dos acessórios:

$$L_T = (1 \times 1,2) + (2 \times 5,4) + 35 = 47 \text{ m}$$

E, logo, determinar a perda de carga total:

$$\Delta H_T = J \times L_T = 2,89 \times 10^{-3} \times 47 = 0,136 \text{ m}$$

Após a determinação das perdas de carga das tubulações de recalque e de sucção, cada uma delas de forma individual, e depois de termos conhecimento da altura geométrica a ser vencida, podemos calcular a altura total de elevação (PORTO, 2006):

$$H = Hg + \Delta H_s + \Delta H_R$$

Em que: H = altura total de elevação (m).

Hg = altura geométrica (m).

ΔH_s = perda de carga da tubulação de sucção (m).

ΔH_R = perda de carga da tubulação de recalque (m).

Conjunto motobomba – essa parte da unidade é composta pela bomba hidráulica e pelo motor (combustão interna ou elétrico). Ele tem como função a transformação da energia recebida pelo motor (eletricidade ou combustível) em movimento, transferindo energia ao líquido na forma cinética e de pressão.

A bomba hidráulica tem diversas configurações. Ela pode ser classificada em função do deslocamento do fluido: deslocamento positivo (volumétrica ou hidrostática) ou não positivo (hidrodinâmica ou turbobomba).

Deslocamento positivo: tem bombeamento descontínuo do líquido, operando de forma pulsativa, impulsionando determinado volume constante de líquido. Os propulsores mais comuns são pistões, êmbolos e diafragmas. Recebem esse nome devido ao fato de o escoamento acontecer no mesmo sentido do propulsor.



Pesquise mais

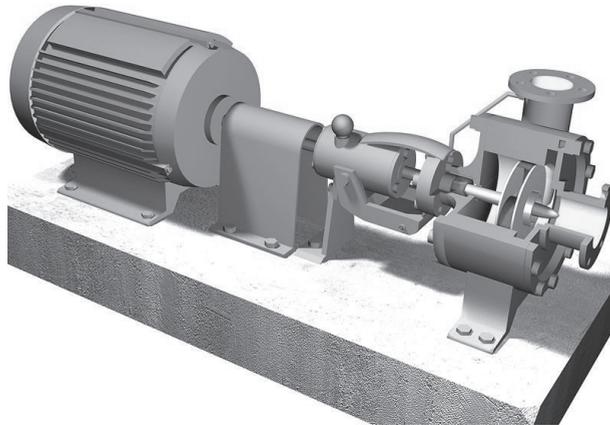
O vídeo indicado a seguir demonstra de forma muito didática os principais modelos de bombas de deslocamento positivo. As informações escritas contidas nele estão em espanhol, no entanto, não é um problema, haja vista sua forma pedagógica de exposição.

BOMBAS desplazamiento positivo. Lady Engineer, 2016. Vídeo do YouTube. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=T0XbONQHz0k&t=22s>>. Acesso em: 6 jan 2017.

Deslocamento não positivo: essa categoria de bombas tem fluxo contínuo e não positivo. Seu principal modelo é a bomba centrífuga. Seu propulsor mais comum é o rotor, o qual orienta o deslocamento do líquido dentro do corpo da bomba.

Há uma subclassificação deste modelo segundo o sentido da saída do líquido em relação ao eixo da bomba, podendo ser radial (Figura 2.7), misto (diagonal) e axial.

Figura 2.7 | Conjunto motobomba composto por motor elétrico e bomba centrífuga radial



Fonte: Mokerly (2007).



Pesquise mais

Assim como o vídeo anterior, a indicação seguinte também tem suas descrições em espanhol. São vídeos muito didáticos, por isso a indicação, apesar do idioma. O vídeo trata de bombas centrífugas, com demonstração de seu funcionamento, rápida passagem pelo tema de cavitação (tratado a seguir) e exemplificação dos três possíveis tipos de rotores.

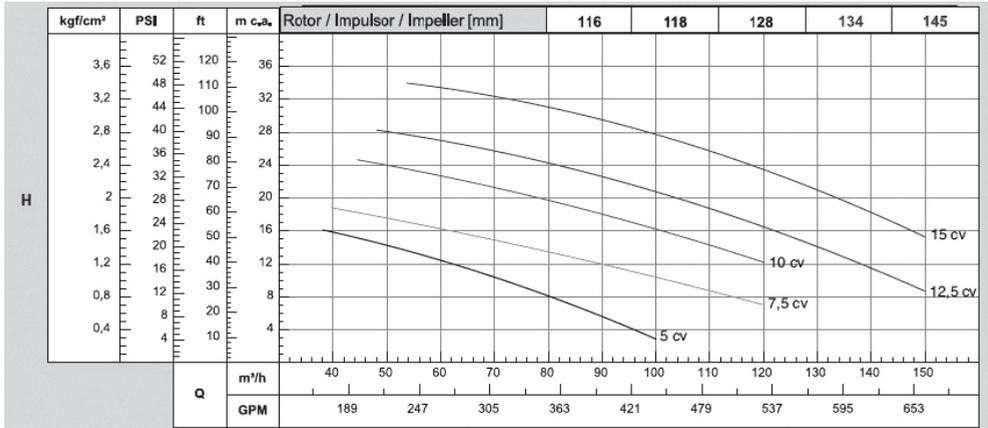
FUNCIONAMIENTO de bombas centrífugas. Roberto Torres, 2015. Vídeo do Youtube. 2015. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=UeRLV8qnBz8>>. Acesso em: 6 jan. 2017.

Nessa transferência de energia desde o motor, passando pela bomba e chegando ao líquido, há dissipações de energia na forma de calor. Isso faz com que a energia recebida pelo líquido seja menor do que a energia recebida pela bomba, que, por outro lado, é menor do que a energia recebida inicialmente pelo motor.

Os fabricantes de bombas hidráulicas desenvolvem testes apropriados para cada tipo de bomba. Esses testes resultam em gráficos (Figura 2.8), denominados curvas características da bomba, sendo os principais descritos a seguir:

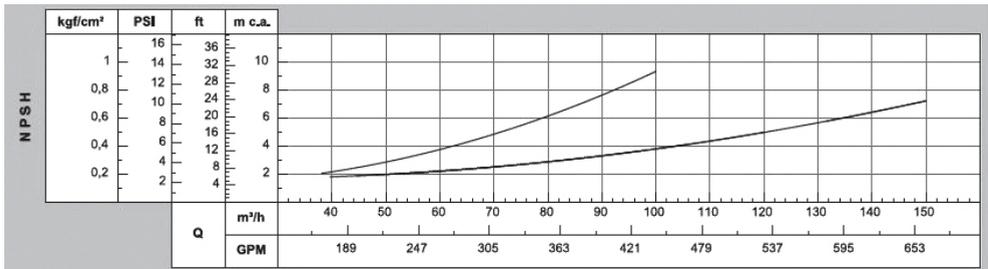
- Altura total de elevação em função da vazão $H = f(Q)$.
- NPSH requerido em função da vazão $NPSH_R = f(Q)$.
- Rendimento em função da vazão $\eta = f(Q)$.

Figura 2.8 | Curvas características da bomba – H x Q



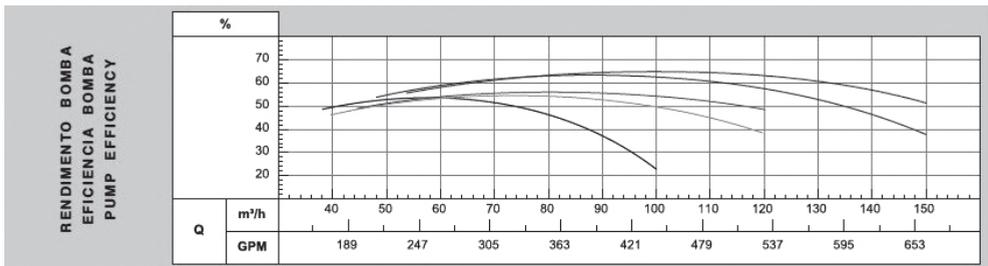
Fonte: adaptada de <http://www.schneider.ind.br/mais/recursosdownloads/biblioteca/?n=6953>. Acesso em: 6 jan. 2017.

Figura 2.9 | Curvas características da bomba - NPSH



Fonte: adaptada de <http://www.schneider.ind.br/mais/recursosdownloads/biblioteca/?n=6953>. Acesso em: 6 jan. 2017.

Figura 2.10 | Curvas características da bomba - rendimento



Fonte: adaptada de <http://www.schneider.ind.br/mais/recursosdownloads/biblioteca/?n=6953>. Acesso em: 6 jan. 2017.



Refleta

Todos esses parâmetros são calculados em função da vazão. Você acha que há influência da vazão no dimensionamento do sistema?

Haveria uma relação direta da vazão com o custo total do projeto? Por exemplo, seu aumento acarretaria no aumento do valor do projeto?

O uso das curvas características da bomba é simples. Para as curvas utilizadas como exemplo (Figura 2.8), necessita-se da vazão em m^3/h e da altura total de elevação em metros. Aplicando esses dois dados ao primeiro gráfico, determinaremos a medida do rotor mais adequado (definidos pelas diferentes cores).

Para a determinação do NPSHR, deve-se utilizar a Figura 2.9. Aplica-se no eixo das abscissas o valor da vazão (m^3/h), traçamos uma linha vertical ascendente até coincidir com a curva. A partir desse ponto, traça-se uma linha horizontal no sentido das ordenadas, sendo a leitura nesse eixo o valor do NPSHR para essa vazão específica.

O rendimento da bomba segue a mesma dinâmica do NPSHR, no entanto, deve-se usar a Figura 2.10.

Determinado a medida do rotor, o NPSHR e o rendimento, pode-se calcular a potência necessária à bomba para que se atenda à vazão e altura total de elevação requeridas.

$$Pot = \frac{\gamma \times (Q) \times (H)}{\eta} (W) ; \text{ recalque de água} \rightarrow Pot = \frac{9,8 \times (Q) \times (H)}{\eta} (kW).$$

Em que: Pot = potência necessária à bomba (kW).

γ = peso específico do líquido (N/m^3).

Q = vazão (m^3/s).

H = altura total de elevação (m).

η = rendimento (%).

De forma semelhante, pode-se efetuar o cálculo da potência do motor que fará parte do conjunto, pois nesse equipamento também há perdas de energia.

$$Pot^* = \frac{9,8 \times (Q) \times (H)}{\eta \times \eta^*}.$$

Em que: Pot^* = potência necessária ao motor (kW).

Q = vazão (m^3/s).

H = altura total de elevação (m).

η = rendimento da bomba (%).

η^* = rendimento do motor (%).



Exemplificando

Determinado conjunto motobomba será composto por motor elétrico e bomba hidráulica. Ele deverá recalcar a vazão de 12 L/s a determinado ponto 17 m acima do nível d'água do reservatório. As perdas de carga totais (tubulações de sucção e recalque) são de 2,2 m. Determine a potência necessária à bomba e ao motor, sabendo que seus rendimentos são 70 e 85%, respectivamente.

$$Pot = \frac{9,8 \times (Q) \times (H)}{\eta} = \frac{9,8 \times (0,012) \times (19,2)}{0,70} = 3,23kW (4,4cv) .$$

$$Pot^* = \frac{9,8 \times (Q) \times (H)}{\eta \times \eta^*} = \frac{9,8 \times (0,012) \times (19,2)}{0,70 \times 0,85} = 3,8kW (5,17cv) .$$

Durante o funcionamento da unidade, há possibilidade de ocorrência de um fenômeno conhecido como cavitação. Trata-se da criação (pressão de vapor) e destruição de microbolhas de ar (pressões maiores em certas regiões do escoamento). Esse fenômeno reduz o rendimento e causa danos às partes internas das bombas.



Pesquise mais

A cavitação é um fenômeno muito importante em unidades elevatórias, podendo comprometer a eficiência e a vida útil do sistema de bombeamento. O capítulo 5 da obra indicada a seguir trata do tema de cavitação com a devida profundidade.

PORTO, R. de M. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006, 540p.



Assimile

Determinados os diâmetros adequados às tubulações de recalque e sucção, deve-se calcular as perdas de carga de cada um desses trechos. A fórmula de Hazen-Williams pode ser empregada para esse fim.

O próximo dado a ser calculado é a altura total de elevação, parâmetro essencial no dimensionamento do conjunto motobomba.

De posse da altura e da vazão, deve-se escolher o modelo de bomba que atenda a tais critérios. Aplicam-se esses dados nas curvas características da bomba, determinando a medida do rotor, o NPSH requerido e o rendimento.

Após a obtenção desses dados, deve-se calcular a potência necessária à bomba e a potência do motor do conjunto.

Com isso, finalizamos nossa Seção 2.3, a qual teve desde uma abordagem mais prática até o cálculo de estação elevatória, fornecendo os conhecimentos necessários à resolução das questões relacionadas ao tema.

Sem medo de errar

Como se sabe, as estações elevatórias são unidades que transferem energia ao líquido. Seu dimensionamento é realizado em partes que se complementam e inter-relacionam. Uma de suas partes é o conjunto motobomba, a qual é composta por um equipamento que fornece energia mecânica, geralmente, um motor elétrico ou de combustão interna, e uma bomba hidráulica.

Sabendo da necessidade do pré-dimensionamento da unidade elevatória da ETA, a equipe lhe pediu que você a calculasse nas seguintes condições de operação:

Turno de trabalho e vazão: 18 h/dia e 110 m³/h, respectivamente.

Diferença geométrica: 20m.

Material do tubo e rendimento do motor elétrico: ferro fundido e 85%, respectivamente.

Comprimento da tubulação de recalque e sucção: 465 e 5,2, respectivamente.

Acessórios hidráulicos:

Quant.	Sucção	Le (m)	Quant.	Recalque	Le (m)
1	Válvula de pé com crivo	39,75	1	Válvula de retenção	8,36
1	Curva 90° R/D = 1,5	1,92	1	Registro de gaveta	0,7
			2	Curva 45°	1,56

Le: comprimento equivalente.

Pré-dimensionada a unidade, deverá ser preparado o relatório técnico com a análise de dois temas:

- Efeito do aumento da vazão no sistema. Exemplo: como seria se sua vazão aumentasse 100% ou reduzisse 50%?

- Efeito da inclusão de associações de tubulações na adutora. Exemplo: como seria se a adutora fosse uma associação em série ou em paralelo?

Sabendo que a unidade operará 18 h/dia, deve-se pré-dimensionar a tubulação de recalque utilizando a fórmula descrita na NBR 5626:

$$D = 1,34\sqrt[4]{X} \sqrt[4]{Q} = 1,34\sqrt[4]{\frac{18}{24}} \sqrt[4]{\left(\frac{110\text{m}^3/h}{3600\text{s/h}}\right)} = 0,211\text{m}.$$

Com base na tabela de medidas comerciais de tubo de ferro fundido:

Diâmetro econômico do recalque: 211,2 mm.

Diâmetro econômico da sucção: 263,0 mm.

$$\text{Perdas de carga} \rightarrow \Delta H = J \times L_{total} = 10,65 \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} \times D^{4,87}} \times \sum L_e + L_{linear}.$$

$$\Delta H_R = 10,65 \frac{0,03^{1,85}}{130^{1,85} \times 0,2112^{4,87}} \times (8,36 + 0,7 + 2 \times 1,56 + 465) = 1,85\text{m}.$$

$$\Delta H_S = 10,65 \frac{0,03^{1,85}}{130^{1,85} \times 0,263^{4,87}} \times (39,75 + 1,92 + 5,2) = 0,062\text{m}.$$

$$\text{Altura total de elevação: } H = H_g + \Delta H_R + \Delta H_S = 20 + 1,85 + 0,062 = 21,9\text{m}.$$

De posse da altura total de elevação e da vazão, podemos determinar a bomba e o rotor que deverão ser usados: a bomba BC-21 (Figura 2.6) será a bomba usada. Ao lançar os dados no gráfico H x Q, obtém-se o diâmetro do rotor adequado: 145 mm.

Aplicando a vazão necessária aos outros gráficos da curva, obtém-se o $NPSH_R$ e rendimento: 4,2 m e 64%, respectivamente.

Com esses dados em mãos, pode-se calcular a potência do motor elétrico que deverá ser acoplado à bomba:

$$Pot^* = \frac{9,8 \times Q \times H}{\eta \times \eta^*} = \frac{9,8 \times 0,03 \times 21,9}{0,64 \times 0,85} = 11,8 kW (16 cv).$$

Análise da influência da vazão e tubulação no sistema

A alteração da vazão mantém relação direta no diâmetro econômico da tubulação de recalque, pois caso não ocorra a alteração da medida do tubo, haveria o aumento ou a redução das perdas de carga. O incremento ou decréscimo da perda de carga faria com que o escoamento se tornasse mais ou menos turbulento, perceptível no valor do número de Reynolds.

Caso a alteração seja fosse determinada vazão maior e, conseqüentemente, aumentasse o diâmetro da tubulação de recalque, todo o sistema da estação elevatória seria impactado. Como se sabe, o diâmetro da tubulação de recalque é parâmetro condicionante de todos os demais. Isso implicaria em aumento do diâmetro da tubulação de sucção e, possivelmente, aumento do rotor da bomba hidráulica e potência necessária ao conjunto motobomba.

Caso a alteração de vazão seja a redução dela o sistema anterior pode ser utilizado apenas consumindo potência elétrica superior à necessária ao sistema dimensionado adequadamente para a vazão recalçada.

A possibilidade de incluir associações de tubulações na adutora pode ser analisada da seguinte forma:

- Associação em série: poderá empregar tubulações de diferentes diâmetros, comprimentos e rugosidades. As perdas de carga deverão ser somadas, sendo que seu aumento ou sua redução em relação à tubulação única são condicionados pelas resistências oferecidas pelas características citadas. A vazão total deverá passar por toda a extensão da adutora.

- Associação em paralelo: assim como a associação anterior, pode-se utilizar tubos de distintos diâmetros, comprimentos e rugosidades. Os diâmetros serão menores do que se fosse uma tubulação única, pois sua vazão será distribuída entre os condutos, segundo a resistência oferecida por cada um deles. As perdas de carga serão as mesmas que em um único conduto, pois são representadas pela diferença piezométrica entre os pontos inicial e final da tubulação.

O relatório que deverá ser entregue ao engenheiro-chefe com a "análise da

influência da vazão e tubulação no regime de escoamento sob pressão”, em nosso caso específico, será entregue ao professor, e deverá ser composto pela seguinte estrutura:

- Introdução: tratar de forma resumida da importância da vazão e da disposição da tubulação para o sistema em geral. Posteriormente, contextualizar a introdução citando as possíveis alterações do regime, incluindo a classificação segundo Reynolds, as perdas de carga e as consequências em uma possível unidade elevatória instalada no trecho.

- Análise descritiva: abordar as influências de forma específica, criar cenários possíveis e simular nas fórmulas matemáticas. Exemplo: para 10 L/s, teríamos escoamento laminar. No entanto, se a vazão for de 20 l/s teremos uma alteração no regime. Utilize os resultados obtidos nas equações para corroborar suas afirmações.

- Parecer final: apresentar a conclusão do relatório, tratando de forma resumida as possíveis influências verificadas nas suas análises.

Avançando na prática

Análise da influência da vazão e tubulação em estação elevatória

Descrição da situação-problema

Uma prática comum em sistema de armazenamento de água tratada é o emprego de reservatórios interligados. Sabe-se que algumas dessas interligações necessitam de estações elevatórias para que sejam viabilizadas.

Durante o dimensionamento de uma das estações elevatórias que serão empregadas no sistema que sua equipe está projetando, o engenheiro, que deveria lhe fornecer a vazão de projeto e a disposição da tubulação, não lhe envia os dados.

Faça a análise teórica da influência da alteração da vazão (aumento ou redução) e da tubulação (emprego de associação em série e/ou paralelo na adutora) no escoamento em geral e na unidade de elevação para justificar a importância desses dados no momento do dimensionamento da unidade elevatória.

Resolução da situação-problema

A alteração da vazão tem influência direta no diâmetro da tubulação econômica do recalque, pois, caso não ocorra a alteração da medida do tubo, haveria o aumento ou a redução das perdas de carga. O incremento ou decréscimo da perda faria com que o escoamento se tornasse mais ou menos turbulento, perceptível no valor do número de Reynolds.

Caso a alteração fosse para determinada vazão maior e, conseqüentemente, aumentasse o diâmetro da tubulação de recalque, todo o sistema da estação elevatória seria impactado. Como se sabe, o diâmetro da tubulação de recalque é parâmetro condicionante de todos os demais. Isso implicaria em aumento do diâmetro da tubulação de sucção e, possivelmente, aumento do rotor da bomba hidráulica e potência necessária ao conjunto motobomba.

Caso a alteração de vazão seja a redução desta, o sistema anterior pode ser utilizado apenas consumindo potência elétrica superior à necessária ao sistema dimensionado adequadamente para a vazão recalçada.

A possibilidade de incluir associações de tubulações na adutora pode ser analisada da seguinte forma:

- Associação em série: poderá empregar tubulações de diferentes diâmetros, comprimentos e rugosidades. As perdas de carga deverão ser somadas, sendo que seu aumento ou sua redução em relação à tubulação única são condicionados pelas resistências oferecidas pelas características citadas. A vazão total deverá passar por toda a extensão da adutora.

- Associação em paralelo: assim como a associação anterior, pode-se utilizar tubos de distintos diâmetros, comprimentos e rugosidades. Os diâmetros serão menores do que se fosse uma tubulação única, pois sua vazão será distribuída entre os condutos, segundo a resistência oferecida por cada um deles. As perdas de carga serão as mesmas que em um único conduto, pois são representadas pela diferença piezométrica entre os pontos inicial e final da tubulação.

Faça valer a pena

1. A equação de Hazen-Williams foi desenvolvida para calcular as perdas de carga de determinado trecho de forma mais prática, com base em dados experimentais. O comprimento total que deve ser multiplicado pelo valor obtido nessa equação deve ser calculado com a somatória de todos os comprimentos equivalentes referentes aos acessórios hidráulicos e ao comprimento linear.

Determinada tubulação de PVC com diâmetro de 10 cm e comprimento de 27 m tem uma válvula de gaveta e dois cotovelos de 90°. Sabendo que essa tubulação tem vazão de 8 L/s e utilizando a equação de Hazen-Williams, calcule a perda de carga total desse trecho e marque a alternativa que a representa corretamente.

- a) 3,6 m.
- b) 0,36 m.
- c) $9,8 \times 10^{-3}$ m.
- d) $9,7 \times 10^{-4}$ m.
- e) 36,6 m.

2. As estações elevatórias são unidades de transferência de energia ao líquido. Em geral, sua função é adicionar energia ao líquido para que ele possa transpor diferenças geométricas situadas entre dois pontos do trajeto.

Com base no texto e em seus conhecimentos, analise as seguintes afirmações:

I. As estações elevatórias são compostas por três partes distintas: bomba, motor e válvula.

II. As estações elevatórias têm como objetivo principal reduzir a energia contida no líquido, pois demasiada energia pode danificar a tubulação.

III. O dimensionamento de estação elevatória deve ser iniciado pelo motor, pois ele será a parte mais importante da unidade.

IV. A tubulação de recalque deverá ser uma medida comercial maior do que a tubulação de sucção.

V. O diâmetro econômico é a medida mais apropriada para a tubulação de recalque, sendo esse o primeiro fator a ser dimensionado.

Após essa análise, marque, entre as alternativas seguintes, aquela que agrupa todas as afirmações verdadeiras.

- a) I e II.
- b) Apenas I.
- c) Apenas V.
- d) II, III, IV e V.
- e) I, II, III, IV e V.

3. A perda de carga unitária é resultante da equação de Hazen-Williams. O significado desse resultado é quanto de energia reduz a cada metro de tubulação percorrida. Por isso, a unidade metro/metro.

Sabendo o que significa a unidade de perda de carga unitária, calcule quanto de energia será perdida a cada metro de tubulação nas seguintes condições:

Vazão: 6 l/s.

Diâmetro: 20 cm.

Material da tubulação: PVC ($C = 150$).

Marque a alternativa correta.

- a) 0,0019 m.
- b) $1,8 \times 10^{-5}$ m.
- c) $1,2 \times 10^{-9}$ m.
- d) 0,0018 m.
- e) $1,9 \times 10^{-4}$ m.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5626. **Instalação predial de água fria**. Rio de Janeiro, set. 1998. 41p.

AZEVEDO NETTO, J. M.; ALVAREZ, G. A. **Manual de Hidráulica**. 6. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1973, 333p.

Curvas da bomba centrífuga monoestágio BC-21 (Schneider bombas). Disponível em: <<http://www.schneider.ind.br/mais/recursosdownloads/biblioteca/?n=6953>>. Acesso em: 6 jan. 2017.

BOMBAS desplazamiento positivo. Lady Engineer, 2016. Vídeo do YouTube. 2016. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=TOXbONQHz0k&t=22s>>. Acesso em: 6 jan. 2017.

EXERCÍCIO - Enade - Conduitos em série ligando 2 reservatórios. Marllus Gustavo Neves, 2014. Vídeo do YouTube. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=whRuU4yqGpc>>. Acesso em: 6 jan. 2017.

FUNCIONAMIENTO de bombas centrífugas. Roberto Torres, 2015. Vídeo do Youtube. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=UeRLV8qnBz8>>. Acesso em: 6 jan. 2017.

PORTO, R. de **M. Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006, 540p.

Regimes de escoamento em canais

Convite ao estudo

Esta é a Unidade 3 da disciplina de Fundamentos de hidráulica e hidrometria, a qual sucede a duas outras dedicadas ao escoamento em condutos forçados. A Unidade 1 introduziu o tema, apresentando os escoamentos e o conceito de perda de carga nos escoamentos em tubulação. De forma sequencial, a Unidade 2 aprofundou esses tópicos, além de discorrer sobre reservatórios e estações elevatórias. Os temas tratados por essas duas unidades explicaram, de forma ampla, os temas relacionados a esses escoamentos.

A Unidade 3 trata de escoamentos livres, os quais têm como conduto, canais e tubulações parcialmente cheias. O intuito desta unidade é relacionar todas as características importantes sobre o escoamento livre, assim como fizeram as duas unidades anteriores com relação ao escoamento forçado. Isso permitirá o desenvolvimento da competência do dimensionamento de canais abertos e seções circulares parcialmente cheias.

A Seção 3.1 abordará os fundamentos do escoamento livre, assim como os elementos geométricos e a introdução do dimensionamento desses condutos. A Seção 3.2 tratará da equação da conservação de energia aplicada aos canais e também a equação da energia específica. Por fim, a Seção 3.3 fechará a unidade, discorrendo sobre as seções de mínimo perímetro molhado e elementos hidráulicos das seções circulares.

Para tratar o tema de forma mais aplicada, continuaremos utilizando a situação hipotética na qual você é o engenheiro responsável pela área hidráulica de uma equipe de projetos. Sua equipe recebeu dois novos projetos a serem desenvolvidos: o dimensionamento de canais de condução de vinhaça (água residuária da produção de etanol) para fertirrigação da área agrícola e o projeto de rede coletora de esgotos da

pequena cidade na qual vivem os trabalhadores desta usina beneficiadora de cana-de-açúcar. Durante a reunião de *brainstorming*, você foi questionado sobre as seguintes questões:

- Quais são os tipos de escoamento em canais e os principais elementos geométricos dessa forma de escoamento?

- A distribuição da velocidade em canais ocorre da mesma forma que nas tubulações?

- Qual metodologia você utilizaria para dimensionar determinado canal em regime permanente e uniforme?

- Nossos projetos são pautados em eficiência. Você dimensiona canais com base na seção hidráulica de máxima eficiência?

- Você acha importante utilizar o mínimo perímetro molhado para o dimensionamento? Por quê?

Além disso, lhe solicitaram um relatório técnico sobre a influência das características geométricas dos canais abertos e circulares parcialmente cheios no regime de escoamento.

Sabendo das necessidades da sua equipe de trabalho e por ser um indivíduo curioso com relação aos temas de sua profissão, você deve estar aguardando ansiosamente para dominar o conhecimento referente a essas questões, não é verdade?

A Unidade 3 possibilitará a você tal conhecimento. Pronto para se aprofundar no tema de hidráulica de escoamento livre?

Seção 3.1

Elementos geométricos dos canais

Diálogo aberto

Os escoamentos em canais têm características distintas daquelas que ocorrem em tubulações sob pressão. Diversos fatores são alterados quando se passa de um tubo regular, cilíndrico ou submetido à pressão superior à atmosférica para um canal aberto.

Sabendo disso, após ser informado que participaria desses novos projetos – dimensionamento de canais e rede coletora de esgotos – você se perguntou sobre sua capacidade de integrar essa equipe, haja vista sua experiência em hidráulica de tubulações. No entanto, como você se julga um engenheiro arrojado, capaz de se adaptar e desenvolver projetos desafiadores, resolveu assumir a proposta. Ao iniciar o trabalho, você deparou com alguns questionamentos:

- Quais são os tipos de regime e elementos geométricos desse tipo de escoamento?
- Como é a distribuição da velocidade em escoamento livre?
- Haverá uma seção de máxima eficiência, pensando de forma análoga ao diâmetro econômico de tubulações?

O conteúdo que será abordado nesta seção lhe proporcionará o conhecimento básico ao desenvolvimento do tema dos escoamentos em canais. Assim, sugiro que a estude com afinco, pois esse conteúdo representa conceitos indispensáveis às demais partes desta unidade.

Animado para conhecer mais uma interessante área da hidráulica?

Não pode faltar

Há algumas diferenças entre o tema abordado nas Unidades 1 e 2, sobre escoamento forçado, e o conteúdo tratado pela Unidade 3, sobre escoamento livre. As principais delas são a diferença de pressão, pois no conduto forçado ela sempre é

superior à atmosférica, e o fato de ocorrer em seção completa, diferentemente dos canais e das seções circulares de escoamento livre. Por isso, esta unidade iniciará um tema com abordagens distintas, no entanto, com bastantes fatores análogos.

Segundo Porto (2006), os canais podem ser classificados em naturais e artificiais, além de prismáticos e não prismáticos.

Os canais naturais são aqueles que ocorrem naturalmente em nosso meio, como é caso dos corpos hídricos. De forma oposta, os canais artificiais, de seção aberta ou fechada, são aqueles construídos pelo homem, categoria esta que inclui as redes coletoras de esgoto e canais de irrigação.

Os canais prismáticos, por sua vez, têm seção reta e inclinação de fundo constante ao longo do comprimento deste. Quando não atendem a essas condições, são chamados de não prismáticos.

Os escoamentos em canais estão sujeitos às variações no tempo e no espaço, o que significa que suas características podem variar em determinado ponto após um período de tempo (variação no tempo) e entre dois pontos distintos medidos ao mesmo período (variação no espaço).

Com base na variação em **função do tempo**, pode-se classificar os escoamentos em permanente e não permanente, ou variáveis (PORTO, 2006).

Escoamento permanente: escolhido determinado ponto do canal, apesar da passagem do tempo, suas características (na qual a velocidade é a principal) não se alteram, ou seja, as características do escoamento não se alteram com o passar do tempo e determinado ponto fixo.

Escoamento não permanente: determinado um ponto específico, suas características se alteram com o tempo. Não há constância em sua vazão. Um exemplo são as passagens de ondas de cheia por um canal. (PORTO, 2006)

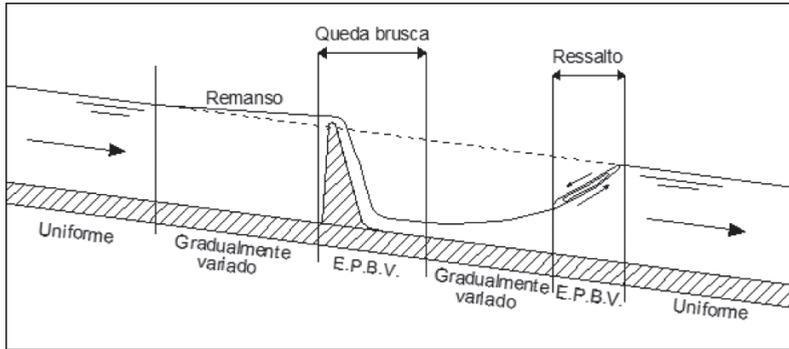
Ainda com base em Porto (2006), quando se toma como parâmetro classificatório a variação em **função do espaço**, os escoamentos podem ser classificados em uniforme e não uniforme, ou variado.

Escoamento uniforme: as diferentes velocidades das partículas devem ser paralelas e constantes ao longo do escoamento. Nesse caso, a linha d'água coincidirá com a de fundo (PORTO, 2006).

Escoamento variado: as trajetórias não são paralelas e, conseqüentemente, a linha d'água não é paralela à de fundo (PORTO, 2006).

Esta última categoria de escoamento ainda tem a subdivisão em função da rapidez com que ocorre essa variação, sendo classificada em gradualmente ou rapidamente variada.

Figura 3.1 | Tipos de escoamentos



E.P.B.V. = escoamento permanente brusco variado

Fonte: adaptada de Porto (2006, p. 224).

Ainda com base nas possíveis classificações do escoamento, assim como nos condutos forçados, há a classificação do regime em laminar ou turbulento. O parâmetro utilizado continua sendo o número de Reynolds, no entanto, com algumas alterações na fórmula e nos valores limites.

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} \rightarrow \frac{\rho \times v \times R_h}{\mu}$$

O diâmetro utilizado para esse cálculo em escoamentos forçados é substituído pelo raio hidráulico, que será apresentado ainda nesta seção.

Os valores limites da classificação para canais são os seguintes:

- Regime laminar: $Re < 500$.
- Regime de transição: $500 < Re < 2000$.
- Regime turbulento: $Re > 2000$.

Para escoamento livre, há outro número adimensional utilizado para classificá-los: o número de Froude.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \times H_m}}$$

Em que: v = velocidade média.

g = gravidade.

H_m = altura hidráulica.

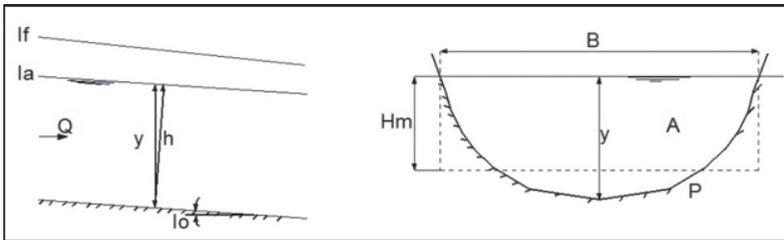
O número de Froude relaciona as forças inerciais com forças gravitacionais, podendo ser tratado de forma análoga ao número de Reynolds:

- Escoamento subcrítico ou fluvial: $Fr < 1$ (regime laminar).
- Escoamento crítico: $Fr = 1$ (regime de transição).
- Escoamento supercrítico ou torrencial: $Fr > 1$ (regime turbulento).

Elementos geométricos dos canais

Segundo Porto (2006), uma série de parâmetros geométricos é necessária para a descrição da seção de canais. Com base no autor e na Figura 3.2, pode-se descrevê-los da seguinte forma:

Figura 3.2 | Elementos geométricos de determinada seção



Fonte: adaptada de Porto (2006, p. 222).

- Altura da lâmina d'água (y): distância vertical da superfície livre até o ponto mais baixo da seção.

- Altura de escoamento (h): distância perpendicular superfície livre até o fundo do canal.

Em canais de pequena declividade de fundo, essas duas grandezas citadas anteriormente podem ser consideradas equivalentes. (BAPTISTA; COELHO, 2010)

- Área molhada (A): área da seção ocupada pelo líquido ao escoar.

- Perímetro molhado (P): somatória de todos os comprimentos do canal em contato com água, ou seja, a medida da superfície livre não é contabilizada.

- Largura de topo (B): medida da largura da superfície livre do escoamento.

- Altura hidráulica ou média (H_m): relação da área molhada (A) e a largura de topo (B). É a área de um retângulo imaginário de mesma área que a molhada e base de largura de topo.

$$H_m = \frac{A}{B}$$

- Raio hidráulico (Rh): relação da área molhada (A) e perímetro molhado (P).

$$R_h = \frac{A}{P}$$

- Declividade de fundo (I_o): declividade longitudinal do canal.

- Declividade da linha d'água ou piezométrica (I_a): declividade da superfície livre, que, em geral, em canais, é coincidente com a linha piezométrica.

- Declividade da linha de energia (I_f): declividade que representa a variação da energia do escoamento no sentido do fluxo.

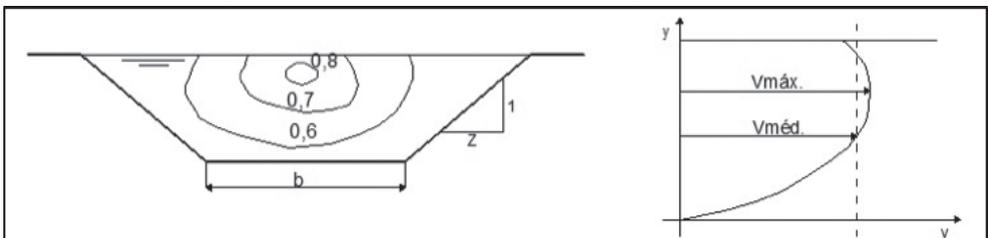
Por conta das características geométricas e influências ambientais, haja vista seu contato com a atmosfera, a distribuição da velocidade do escoamento apresenta comportamento peculiar.

Distribuição da velocidade na seção transversal

Apesar de tratar-se analiticamente da velocidade média do escoamento, deve-se ater ao fator que, diferentemente dos condutos forçados, os canais não têm distribuição linear da velocidade na seção. Isso ocorre pelo fato de ser um escoamento que tem contato direto com a atmosfera, sofrendo influência das condições climáticas e atrito com o ar. Outro ponto que contribui com isso são as irregularidades do canal, no caso de canais naturais.

Assim, considera-se que a velocidade aumenta desde a superfície até determinada profundidade, no entanto, a partir desse ponto, há a redução dessa profundidade. Isso proporciona uma frente vertical com tendência parabólica. A Figura 3.3 apresenta essa distribuição irregular.

Figura 3.3 | Distribuição da velocidade de determinada seção



Fonte: adaptada de Porto (2006, p. 222).

Como se pode notar na Figura 3.3, a velocidade máxima se encontra pouco abaixo da superfície livre, justamente pelo atrito com o ar e, no centro da seção, pelo atrito com a lateral do canal. A velocidade média pode ser obtida de forma prática pela média entre a velocidade a 20% e 80% da profundidade total, ou ainda, como a velocidade aproximada de 40% da profundidade total a partir do fundo. (PORTO, 2006)

Ainda com base no autor, vale ressaltar que pela não uniformidade da distribuição da velocidade, em alguns casos, são necessários os coeficientes de correção da energia e de quantidade de movimento: coeficientes de Coriolis e Boussinesq, respectivamente.



Pesquise mais

A distribuição da velocidade em escoamentos em canais tem características interessantes, que devem ser entendidas com mais detalhes que esse texto propõe. O Capítulo 7 de ambas as indicações a seguir tratam do assunto de forma mais ampla, sendo excelentes fontes de estudo.

BAPTISTA, B. B.; COELHO, M. M. L. P. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2010, 480 p.

PORTO, R. de M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006, 540p.

Dimensionamento hidráulico do escoamento permanente e uniforme

Sabendo de todas as diferenças entre o escoamento forçado e o livre, pode-se imaginar que o dimensionamento do conduto segue caminhos distintos.

A equação de Chézy ($v = C\sqrt{R_h \times I_0}$) é uma das bases para o desenvolvimento do dimensionamento. Com a aplicação desta fórmula na equação da vazão ($Q = v \times A$), tem-se: $Q = C \times A\sqrt{R_h \times I_0}$.

Para determinar o coeficiente C, Manning propôs a seguinte equação: $C = \frac{R_h^{\frac{1}{6}}}{n}$.

A junção destas duas fórmulas, vazão por Chézy e equação de Manning, resultou na equação genérica para dimensionamento de canais (Porto, 2006).

$$\frac{n \times Q}{\sqrt{I_0}} = A \times R_h^{\frac{2}{3}}$$

Em que: n = coeficiente relacionado ao revestimento do canal (Segundo o Quadro 3.1).

Q = vazão.

I_o = inclinação de fundo.

A = área molhada.

R_h = raio hidráulico.

Após determinada a forma dos canais, a equação geral tomará forma específica.



Pesquise mais

O procedimento matemático de dedução das fórmulas específicas de dimensionamento de canais pode ser estudado em diversas literaturas.

A seguir há duas dessas obras, sendo que a primeira referência trata do tema em seu capítulo 8. Este apresenta, de forma bastante detalhada, a explicação matemática para obtenção das equações específicas das distintas formas de canais.

PORTO, R. de M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006, 540p.

O livro a seguir também aborda o tema de forma semelhante à primeira indicação, porém, em seu capítulo 9.

BAPTISTA, B. B.; COELHO, M. M. L. P. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2010, 480 p.

Para canais de seção trapezoidal, triangular, retangular ou quadrada, as fórmulas utilizadas são as seguintes:

- Razão de aspecto: $m = \frac{b}{y}$.

- Inclinação do talude: $Z = \cot g \alpha = \frac{xH}{xV}$, em que xH é a medida proporcional na horizontal e xV é a medida proporcional na vertical.

- Equação de Manning compacta: $y = \frac{M}{K}$, em que y é a altura do escoamento,

M é o coeficiente dinâmico ($M = (\frac{nQ}{\sqrt{I_o}})^{\frac{3}{8}}$), K é o coeficiente de forma, segundo O Quadro 3.2.

Vale ressaltar que para $Z = 0$ e $m = 0$ têm-se valores de coeficiente de forma (K) para seção retangular e triangular, respectivamente (PORTO, 2006).



Exemplificando

Determinado canal trapezoidal com taludes 2H:1V, declividade de fundo $I_0 = 0,001 \text{ m/m}$, revestimento dos taludes e fundo em alvenaria de pedra argamassada em condições regulares ($n = 0,025$) conduz a vazão $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$. Utilize uma razão de aspecto $m = b/y = 4$. Calcule a velocidade média.

$$Z = \frac{xH}{xV} = \frac{2}{1} = 2$$

Utiliza-se do Quadro 3.2; para $Z=2$ e $m=4$ o valor do coeficiente de forma (K) é 1,796.

Coef. dinâmico $\rightarrow M = \left(\frac{n \times Q}{\sqrt{I_0}}\right)^{\frac{3}{8}} = \left(\frac{0,025 \times 6}{\sqrt{0,001}}\right)^{\frac{3}{8}} = 1,79.$

Manning $\rightarrow y = \frac{M}{K} = \frac{1,79}{1,796} = 0,996 \text{ m}.$

$m = \frac{b}{y} = 4 \therefore b = 0,996 \times 4 = 3,98 \text{ m}.$

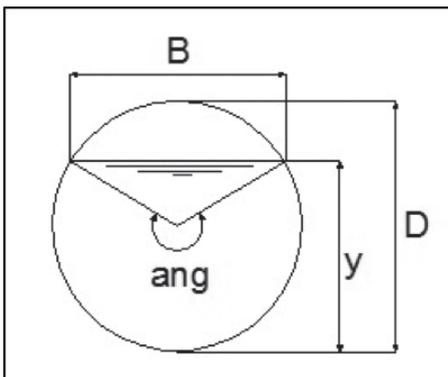
$B = (2 \times Z \times y) + b = (2 \times 2 \times 0,996) + 3,98 = 7,96 \text{ m}.$

$A = \frac{(B+b)}{2} \times y = \frac{(7,96 + 3,98)}{2} \times 0,996 = 5,95 \text{ m}^2.$

$Q = v \times A \therefore v = \frac{Q}{A} = \frac{6}{5,91} = 1,02 \text{ m/s}.$

Para seções circulares parcialmente cheias (Figura 3.4), o procedimento de dimensionamento é semelhante, no entanto, há fórmulas mais complexas que caracterizam esta forma geométrica.

Figura 3.4 | Principais elementos geométricos de seção circular parcialmente cheia



$$ang(\theta) = 2 \arccos\left(1 - 2 \frac{y}{D}\right).$$

$$A = D^2 \frac{(\theta - \text{sen}\theta)}{8} \quad B = D \times \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right).$$

$$y = D \times \frac{(1 - \cos(\frac{\theta}{2}))}{2} \quad R_h = \frac{D \times (1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta})}{4}.$$

$$P = \frac{\theta D}{2}.$$

Fonte: adaptada de Porto (2006, p. 250).

Deve-se ressaltar que nas fórmulas da área molhada e raio hidráulico supracitados devem ser introduzidas as medidas dos ângulos em radianos.



Refleta

Sabendo que as demais seções não têm sua altura d'água vinculada a ângulo, por que você acha que a seção circular tem?

A elevação da altura d'água, caso esteja abaixo ou acima do meio da seção, condiciona de forma diferente a área molhada desta?

Definidos os elementos geométricos da seção circular, pode-se passar ao dimensionamento propriamente dito.

A equação de Manning compacta é bastante semelhante à equação das outras seções, substituindo-se a altura da lâmina d'água (y) pelo diâmetro (D): $D = \frac{M}{K_1}$.

Como o coeficiente de forma é distinto, denomina-se K_1 (Segundo o Quadro 3.3).

O coeficiente dinâmico (M) continua representando a mesma fórmula: ($M = (\frac{nQ}{\sqrt{I_0}})^{\frac{3}{8}}$).



Exemplificando

Determinada galeria de águas pluviais é constituída de concreto ($n=0,013$), tem diâmetro de 90 cm e declividade de fundo $l_0 = 0,0035\text{m/m}$. Sabendo que a galeria conduz a vazão de 850 L/s em regime permanente e uniforme, pode-se determinar a altura da lâmina d'água.

$$M = \left(\frac{n \times Q}{\sqrt{I_0}} \right)^{\frac{3}{8}} = \left(\frac{0,013 \times 0,865}{\sqrt{0,0035}} \right)^{\frac{3}{8}} = 0,5365$$

$$D = \frac{M}{K_1} \therefore K_1 = \frac{M}{D} = \frac{0,5365}{0,9} = 0,596$$

Utilizando o Quadro 3.3, para $K_1 = 0,596$, altura relativa ($\frac{y}{D}$) é 0,68.

$$\frac{y}{D} = 0,68 \therefore y = 0,68 \times 0,9 = 0,61\text{m}$$

Seção hidráulica de máxima eficiência

O engenheiro responsável pelo projeto de canais deve determinar, primeiramente, a forma do canal a ser realizada e, em seguida, efetuar seu dimensionamento. Há diversas resoluções para a fórmula de Manning, utilizada no dimensionamento, devendo o projetista determinar a que mais lhe convém com base na natureza do ambiente em que o canal será instalado. Porto (2006) descreve a lógica da máxima vazão e, dessa forma, máxima eficiência, utilizando a fórmula geral do dimensionamento: $\frac{nQ}{\sqrt{I_0}} = (A \times R_h)^{\frac{2}{3}}$. Ele observa que para declividade de fundo e rugosidade fixas, a máxima vazão ocorrerá quando houver o máximo raio hidráulico. Para que isso aconteça, o perímetro molhado deve ser o mínimo possível, mantendo, é claro, a compatibilidade com a área.

Com essa observação, pode-se afirmar que a seção de mínimo perímetro molhado deve ser adotada sempre que possível. Sobre o ponto de vista prático, nem sempre é permitido projetar o canal de mínimo perímetro molhado, porém deve ser o fato almejado.

Para determinada área fixa, a forma da seção que tem o menor perímetro molhado é a circular. No entanto, a construção de canais dessa forma é de difícil aplicação, exceto se for pré-fabricada. (PORTO, 2006)



Assimile

O escoamento em condutos livres pode ser classificado segundo sua variação em função do tempo e do espaço.

Função do tempo: escoamentos permanentes e não permanentes, ou variáveis.

Função do espaço: escoamento uniforme e não uniforme, ou variado, sendo este último subdividido em gradualmente ou bruscamente variado.

Os canais têm elementos geométricos que viabilizam seu estudo, sendo os principais: largura de topo (B), altura do escoamento (h), altura d'água (y), raio hidráulico (R_h), perímetro molhado (P), área molhada (A), declividade de fundo (I_0), da linha d'água (I_a) e de energia (I_f).

O dimensionamento hidráulico desses condutos ocorre pela fórmula geral ($\frac{nQ}{\sqrt{I_0}} = A \times R_h^{\frac{2}{3}}$), que resulta na fórmula Manning compacta para cada forma

de seção. Emprega-se nessa prática algumas tabelas com coeficientes de forma (K e K_f), além de rugosidade (n).

A seção de máxima eficiência sempre é aquela que tem menor perímetro molhado. A seção circular representa a forma de menor perímetro molhado para uma mesma área, no entanto, pouco aplicável por fatores construtivos.

Assim, a seção introdutória dos escoamentos livres se conclui. Agora que já conhece a teoria básica desse tipo de escoamento, você tem capacidade de efetuar, de forma técnica, as análises básicas do tema, resolvendo questões do seu cotidiano.

Quadro 3.1 | Coeficientes n referentes ao revestimento do conduto

Natureza das paredes	Condições			
	Muito boas	Boas	Regulares	Más
Tubos de ferro fundido sem revestimento	0,012	0,013	0,014	0,015
Tubos de ferro fundido com com revestimento de alcatrão	0,011	0,012*	0,013*	-
Tubos de ferro galvanizado	0,013	0,014	0,015	0,017
Tubos de bronze ou de vidro	0,009	0,01	0,011	0,013
Condutos de barro vitrificado (de esgotos)	0,011	0,013*	0,015	0,017
Condutos de barro (de drenagem)	0,011	0,012*	0,014*	0,017
Alvenaria de tijolos com argamassa de cimento: condutos de esgoto	0,012	0,013	0,015*	0,017
Superfície de cimento alisado	0,01	0,011	0,012	0,013
Superfície de argamassa de cimento	0,011	0,012	0,013*	0,015
Tubos de concreto	0,012	0,013	0,015	0,016
Condutos e aduelas de madeira	0,01	0,011	0,012	0,013
Calhas de prancha de madeira aplainada	0,01	0,012*	0,013	0,014
Calhas de prancha de madeira não aplainada	0,011	0,013	0,014	0,015
Calhas de prancha de madeira com pranchões	0,012	0,015*	0,016	-
Canais com revestimento de concreto	0,012	0,014*	0,016	0,018
Alvenaria de pedra argamassa	0,017	0,02	0,025	0,03
Alvenaria de pedra seca	0,025	0,033	0,033	0,035
Alvenaria de pedra aparelhada	0,013	0,014	0,015	0,017
Calhas metálicas lisas (semicirculares)	0,011	0,012	0,013	0,015
Calhas metálicas corrugadas	0,023	0,025	0,028	0,03

Canais de terra, retilíneos e uniformes	0,017	0,02	0,023	0,025
Canais abertos em rocha, lisos e uniformes	0,025	0,03	0,033*	0,035
Canais abertos em rocha, irregulares, ou de paredes de pedra irregulares e mal arrumadas	0,035	0,04	0,045	-
Canais dragados	0,025	0,028	0,03	0,033
Canais curvilíneos e lamosos	0,023	0,025*	0,028	0,03
Canais com leito pedregoso e vegetação aos taludes	0,025	0,03	0,035*	0,04
Canais com fundo de terra e taludes empedrados	0,028	0,03	0,033	0,035

ARROIOS E RIOS

1- Limpos, retilíneos e uniformes	0,025	0,028	0,03	0,033
2- Como em 1, porém com vegetação e pedras	0,03	0,033	0,035	0,04
3- Com meandros, bancos e poços pouco profundos, limpos	0,035	0,04	0,045	0,05
4. Como em 3, águas baixas, declividade fraca	0,04	0,045	0,05	0,055
5. Como em 3, com vegetação e pedras	0,033	0,035	0,04	0,045
6. Como em 4, com pedras	0,045	0,05	0,055	0,06
7. Com margens espraiadas, pouca vegetação	0,05	0,06	0,07	0,08
8. Com margens espraiadas, muita vegetação	0,075	0,1	0,125	0,15

*Valores aconselhados para projetos

Fonte: adaptada de Porto (2006).

Quadro 3.2 | Coeficiente de forma K

$m = b/y$	$Z = 0,0$	$Z = 0,50$	$Z = 1,0$	$Z = 1,25$	$Z = 1,5$	$Z = 1,75$	$Z = 2,0$
0	0	0,53	0,771	0,859	0,935	1,001	1,061
0,2	0,3	0,64	0,85	0,929	0,998	1,058	1,113
0,4	0,453	0,735	0,921	0,993	1,056	1,112	1,163
0,6	0,572	0,818	0,986	1,052	1,11	1,163	1,211
0,8	0,672	0,893	1,046	1,107	1,162	1,211	1,256
1	0,76	0,961	1,103	1,159	1,21	1,257	1,299
1,2	0,838	1,023	1,155	1,209	1,257	1,3	1,341
1,4	0,909	1,082	1,205	1,255	1,301	1,342	1,38
1,6	0,974	1,136	1,253	1,3	1,343	1,382	1,419
1,8	1,034	1,082	1,298	1,342	1,383	1,421	1,455

2	1,091	1,236	1,34	1,383	1,422	1,458	1,491
2,2	1,143	1,282	1,382	1,422	1,459	1,494	1,526
2,4	1,193	1,326	1,421	1,46	1,495	1,528	1,559
2,6	1,241	1,368	1,459	1,496	1,53	1,562	1,592
2,8	1,286	1,408	1,495	1,531	1,564	1,595	1,623
3	1,329	1,446	1,531	1,565	1,597	1,626	1,654
3,2	1,37	1,484	1,565	1,598	1,629	1,657	1,684
3,4	1,41	1,519	1,598	1,63	1,66	1,687	1,713
3,6	1,448	1,554	1,63	1,661	1,69	1,716	1,741
3,8	1,484	1,588	1,661	1,691	1,719	1,745	1,769
4	1,52	1,62	1,692	1,721	1,748	1,773	1,796
4,2	1,554	1,652	1,721	1,75	1,776	1,8	1,823
4,4	1,587	1,682	1,75	1,777	1,803	1,826	1,849
4,6	1,619	1,712	1,778	1,805	1,829	1,852	1,874
4,8	1,651	1,741	1,805	1,831	1,855	1,878	1,899
5	1,681	1,77	1,832	1,858	1,881	1,903	1,923
5,2	1,711	1,797	1,858	1,883	1,906	1,927	1,947
5,4	1,74	1,824	1,884	1,908	1,93	1,951	1,971
5,6	1,768	1,851	1,909	1,933	1,954	1,975	1,994
5,8	1,795	1,876	1,933	1,957	1,978	1,998	2,017
6	1,822	1,902	1,958	1,98	2,001	2,021	2,039
6,2	1,848	1,926	1,981	2,004	2,024	2,043	2,061
6,4	1,874	1,951	2,004	2,026	2,046	2,065	2,083
6,6	1,899	1,975	2,027	2,049	2,068	2,086	2,104
6,8	1,924	1,998	2,05	2,071	2,09	2,108	2,125
7	1,948	2,021	2,072	2,092	2,111	2,129	2,145
7,2	1,972	2,043	2,093	2,114	2,132	2,149	2,166
7,4	1,995	2,066	2,115	2,134	2,153	2,17	2,186
7,6	2,018	2,087	2,136	2,155	2,173	2,19	2,205
7,8	2,041	2,109	2,156	2,175	2,193	2,209	2,225
8	2,063	2,13	2,177	2,195	2,213	2,229	2,244
8,2	2,084	2,151	2,197	2,215	2,232	2,248	2,263

Fonte: Porto (2006, p. 268).

Quadro 3.2 | Coeficiente de forma K (continuação)

8,4	2,106	2,171	2,216	2,235	2,251	2,267	2,282
8,6	2,127	2,191	2,236	2,254	2,27	2,285	2,3
8,8	2,148	2,211	2,255	2,273	2,289	2,304	2,318
9	2,168	2,231	2,274	2,291	2,307	2,322	2,336
9,2	2,188	2,25	2,293	2,31	2,325	2,34	2,354
9,4	2,208	2,269	2,311	2,328	2,343	2,358	2,372
9,6	2,227	2,288	2,329	2,346	2,361	2,375	2,389
9,8	2,247	2,306	2,347	2,364	2,379	2,393	2,406
10	2,266	2,325	2,365	2,381	2,396	2,41	2,423
10,2	2,284	2,343	2,383	2,399	2,413	2,427	2,44
10,4	2,303	2,36	2,4	2,416	2,43	2,444	2,456
10,6	2,321	2,378	2,417	2,433	2,447	2,46	2,473
10,8	2,339	2,395	2,434	2,449	2,464	2,477	2,489
11	2,357	2,413	2,451	2,466	2,48	2,493	2,505
11,2	2,375	2,43	2,467	2,482	2,496	2,509	2,521
11,4	2,392	2,446	2,484	2,499	2,512	2,525	2,537
11,6	2,409	2,463	2,5	2,515	2,528	2,541	2,552
11,8	2,426	2,48	2,516	2,531	2,544	2,556	2,568
12	2,443	2,496	2,532	2,546	2,559	2,572	2,583
12,2	2,46	2,512	2,548	2,562	2,575	2,587	2,598
12,4	4,476	2,528	2,563	2,577	2,59	2,602	2,613

Fonte: Porto (2006, p. 268).

Quadro 3.3 | Coeficientes de forma K_1 , referentes à seção circular

y/D	K_1	y/D	K_1	y/D	K_1
0,01	0,024	0,34	0,383	0,67	0,024
0,02	0,042	0,35	0,391	0,68	0,042
0,03	0,058	0,36	0,399	0,69	0,058
0,04	0,073	0,37	0,407	0,7	0,073
0,05	0,087	0,38	0,415	0,71	0,087
0,06	0,101	0,39	0,422	0,72	0,101
0,07	0,114	0,4	0,43	0,73	0,114
0,08	0,127	0,41	0,437	0,74	0,127
0,09	0,139	0,42	0,444	0,75	0,139
0,1	0,151	0,43	0,451	0,76	0,151
0,11	0,163	0,44	0,458	0,77	0,163
0,12	0,175	0,45	0,465	0,78	0,175

0,13	0,186	0,46	0,472	0,79	0,186
0,14	0,197	0,47	0,479	0,8	0,64
0,15	0,208	0,48	0,485	0,81	0,643
0,16	0,218	0,49	0,492	0,82	0,646
0,17	0,229	0,5	0,498	0,83	0,649
0,18	0,239	0,51	0,504	0,84	0,651
0,19	0,249	0,52	0,511	0,85	0,653
0,2	0,259	0,53	0,517	0,86	0,655
0,21	0,269	0,54	0,523	0,87	0,657
0,22	0,279	0,55	0,528	0,88	0,659
0,23	0,288	0,56	0,534	0,89	0,66
0,24	0,297	0,57	0,54	0,9	0,661
0,25	0,306	0,58	0,546	0,91	0,662
0,26	0,316	0,59	0,551	0,92	0,663
0,27	0,324	0,6	0,556	0,93	0,664
0,28	0,333	0,61	0,562	0,94	0,664
0,29	0,342	0,62	0,567	0,95	0,664
0,3	0,35	0,63	0,572	0,96	0,663
0,31	0,359	0,64	0,577	0,97	0,661
0,32	0,367	0,65	0,582	0,98	0,659
0,33	0,375	0,66	0,586	0,99	0,656

Fonte: Porto (2006, p. 253).

Sem medo de errar

Os escoamentos em canais têm características distintas daqueles que ocorrem em tubulações sob pressão. Diversos fatores são alterados quando se passa de um tubo regular, cilíndrico e de pressão maior que atmosférica para um canal aberto.

Sabendo disso, após ser informado que participaria desses novos projetos – dimensionamento de canais e rede coletora de esgotos – você se perguntou sobre sua capacidade de integrar essa equipe, haja vista sua experiência em hidráulica de tubulações. No entanto, como se julga um engenheiro moderno, capaz de se adaptar e desenvolver projetos desafiadores, resolveu assumir a proposta. Ao iniciar o trabalho, você deparou com algumas questões:

- Quais são os tipos de regime e elementos geométricos desse tipo de escoamento?

- Como é a distribuição da velocidade em escoamento livre?

- Haverá uma seção de máxima eficiência, pensando de forma análoga ao diâmetro econômico de tubulações?

Os regimes de escoamento em canais são influenciados por mais variáveis que no caso de tubulações forçadas. Isso proporciona algumas classificações dos escoamentos:

- Em função do tempo: permanente ou variado.

- Em função do espaço: uniforme ou variado.

*variado: gradualmente ou bruscamente variado.

- Em função do número de Reynolds: laminar, turbulento ou de transição.

- Em função do número de Froude: subcrítico, crítico e supercrítico.

Os elementos geométricos são parâmetro físicos que são utilizados para viabilização dos estudos dos canais. Os principais são: altura d'água (y), do escoamento (h), hidráulica ou média (H_m), área molhada (A), largura de topo (B), perímetro molhado (P), raio hidráulico (R_h), inclinação de fundo (I_o), inclinação da linha d'água (I_a) e da linha de energia (I_f).

A distribuição da velocidade dos escoamentos livres ocorre de forma distinta dos escoamentos forçados. Partindo da superfície no perfil vertical, a velocidade se eleva até determinado ponto, o qual tem a máxima velocidade, reduzindo, posteriormente, com o contínuo incremento da profundidade. Analisando o perfil horizontal da seção, a máxima velocidade se localiza no centro do escoamento, justamente pelo atrito com as paredes do canal. De forma resumida, a máxima velocidade se encontra pouco abaixo da superfície e na linha central do canal.

Pelo lado da eficiência da estrutura, um mesmo canal terá sua melhor eficiência quando conduzir a máxima vazão possível. Com base na equação geral do

dimensionamento de escoamentos livres ($\frac{n \times Q}{\sqrt{I_o}} = (A \times R_h)^{\frac{2}{3}}$), chega-se à conclusão

que a máxima vazão ocorrerá no máximo raio hidráulico. Esse cenário é obtido quando houver o mínimo perímetro molhado, haja vista sua relação de área molhada sobre perímetro molhado. Sabe-se que para uma mesma área, a forma de menor perímetro molhado é circular, apesar de suas inviabilidades construtivas. Assim, a seção mais eficiente seria a circular ou, de forma prática, aquela que tem menor perímetro molhado.

Avançando na prática

Escoamento em conduto livre

Descrição da situação-problema

A dinâmica do escoamento livre é distinta daquelas ocorridas em tubulações sob pressão. Com base nessa afirmação, sua equipe de trabalho solicitou a você uma explanação, por escrito, sobre o tema (escoamento em conduto livre) para a próxima reunião semanal. Para direcionar seu pequeno relatório, o supervisor do projeto lhe forneceu as seguintes questões:

- O escoamento livre tem classificações. Em função de qual parâmetro elas ocorrem e quais são as categorias existentes?
- Quais são os principais elementos geométricos dos canais?
- Como ocorre a distribuição da velocidade?
- Qual é a seção de máxima eficiência e por quê?

Resolução da situação-problema

Os regimes de escoamento em canais podem ser classificados pela variação em função do tempo e espaço, além dos números de Reynolds e Froude. As categorias existentes seriam:

- Função do tempo: permanente ou não permanente (variado).
- Função do espaço: uniforme ou não uniforme (variado).
 - *variado: bruscamente ou gradualmente variado.
- Função do número de Reynolds: laminar, turbulento ou de transição.
- Função do número de Froude: subcrítico, crítico e supercrítico.

Os principais elementos geométricos são: altura d'água (y), do escoamento (h), hidráulica ou média (H_m), área molhada (A), largura de topo (B), perímetro molhado (P), raio hidráulico (R_h), inclinação de fundo (l_o), da linha d'água (l_a) e da linha de energia (l_f).

A distribuição da velocidade tem influência das forças de resistência, assim como nos escoamentos forçados. Quando se analisa o perfil vertical e parte da superfície, a velocidade se eleva até determinado ponto, o qual tem a máxima velocidade, reduzindo com o incremento da profundidade. Por outro lado, analisando o perfil horizontal da seção, a máxima velocidade se encontra no centro do escoamento, justamente pelo atrito com as paredes do canal. Descrevendo de forma objetiva,

a mínima velocidade se encontra na camada em contato com o canal (camada limite) e a máxima se localiza pouco abaixo da superfície e na linha longitudinal central.

Como se pode verificar na fórmula geral ($\frac{n \times Q}{\sqrt{I_0}} = (A \times R_h)^{\frac{2}{3}}$), a máxima vazão, máxima eficiência, será obtida quando o raio hidráulico também for máximo; fato que ocorrerá somente quando houver mínimo perímetro molhado. A seção de mínimo perímetro molhado, para uma mesma área, é a circular.

Faça valer a pena

1. Os escoamentos livres podem ser classificados segundo alguns critérios, dentre eles a variação de suas características em função do tempo e do espaço. Em relação ao tempo, podem ser permanentes ou variáveis. Já no que se refere ao espaço, são denominados uniformes ou variáveis, sendo este último subdividido em gradualmente ou bruscamente variado (PORTO, 2006).

Com base no texto e em seus conhecimentos, marque a alternativa que melhor descreve a forma de analisar a classificação do escoamento em função do tempo.

- Determinado um ponto no canal, as características do escoamento deverão ser medidas nesse mesmo local em diferentes momentos.
- Determinados dois pontos no canal, as características do escoamento se manterão constantes.
- A partir de determinado ponto no canal, características como cor e turbidez variarão ou permanecerão constantes.
- As características do escoamento em um ponto a montante poderão variar ou se manter as mesmas do ponto a jusante.
- As características organolépticas da água deverão ser verificadas em diferentes momentos em determinado ponto.

2. Os elementos geométricos são fatores que viabilizam o estudo dos canais. Há algumas diferenças entre os principais elementos das seções circulares e as demais formas de canais. Apesar dessas pequenas diferenças, os principais elementos, conceitualmente dizendo, permanecem iguais.

Com base no trecho supracitado e em seus conhecimentos, marque a alternativa que apresenta aqueles elementos geométricos que são conceitualmente iguais nas seções circulares e não circulares.

- a) Altura d'água (y); diâmetro (D) e raio hidráulico (R_h).
- b) Altura relativa (y/D); área molhada (A) e raio hidráulico (R_h).
- c) Diâmetro (D); área molhada (A) e perímetro molhado (P).
- d) Altura d'água (y); área molhada (A) e perímetro molhado (P).
- e) Raio hidráulico (R_h); altura relativa (y/D) e perímetro molhado (P).

3. As redes coletoras de esgoto e as galerias de águas pluviais também são escoamentos livres. O motivo é sua interligação com a atmosfera, tendo, assim, a mesma pressão interna que nosso ambiente. Essas unidades, em geral, têm como força motriz do escoamento a gravidade.

A galeria de águas pluviais de determinada cidade é constituída de concreto ($n = 0,013$), diâmetro de 80 cm e declividade de fundo $I_0 = 0,004$ m/m. Sabendo que essa galeria conduz a vazão de 900 L/s em regime permanente e uniforme, determine a altura da lâmina d'água.

- a) 0,93 m.
- b) 0,531 m.
- c) 0,744 m.
- d) 0,8 m.
- e) 0,682 m.

Seção 3.2

Cálculo de canais em regime uniforme

Diálogo aberto

A energia disponível por unidade de peso de líquido em condutos livres tem tratamento distinto daquele presente nos escoamentos forçados. O principal motivo é a cota de pressão ser substituída pela altura da lâmina d'água.

Durante uma das reuniões iniciais desses dois novos projetos, alguns engenheiros que não têm muita afinidade com a área hidráulica ficaram com diversas dúvidas. A maioria delas relacionadas ao comportamento da energia do escoamento, pois todos os demais projetos executados foram para tubulações sob pressão.

Como você é o responsável pela parte hidráulica dos projetos, esses questionamentos foram direcionados a você. Apesar de dominar boa parte do tema, você pediu alguns dias para esclarecer as seguintes dúvidas:

- Como se comporta a energia nesse tipo de condução?
- A conservação da energia é explicada com as mesmas normas que no escoamento em tubulação?
- Há classificação do escoamento segundo a apresentação de sua energia? Se sim, qual é o parâmetro utilizado?

Essa seção lhe proporcionará conhecimentos para a resolução destas questões, que foram feitas a você durante a reunião. A seção também lhe proverá conhecimento sobre a dinâmica da energia nos escoamentos em canais, aspectos importantes para o desenvolvimento da análise solicitada nesta unidade, além de representarem fatores essenciais a um engenheiro do século XXI.

Portanto, mãos à obra!

Não pode faltar

O tema introduzido pela seção anterior (3.1), escoamento em conduto livre, será aprofundado nesta.

Assim como foi explanado, os condutos livres incluem os canais e os condutos de seções circulares, parcialmente cheios. De forma simplificada, esse tema aborda todos os condutos, sejam de seção aberta ou fechada, que estão interligados à atmosfera, mantendo, assim, a mesma pressão. Seu estudo e dimensionamento são possibilitados pela existência dos elementos geométricos, grandezas características de cada forma geométrica de conduto. Seu dimensionamento hidráulico segue cálculos matemáticos relativamente simples, com pequenas distinções entre as seções: trapezoidais, triangulares, retangulares e/ou circulares parcialmente cheias.

O tema a ser abordado na Seção 3.2 é a energia do escoamento em condutos livres. Como vimos nas Unidades 1 e 2, o escoamento forçado trata a energia do escoamento, de forma simplificada, aplicando a equação de Bernoulli a dois pontos e considerando o atrito viscoso. Essas considerações resultam na equação da conservação da energia:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H_{1-2}.$$

Em que: $\frac{P}{\gamma}$ = carga de energia referente à pressão (m).

Z = carga geométrica ou topográfica (m).

$\frac{v^2}{2g}$ = carga cinética (m).

Adotando esse mesmo conceito para o escoamento em conduto livre, deve-se estar ciente de que esse tipo de conduto se encontra interligado à atmosfera, não tendo carga de pressão ($\frac{P}{\gamma}$) na forma do escoamento forçado. A carga de pressão é substituída pela altura d'água, justamente por representar a pressão da coluna de líquido, o que resulta na seguinte fórmula:

$$y_1 + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H_{1-2}.$$

Ou ainda, pode-se pensar em somente um ponto, considerando a energia do escoamento naquele momento e, como vimos nas seções anteriores, ponto-final o coeficiente de Coriolis (α) para a correção da carga cinética, teremos a seguinte fórmula:

$$H = y + Z + \alpha \frac{v^2}{2g}$$

Bakhmeteff, em 1912, (CHOW, 1959 apud BAPTISTA; COELHO, 2010) considerou o cálculo de energia do escoamento apenas a partir do fundo do canal, desconsiderando a cota topográfica.

$$E = y + \alpha \frac{v^2}{2g}$$

Esta análise que pode ser aplicada na equação da continuidade (PORTO, 2006; BAPTISTA; COELHO, 2010), resultando na seguinte equação:

$$E = y + \alpha \frac{Q^2}{2gA^2}$$

Ainda de acordo com os autores, a área é a função da altura da lâmina d'água, logo, a energia específica para determinada seção e vazão é a função da altura também.

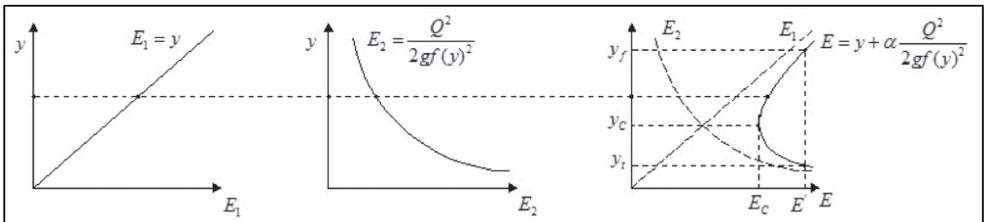
$$E = y + \alpha \frac{Q^2}{2gf(y)^2}$$

Como se trata de uma somatória de dois fatores operacionais que se encontram em função de y , Baptista e Coelho (2010) o analisam como a somatória de duas energias, obtendo a curva da energia específica (Figura 3.5).

$$E = E_1 + E_2$$

Em que: $E_1 = y$ e $E_2 = \frac{Q^2}{2gf(y)^2}$.

Figura 3.5 | Curva de energia específica



Fonte: adaptada de Baptista e Coelho (2010, p. 206).

Como se pode verificar no último gráfico da Figura 3.5, a energia específica do escoamento não é uma função linear crescente com y , mas existe um valor mínimo de energia, denominado *energia crítica* (E_c), correspondente à determinada profundidade, intitulada *profundidade crítica* (y_c) (BAPTISTA; COELHO, 2010).

Por ter formato hiperbólico, todos os valores de energia superiores à energia crítica terão duas alturas correspondentes (y_f e y_t), denominados *profundidades alternadas*. Baptista e Coelho (2010) ainda ressaltam a existência de dois escoamentos, intitulados *escoamentos recíprocos*. O escoamento que ocorre com altura y_f é conhecido como superior, fluvial ou subcrítico. Por outro lado, o escoamento de altura y_t recebe os nomes de, torrencial ou supercrítico. Já o escoamento que ocorre com altura d'água igual à altura crítica ($y = y_c$) é nomeado como escoamento crítico.

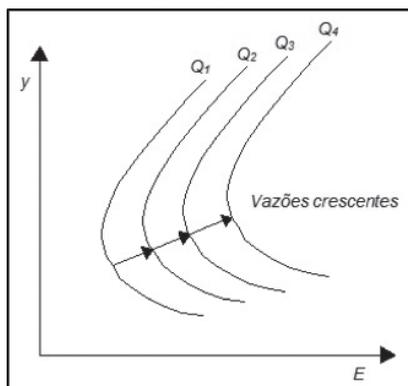
Com essa mesma lógica, pode-se tratar da *declividade crítica*. Com base no raciocínio descrito por Baptista e Coelho (2010) para tal tema, imagine determinado canal escoando uma dada vazão, com altura d'água superior à altura crítica. Pense agora na alteração da inclinação de fundo desse canal, sendo a vazão incrementada. Esse fato alteraria a velocidade e, conseqüentemente, pela equação da continuidade, sua área molhada reduziria. Isso faria com que a altura d'água reduzisse, chegando à altura crítica ou, inclusive, a valores inferiores.

A declividade de fundo que proporciona à determinada vazão a altura d'água coincidente com a altura crítica é denominada *declividade crítica*. Da mesma forma se determina a declividade subcrítica ou supercrítica.

Os conceitos de *velocidade* e *vazão críticas* são determinados de forma análoga, sendo também associados às condições críticas de escoamento (BAPTISTA; COELHO, 2010).

Os autores ainda ressaltam que cada valor de vazão aplicado a determinado canal resulta em uma curva de energia específica, ou seja, para um canal qualquer haverá um conjunto de curvas condicionadas à vazão escoada por ele (Figura 3.6).

Figura 3.6 | Conjunto de curvas de energia específicas



Fonte: adaptada de Baptista e Coelho (2010, p. 207).



Refleta

Sabendo que para cada canal há um conjunto de curvas de energia específica, você acha que há possibilidade de haver diferentes classificações (escoamento subcrítico, crítico e supercrítico) em um mesmo canal?

Se sim, qual seria o fator determinante para que houvesse essa transição?

Escoamento crítico

Segundo Porto (2006), o escoamento crítico pode ser definido como a fase de energia específica mínima para determinada vazão, ou ainda, a fase de máxima vazão para determinada energia específica.

A Seção 3.1 apresentou de forma rápida o número de Froude. Este adimensional relaciona as forças inerciais com as gravitacionais, sendo que sua equação mais conhecida é a seguinte:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \times H_m}}$$

Em que: v = velocidade.

g = gravidade.

H_m = altura hidráulica.

Por relações da derivada da energia em função da altura, influenciando o número de Froude (Fr) na condição, temos os seguintes valores de classificação:

$Fr < 1$ – regime subcrítico ou fluvial.

$Fr = 1$ – regime crítico.

$Fr > 1$ – regime supercrítico ou torrencial.



Pesquise mais

O capítulo 8 da referência a seguir discorre sobre o número de Froude de forma bastante didática, desde a dedução, explanação geral e aplicação desse número em exercícios.

BAPTISTA, B. B.; COELHO, M. M. L. P. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2010, 480 p.

Outra sugestão é o vídeo sobre o número de Froude do professor Marllus Gustavo Neves. Essa segunda indicação demonstra, de forma bastante didática, a dedução, a conceitualização e a aplicação do citado número adimensional.

NEVES, M. G. **Vídeo-aula 34 – número de Froude**. 2013. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=cnqkEMYOFV0>>. Acesso em: 8 fev. 2017.

Baptista e Coelho (2010) efetuaram uma interpretação energética interessante a respeito do número de Froude. Eles assimilaram o termo do numerador (v) à energia cinética e o denominador ($\sqrt{g \times H_m}$) à potencial. De forma prática, quando determinado escoamento tiver elevada velocidade, haverá predominância da força cinética sobre a potencial, então, $Fr > 1$. Por outro lado, quando houver preponderância da força potencial sobre a cinética, $Fr < 1$. Para $Fr = 1$, há equilíbrio entre essas forças.



Exemplificando

Determinada rede de drenagem pluvial tem diâmetro e altura d'água de 80 e 30 cm, respectivamente. A partir de determinado ponto, essa rede teve seu diâmetro reduzido, passando a ter e altura de 50 cm e 40 cm, respectivamente. Sabendo que a vazão é a mesma em ambos os trechos (280 L/s), classifique o escoamento em relação à energia para esses dois trechos.

$$\theta = 2 \arccos\left(1 - 2 \frac{y}{D}\right) \rightarrow \theta_1 = 2 \arccos\left(1 - 2 \frac{0,3}{0,8}\right) = 151^\circ.$$

$$A = D^2 \frac{(\theta - \text{sen}\theta)}{8} = 0,8^2 \frac{\left(\left(151 \times \frac{\pi}{180}\right) - \text{sen}\left(151 \times \frac{\pi}{180}\right)\right)}{8} = 0,21 \text{m}^2.$$

$$Q = v \times A \therefore v = \frac{Q}{A} = \frac{0,280}{0,21} = 1,33 \text{m/s}.$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \times H_m}} = \frac{1,33}{\sqrt{9,8 \times 0,3}} = 0,78 < 1 \rightarrow \text{subcrítico}.$$

$$\theta = 2 \arccos\left(1 - 2 \frac{y}{D}\right) \rightarrow \theta_1 = 2 \arccos\left(1 - 2 \frac{0,4}{0,5}\right) = 254^\circ.$$

$$A = D^2 \frac{(\theta - \text{sen}\theta)}{8} = 0,6^2 \frac{\left(\left(254 \times \frac{\pi}{180}\right) - \text{sen}\left(254 \times \frac{\pi}{180}\right)\right)}{8} = 0,136 \text{ m}^2.$$

$$Q = v \times A \therefore v = \frac{Q}{A} = \frac{0,280}{0,136} = 2,06 \text{ m/s}.$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \times H_m}} = \frac{2,06}{\sqrt{9,8 \times 0,4}} = 1,04 < 1 \rightarrow \text{supercrítico}.$$



Assimile

A energia no escoamento pode ser estudada pela aplicação da fórmula da conservação de energia utilizada nos escoamentos forçados, no entanto, com a substituição da carga de pressão, representada pela $\frac{P}{\gamma}$, pela altura d'água (\mathcal{Y}). Essa alteração deve ocorrer pelo fato do escoamento em conduto livre acontecer à pressão atmosférica, sendo a carga de pressão representada unicamente pela pressão da coluna de líquido.

A energia específica tem relação direta com a forma com a qual o escoamento se apresentará, podendo estar em movimento fluvial ou subcrítico, com predomínio das forças gravitacionais ($Fr < 1$). Outro extremo seria o escoamento torrencial ou supercrítico, no qual a força cinética se sobrepõe à potencial, resultando em $Fr > 1$.

O escoamento intermediário a essas fases é o crítico, fase de energia mínima para determinada vazão. Há equilíbrio entre as forças cinéticas e gravitacionais: $Fr = 1$.

Assim, conclui-se a seção que trata da energia nos escoamentos em condutos livres. Agora que você já tem consciência da apresentação e oscilação da energia nesse tipo de escoamento, terá capacidade de resolver as questões relacionadas ao tema que possam vir a surgir em suas experiências profissionais e cotidianas em geral.

Sem medo de errar

A energia disponível por unidade de peso de líquido é um fator importante. Estudada nos escoamentos forçados e livres, essa grandeza mantém relação direta com diversas características da corrente.

O estudo dessa grandeza nos escoamentos em condutos livres tem formas distintas daquelas usadas nos escoamentos forçados. O principal motivo é o fato de a cota de pressão ser substituída pela altura da lâmina d'água, pelo contato existente entre o escoamento e a atmosfera.

Com o aprofundamento dos seus estudos no dimensionamento dos condutos livres, tanto dos canais quanto da rede coletora de esgoto, surgiram alguns questionamentos cruciais:

- Como se comporta a energia nesse tipo de condução?

- A conservação da energia é explicada com as mesmas normas que no escoamento em tubulação?

- Há classificação do escoamento segundo a apresentação de sua energia? Se sim, qual é o parâmetro utilizado?

A energia em escoamentos em condutos livres tem o mesmo comportamento geral que aqueles que ocorrem em escoamentos forçados. Há redução da energia devido ao atrito viscoso do líquido com a superfície interna do conduto. O fato que os distingue é a inexistência da carga de pressão, substituída pela altura d'água, no caso dos condutos livres.

Há uma classificação do escoamento segundo a forma com a qual sua energia se apresenta. O parâmetro de classificação é o número de Froude (Fr), número adimensional que relaciona as forças cinéticas e gravitacionais. As possíveis categorias de classificação são:

- Subcrítica: quando há predomínio das forças gravitacionais, resultando em $Fr < 1$.

- Crítica: quando há equilíbrio entre forças cinéticas e gravitacionais, resultando em $Fr = 1$.

- Supercrítica: quando há preponderância das forças cinéticas, resultando em $Fr > 1$.

Assim, você pode notar que a velocidade e a altura do escoamento têm influência direta no valor do número de Froude. Em outras palavras, isso quer dizer que esses dois itens são capazes de alterar essa classificação do escoamento.

Essa questão deve ser devidamente descrita na análise que você deverá fazer ao final desta unidade. Portanto, lembre-se de relacionar a influência desses dois parâmetros (velocidade e altura, presentes na fórmula de Froude) nos regimes de escoamento.

Avançando na prática

Energia do escoamento no conduto livre

Descrição da situação-problema

Sabendo que a energia do escoamento em conduto livre se comporta de maneira semelhante à do escoamento forçado, você é indagado durante a reunião semanal da equipe de projeto sobre esse comportamento. De forma mais específica, foram feitas as seguintes questões a você:

- Como é o comportamento geral da energia nos condutos livres?
- Existem formas de classificá-la? Se sim, qual é o parâmetro e quais são as possíveis categorias?

Resolução da situação-problema

Sabe-se que a energia contida no escoamento se reduz no sentido do escoamento, justamente devido ao atrito viscoso do líquido e à superfície do conduto. Esse fato é justamente o efeito das perdas de carga.

A classificação do escoamento, segundo a forma que sua energia se apresenta, é feita com base no número de Froude (Fr). Esse número adimensional inter-relaciona as forças cinéticas e gravitacionais. As possíveis categorias são:

- Escoamento subcrítico: quando há prevalência das formas gravitacionais, resultando em $Fr < 1$.
- Escoamento crítico: quando há equilíbrio entre as formas cinéticas e gravitacionais: $Fr = 1$.
- Escoamento supercrítico: quando há predomínio das forças cinéticas: $Fr > 1$.

Faça valer a pena

1. A equação da conservação da energia geral, baseada na equação de Bernoulli, pode ser aplicada, com algumas adaptações, ao escoamento em condutos livres. A principal mudança deve ser a substituição da carga de pressão pela altura d'água.

Com base no texto e em seus conhecimentos, marque a alternativa que apresenta a equação da conservação de energia, baseada na teoria de Bernoulli, para escoamentos em conduto livre.

a) $\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H_{1-2}.$

b) $\frac{P_1}{\gamma} + y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H_{1-2}.$

c) $\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + y_1 = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + y_2 + \Delta H_{1-2}.$

d) $\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g}.$

e) $y_1 + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H_{1-2}.$

2. A energia específica do escoamento em conduto livre é um conceito importante. Com base nele, é possível classificar esses escoamentos em função da energia. Para tal classificação, se utiliza o número de Froude como parâmetro.

Com base na teoria relacionada ao número de Froude, analise as seguintes sentenças:

I. O número de Froude tem sua unidade em m/m, que significa o quanto de energia se perde por metro linear percorrido.

II. Esse número inter-relaciona as forças cinéticas e as forças gravitacionais.

III. Quando há predominância das formas cinéticas, o escoamento é classificado em supercrítico.

IV. O equilíbrio das forças cinéticas e gravitacionais resulta em escoamento crítico.

V. O número de Froude é o parâmetro utilizado para classificar o regime de escoamento em laminar, de transição ou turbulento.

Com base em sua análise, marque a alternativa que apresenta todas as afirmações verdadeiras.

- a) I, II e IV.
- b) II, III e IV.
- c) I, III, IV e V.
- d) I, II e IV.
- e) I, II, III, IV e V.

3. O número de Froude é o número adimensional utilizado para classificar os escoamentos em função da forma de apresentação de sua energia.

Sua fórmula geral é $Fr = \frac{v}{\sqrt{g \times H_m}}$, em que: v = velocidade, g = gravidade,

H_m = altura hidráulica ou média. Como todo número adimensional, não tem unidade de medida.

Utilizando o número de Froude, classifique o escoamento de um canal trapezoidal com as seguintes condições:

$$Q = 370 \text{ l/s.}$$

$$\text{Área molhada} = 0,45 \text{ m}^2.$$

$$\text{Largura de topo} = 0,6 \text{ m.}$$

Marque a alternativa que apresenta o valor de Froude e a classificação correta.

- a) 0,30; subcrítico.
- b) 0,82; subcrítico.
- c) 0,75; supercrítico.
- d) 0,8; supercrítico.
- e) 0,3; supercrítico.

Seção 3.3

Perímetro molhado

Diálogo aberto

Após pensar no comportamento da energia desse tipo de escoamento, você recordou que no escoamento em tubulações a perda de carga ocorre pelo atrito entre o líquido conduzido e toda a superfície interna da tubulação. Diferentemente deste caso, no escoamento em canais, a superfície em contato com o líquido não corresponde a toda a parede do conduto, tanto no caso de canais de seções variadas quanto no de seção circular parcialmente cheia.

Para tornar o estudo destas seções possíveis, foram criados alguns elementos hidráulicos que tratam essas questões, sendo especificamente neste caso o perímetro molhado um dos principais. Ele representa as partes em que o líquido entra em contato com a parede do canal.

Com base nisso, a equipe de projetos da qual você faz parte fez a você duas perguntas, haja vista sua capacidade técnica e função desempenhada no grupo durante a reunião semanal.

Haveria um perímetro molhado que tornaria a perda de energia mínima ao mesmo tempo que possibilitasse a condução da máxima vazão?

No caso da tubulação de seção circular, no entanto, parcialmente cheia, como seria essa relação?

A Seção 3.3 lhe apresentará o conhecimento necessário para que você responda a esses questionamentos, bem como para que você finalize a confecção do relatório técnico sobre a influência das características geométricas dos canais abertos e circulares parcialmente cheios no regime de escoamento.

Falando do relatório de forma específica, o conhecimento das seções de mínimo perímetro molhado e dos elementos hidráulicos da seção circular parcialmente cheia ajudarão você na discussão da influência das características geométricas, principalmente o perímetro molhado nos regimes de escoamento. O incremento da perda de carga é um desses pontos a serem trabalhados. Portanto, esta última seção da unidade proporcionará uma base para que você desenvolva

um excelente relatório, melhorando ainda mais sua capacidade de elaboração de trabalhos técnicos na área de hidráulica.

Animado para expandir seus conhecimentos sobre escoamentos livres e finalizar bem esta unidade?

Não pode faltar

As seções apresentadas anteriormente discorreram sobre a parte introdutória e energética dos escoamentos em canais.

A Seção 3.1 tratou da fundamentação introdutória dos escoamentos em canais, elementos geométricos e dimensionamento hidráulico, além de apresentar também a seção circular parcialmente cheia e a de máxima eficiência.

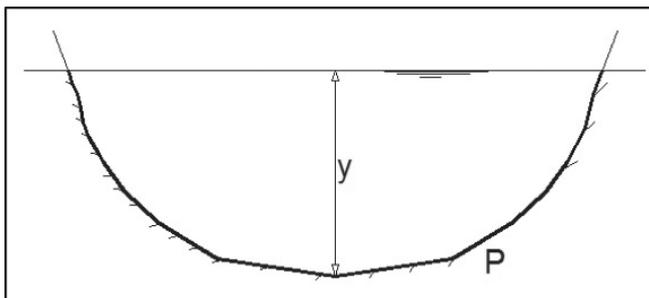
A Seção 3.2 apresentou a questão energética dos escoamentos em canais. Discorreu sobre a equação da conservação de energia para canais abertos e sobre a energia específica deles.

De forma complementar, a Seção 3.3 abordará o tema do mínimo perímetro molhado e dos elementos hidráulicos da seção circular de forma mais detalhada e, na medida do possível, desde um ponto de vista mais prático.

Seção de mínimo perímetro molhado

O perímetro molhado (P) é o comprimento total do canal que está em contato direto com o líquido escoado (Figura 3.7).

Figura 3.7 | Perímetro molhado de determinado canal



Fonte: adaptada de Porto (2006).

Neste elemento hidráulico não se contabiliza a superfície livre, incluindo, assim, somente o contato do líquido com o canal.

Sabendo que a forma da seção tem influência no perímetro molhado, a determinação do formato geométrico deve ser realizada antes do seu dimensionamento.

Mantendo a inclinação de fundo e rugosidade da parede fixas, Porto (2006) analisa o efeito do mínimo perímetro molhado na fórmula geral do dimensionamento:

$\frac{nQ}{\sqrt{I_0}} = (A \times R_h)^{\frac{2}{3}}$, destacando o fato de que para a máxima vazão deverá haver o máximo raio hidráulico possível. Como se sabe que o raio hidráulico (R_h) é obtido pela divisão da área molhada (A) pelo perímetro molhado (P), logo, para o menor perímetro molhado possível para determinada área, haverá a máxima vazão conduzida pelo canal.

Esse é o motivo do interesse do estudo da seção de mínimo perímetro molhado.

Segundo Porto (2006), pode haver dificuldade de aplicação da seção de mínimo perímetro molhado na prática, como seção demasiadamente profunda e largura de fundo pequena em relação à altura da seção.

Independentemente da forma da seção do canal, deve-se adotar, sempre que possível, a seção de mínimo perímetro molhado.

Apesar da seção circular relacionar-se com a seção de mínimo perímetro molhado para determinada área fixa, quando comparada a outras formas, são de difíceis aplicações práticas (PORTO, 2006).

Trapézio de mínimo perímetro molhado

Há diversas formas de se apresentar a área e o perímetro molhados de um trapézio. Porto (2006) os apresenta na seguinte forma:

$$A = (m + Z)y^2$$

$$P = (m + 2\sqrt{1 + Z^2})y$$

O autor combina estas duas equações pelo elemento altura (y), resultando na seguinte equação:

$$P = (m + 2\sqrt{1 + Z^2}) \frac{A^{\frac{1}{2}}}{(m + Z)^{\frac{1}{2}}}$$

Posteriormente à deriva em relação à razão de aspecto (m) e igualando a zero para área A constante, além de desenvolvê-la, obtemos:

$$m = 2\left(\sqrt{1+Z^2} - Z\right).$$

Esta equação relaciona os dois adimensionais (razão de aspecto e inclinação do talude) para que a seção tenha o mínimo perímetro molhado.



Exemplificando

Determinado canal trapezoidal com taludes 2H:1V, declividade de fundo $I_0 = 0,0010$ m/m, revestimento em alvenaria de pedra argamassada em condições regulares ($n = 0,025$) deverá transportar a vazão de $6,5$ m³/s. A razão de aspecto corresponde a $m = \frac{b}{y} = 4$.

Qual será a velocidade média?

Esta seção é de mínimo perímetro molhado?

Segundo o Quadro 3.2, da Seção 3.1 – Para $m = \frac{b}{y} = 4$ e $Z = 2$, $K = 1,796$.

Coefficiente dinâmico: $M = \left(\frac{nQ}{\sqrt{I_0}}\right)^{\frac{3}{8}} = \left(\frac{0,025 \times 6,5}{\sqrt{0,001}}\right) = 1,847$.

Fórmula de Manning compacta: $y = \frac{M}{K} = \frac{1,847}{1,796} = 1,03m$.

$m = \frac{b}{y} = 4 \therefore b = 4,12m$

Área molhada: $A = (m + Z)y^2 = (4 + 2) \times 1,03^2 = 6,36m^2$.

Veloc. média: $V = \frac{Q}{A} = \frac{6,5}{6,36} = 1,02m/s$.

Para que a seção seja de mínimo perímetro molhado:

$m = 2\left(\sqrt{1+Z^2} - Z\right) = 2\left(\sqrt{1+4} - 2\right) = 0,47 \neq 4$.

Portanto, a seção descrita não é de mínimo perímetro molhado.

Este exemplo foi desenvolvido por Porto (2006, p. 258).

Retângulo de mínimo perímetro molhado

O retângulo é um caso particular da forma de trapézio, justamente quando o ângulo do talude é de 90° , ou seja, $Z = \cotg 90^\circ = 0$. Assim, com base em Porto (2006), substituindo na condição determinada para o trapézio, obtém-se:

$$m = 2 \text{ ou } m = \frac{b}{y} = 2 \therefore b = 2y.$$

Isso quer dizer que a seção de mínimo perímetro molhado para seções retangulares é obtida quando a largura é equivalente a duas vezes sua altura.



Exemplificando

Determinado canal retangular deve ser projetado para ser o mais eficiente possível (mínimo perímetro molhado). Sua declividade de fundo $I_0 = 0,0015$ m/m, revestimento em argamassa de cimento em condições regulares ($n = 0,013$) para o transporte de $4,5$ m³/s.

Qual será a altura e largura desse canal?

Para que tenha o mínimo perímetro molhado, deverá manter razão de aspecto $m = \frac{b}{y} = 2$.

Para seção retangular $Z = 0$, logo, para $m = 2$, tem-se $K = 1,091$ (Segundo a Tabela 3.2, da Seção 3.1).

Coefficiente dinâmico:

$$M = \left(\frac{nQ}{\sqrt{I_0}} \right)^{\frac{3}{8}} = \left(\frac{0,013 \times 4,5}{\sqrt{0,0015}} \right)^{\frac{3}{8}} = 1,17.$$

Fórmula de Manning compacta:

$$y = \frac{M}{K} = \frac{1,17}{1,091} = 1,07m$$

Razão de aspecto:

$$m = \frac{b}{y} = 2 \therefore b = 2y = 2(1,07) = 2,14m.$$

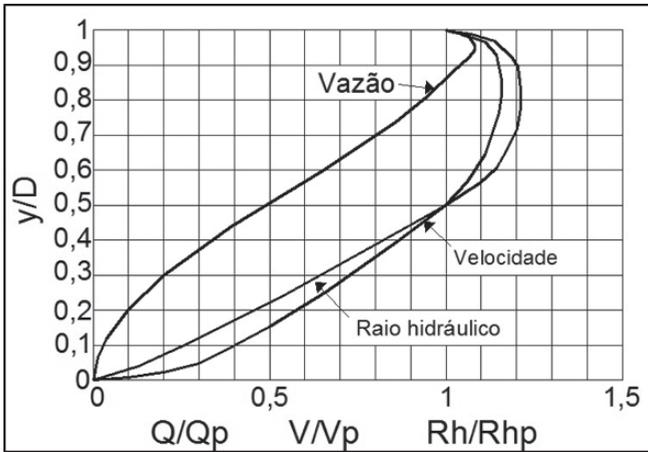
Elementos hidráulicos da seção circular

As seções circulares parcialmente cheias são comumente empregadas, sendo as redes coletoras de esgotos seu uso mais conhecido.

Segundo Porto (2006), é necessário saber para uma determinada lâmina d'água a relação entre a vazão momentânea e a em seção plena, assim como a velocidade, pois há variação dos elementos geométricos e hidráulicos em função da altura da lâmina d'água.

Essas relações podem ser obtidas a partir de gráficos (Figura 3.8) ou tabela.

Figura 3.8 | Relação entre os elementos hidráulicos da seção circular



Q_p , V_p e R_{hp} : vazão, velocidade e raio hidráulico em seção plena

Fonte: adaptada de Porto (2006)

A Seção 3.2, estudada anteriormente, apresentou os conceitos e as fórmulas de diversos elementos geométricos da seção circular, porém, vale recordar alguns que necessitaremos:

$$\text{Ângulo: } \theta = 2 \arccos\left(1 - 2 \frac{y}{D}\right).$$

$$\text{Área molhada: } A = D^2 \frac{(\theta - \text{sen}\theta)}{8}.$$

$$\text{Raio hidráulico: } R_h = D \frac{(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta})}{4}.$$

Assim, Porto (2006) descreve as relações da velocidade e vazão com suas respectivas grandezas quando em seção plena (completamente ocupadas pelo líquido escoado), utilizando a fórmula de Manning:

$$\frac{V}{V_p} = \left(\frac{R_h}{R_{hp}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$\frac{Q}{Q_p} = \frac{A}{A_p} \left(\frac{R_h}{R_{hp}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

O autor ainda desenvolve essas relações com base no fato da área do conduto circular em seção plena ser $A_p = \pi \times \text{raio}^2$ e o raio hidráulico, $R_{hp} = \frac{D}{4}$. Assim, as fórmulas descritas anteriormente resultam nas seguintes:

$$\frac{V}{V_p} = \left(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$\frac{Q}{Q_p} = \frac{1}{2\pi} (\theta - \text{sen}\theta) \left(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Observação: a aplicação do ângulo deve ser feita em radiano.



Refleta

Segundo Porto (2006), a máxima velocidade e a vazão de determinada seção circular parcialmente cheia não ocorrem em seção plena, mas nas seguintes condições:

- Velocidade máxima: $\theta = 257^\circ$, que corresponde a $y = 0,81 D$.
- Vazão máxima: $\theta = 302,5^\circ$, que corresponde a $y = 0,94 D$.

O fato da vazão máxima em alguns momentos ser maior que em seção plena pode ser comprovado no Quadro 3.4, quando $\frac{Q}{Q_p} > 1$.

Por que você acha que esse fato ocorre?

Haveria relação com o atrito do líquido escoado com a superfície interna da tubulação?



Pesquise mais

Dr. Rodrigo Porto discorre no capítulo 8 do seu livro *Hidráulica básica sobre canais fechados*, incluindo seções circulares e outras especiais. É uma ótima obra para o aprofundamento dos estudos nesses temas.

PORTO, R. de M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006, 540p.

Outras obras que também abordam o tema de escoamento em condutos livres é o vídeo do prof. Marllus Gustavo Neves, que trata aspectos básicos deste tema.

VÍDEO-AULA 31 - Características básicas dos escoamentos livres - parte 1. Marllus Gustavo Neves, 2013. Vídeo do YouTube. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=RLPFHYFdFC8>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

VÍDEO-AULA 32 - Características básicas dos escoamentos livres - parte 2. Marllus Gustavo Neves, 2013. Vídeo do YouTube. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=tGXZdCd61d0>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

Para simplificar esses cálculos, o Quadro 3.4 agrupa alguns elementos geométricos e hidráulicos referentes à seção circular.

Quadro 3.4 | Elementos hidráulicos e geométricos da seção circular

y/D	$\alpha=A/D^2$	$\beta=Rh/D$	Q/Q_p	y/D	$\alpha=A/D^2$	$\beta=Rh/D$	Q/Q_p
0,01	0,001	0,007	0	0,51	0,403	0,253	0,517
0,02	0,004	0,013	0,001	0,52	0,413	0,256	0,534
0,03	0,007	0,02	0,002	0,53	0,423	0,259	0,551
0,04	0,011	0,026	0,003	0,54	0,433	0,262	0,568
0,05	0,015	0,033	0,005	0,55	0,443	0,265	0,586
0,06	0,019	0,039	0,007	0,56	0,453	0,268	0,603
0,07	0,024	0,045	0,01	0,57	0,462	0,27	0,62
0,08	0,029	0,051	0,013	0,58	0,472	0,273	0,637
0,09	0,035	0,057	0,017	0,59	0,482	0,275	0,655
0,1	0,041	0,064	0,021	0,6	0,492	0,278	0,672
0,11	0,047	0,07	0,025	0,61	0,502	0,28	0,689
0,12	0,053	0,075	0,031	0,62	0,512	0,282	0,706
0,13	0,06	0,081	0,036	0,63	0,521	0,284	0,723
0,14	0,067	0,087	0,042	0,64	0,531	0,286	0,74
0,15	0,074	0,093	0,049	0,65	0,54	0,288	0,756
0,16	0,081	0,099	0,056	0,66	0,55	0,29	0,773
0,17	0,089	0,104	0,063	0,67	0,559	0,292	0,789

0,18	0,096	0,11	0,071	0,68	0,569	0,293	0,806
0,19	0,104	0,115	0,079	0,69	0,578	0,295	0,821
0,2	0,112	0,121	0,088	0,7	0,587	0,296	0,837
0,21	0,12	0,126	0,097	0,71	0,596	0,298	0,853
0,22	0,128	0,131	0,106	0,72	0,605	0,299	0,868
0,23	0,136	0,136	0,116	0,73	0,614	0,3	0,883
0,24	0,145	0,142	0,126	0,74	0,623	0,301	0,898
0,25	0,154	0,147	0,137	0,75	0,632	0,302	0,912
0,26	0,162	0,152	0,148	0,76	0,64	0,302	0,926
0,27	0,171	0,157	0,159	0,77	0,649	0,303	0,939
0,28	0,18	0,161	0,171	0,78	0,657	0,304	0,953
0,29	0,189	0,166	0,183	0,79	0,666	0,304	0,965
0,3	0,198	0,171	0,196	0,8	0,674	0,304	0,977
0,31	0,207	0,176	0,209	0,81	0,681	0,304	0,989
0,32	0,217	0,18	0,222	0,82	0,689	0,304	1
0,33	0,226	0,185	0,235	0,83	0,697	0,304	1,011
0,34	0,235	0,189	0,249	0,84	0,704	0,304	1,021
0,35	0,245	0,193	0,263	0,85	0,712	0,303	1,03
0,36	0,255	0,198	0,277	0,86	0,719	0,303	1,039
0,37	0,264	0,202	0,292	0,87	0,725	0,302	1,047
0,38	0,274	0,206	0,307	0,88	0,732	0,301	1,054
0,39	0,284	0,21	0,322	0,89	0,738	0,299	1,06
0,4	0,293	0,214	0,337	0,9	0,745	0,298	1,066
0,41	0,303	0,218	0,353	0,91	0,75	0,296	1,07
0,42	0,313	0,222	0,368	0,92	0,756	0,294	1,073
0,43	0,323	0,226	0,384	0,93	0,761	0,292	1,075
0,44	0,333	0,229	0,4	0,94	0,766	0,289	1,076
0,45	0,343	0,233	0,417	0,95	0,771	0,286	1,075
0,46	0,353	0,237	0,433	0,96	0,775	0,283	1,071
0,47	0,363	0,24	0,45	0,97	0,779	0,279	1,066
0,48	0,373	0,243	0,466	0,98	0,782	0,274	1,057
0,49	0,383	0,247	0,483	0,99	0,784	0,267	1,042
0,5	0,393	0,25	0,5	1	0,785	0,25	1

Fonte: Porto (2006, p. 272).



Assimile

A determinação dos parâmetros geométricos dos canais no momento da construção é um fator de extrema importância. Já a de seções mais eficientes pode economizar recursos, tanto construtivos quanto de operação.

A seção de mínimo perímetro molhado diz respeito a esse tema de melhora da eficiência do canal. Trata-se da determinação do menor comprimento de seção do canal em contato direto com o líquido conduzido. Isso possibilita ao canal a condução da máxima vazão e o torna mais eficiente por reduzir o atrito.

Para que determinada seção trapezoidal tenha mínimo perímetro molhado, ele deve atender à seguinte fórmula:

$$m = 2 \left(\sqrt{1 + Z^2} - Z \right).$$

De forma semelhante, para determinada seção retangular, a condição a ser atendida é:

$$m = 2 \text{ ou } m = \frac{b}{y} = 2 \therefore b = 2y.$$

A seção circular parcialmente cheia tem peculiaridades não apresentadas por outras formas. Seus elementos hidráulicos são condicionados pela altura da lâmina d'água. As relações de velocidade, vazão e raio hidráulico podem ser encontradas na forma de gráfico e tabela, além de obtidas por operações matemáticas.

Assim, encerra-se a Seção 3.3, a qual apresentou os conceitos de mínimo perímetro molhado e os elementos hidráulicos da seção circular. Esses temas possibilitarão a você entender melhor a importância do correto dimensionamento de canais, melhorando seu domínio hidráulico de canais.

Sem medo de errar

O correto dimensionamento de canais de escoamento pode proporcionar maior eficiência na condução de líquido. Um conceito bastante importante desse tema é o mínimo perímetro molhado, pois está relacionado à redução da área de

contato do líquido com o canal, podendo torná-lo mais eficiente, reduzindo as perdas de carga para máxima vazão conduzida.

Com base nisso, foram feitas duas perguntas para você durante a reunião semanal da equipe de projetos:

- Haveria um perímetro molhado que tornaria a perda de energia mínima ao mesmo que tempo que possibilitasse a condução da máxima vazão?
- No caso da tubulação de seção circular, porém, parcialmente cheia, como seria essa relação?

O perímetro molhado é o comprimento total da seção do canal que está diretamente em contato com o líquido escoado. Essa fronteira se trata da região na qual há perda de carga causada pelo atrito do líquido com o limite rígido que o limita. O mínimo perímetro molhado é o menor comprimento possível para que se mantenha a área necessária para a condução da vazão máxima. Quando se atinge o mínimo perímetro molhado de determinado canal, obtém-se a máxima vazão transportada e a mínima perda de energia.

Quando comparadas a outras formas de seções para uma mesma área, as seções circulares são as mais eficientes por apresentarem menor perímetro molhado. No entanto, sua análise é distinta das demais, pois há relações, em função do ângulo formado ao redor do eixo imaginário longitudinal da seção. Assim, essas relações são condicionadas à altura da lâmina d'água, sendo facilmente obtidas a partir de gráfico ou tabela específica.

O relatório solicitado pelo engenheiro-chefe com a influência das características geométricas dos canais abertos e circulares parcialmente cheios no regime de escoamento deverá ser entregue ao seu professor. A estrutura básica do relatório deverá ser a seguinte:

- Introdução: contextualizar as características geométricas de cada forma de canal. Como vimos, excetuando a forma circular, as demais seções têm os mesmos elementos. Assim, basta expor essas características em dois grandes grupos.

Para a confecção desse tópico, você deverá realizar pesquisas em livros e internet, assim como o material apresentado na Seção 3.1.

- Análise descritiva: tratar as influências de forma mais específica. Uma sugestão é criar cenários possíveis, demonstrando com auxílio das fórmulas matemáticas as variações do escoamento (classificação segundo Froude e Reynolds) causadas pela alteração dos elementos geométricos.

Em outras palavras, simule condições para a equação de Froude, por exemplo: altere o valor da velocidade e altura média e veja o que ocorre com o valor final desse número adimensional.

Analise, dentre todos os elementos geométricos apresentados, aqueles que influenciam na velocidade e altura média do escoamento, e descreva se sua influência tem mesmo sentido ou oposto.

Exemplo: a alteração da área molhada pode alterar a velocidade e a altura, influenciando, desse modo, no regime de escoamento. Comprove esses fatos propostos matematicamente.

Faça a mesma análise para a fórmula de Reynolds.

Não se esqueça de abordar o mínimo perímetro molhado, seu efeito na vazão e sua importância no dimensionamento.

Essa parte do trabalho necessitará de abordagens que abrangem as três seções da unidade.

- **Parecer final:** concluir relatório. Descrever, de forma resumida, as possíveis influências verificadas nas suas análises.

As questões a seguir podem lhe auxiliar em suas conclusões:

- Sabendo que a velocidade e a altura média do escoamento são fatores determinantes ao número de Froude, quais elementos geométricos influenciam na alteração desses dois parâmetros?

- Para o número de Reynolds, quais elementos geométricos influenciam?

- Qual é a importância da seção de mínimo perímetro molhado?

Com a confecção e entrega desse relatório, você conclui a Unidade 3: *Regime de escoamento em canais*.

Avançando na prática

Seção de mínimo perímetro molhado

Descrição da situação-problema

Agora que você tem conhecimento da importância da seção de mínimo perímetro molhado para a redução da perda de carga, ou seja, para a eficiência do canal, resolva a seguinte questão que lhe foi apresentada durante uma das reuniões da equipe de projeto.

O canal trapezoidal de taludes 2,5H:1V, declividade de fundo $I_0 = 0,001$ m/m, revestimento em alvenaria de pedra seca em condições regulares ($n = 0,033$) transporta a vazão de $7,5$ m³/s. A razão de aspecto corresponde a $m = \frac{b}{y} = 3$.

Esse canal tem seção de mínimo perímetro molhado?

Descreva o motivo de se almejar a seção de mínimo perímetro molhado, recorremos à seguinte fórmula:

Resolução da situação-problema

Para que a seção trapezoidal seja de mínimo perímetro molhado:

$$m = 2\left(\sqrt{1+Z^2} - Z\right) = 2\left(\sqrt{1+2,25} - 1,5\right) = 0,61 \neq 3.$$

Portanto, a seção descrita não é de mínimo perímetro molhado.

Almeja-se essa seção por se tratar da disposição geométrica mais eficiente, possibilitando a condução da máxima vazão possível com reduzida perda de carga por atrito com a superfície do canal.

Faça valer a pena

1. O perímetro molhado é um dos elementos geométricos criados para possibilitar o estudo dos escoamentos em canais. A seção de mínimo perímetro molhado é um parâmetro bastante almejado no momento do dimensionamento desses condutos, pois possibilita a máxima vazão conduzida e mínima perda de carga.

Com base no texto e em seus conhecimentos, analise as sentenças a seguir.

I. O perímetro molhado é o comprimento total da seção que está em contato direto com a superfície do canal.

II. A aplicação da seção de mínimo perímetro molhado possibilita o escoamento da máxima vazão.

III. Em canais trapezoidais, a fórmula que confirma se o conduto opera ou não em seção de mínimo perímetro molhado é: $m = 2\left(\sqrt{1+Z^2} - Z\right)$.

IV. Em canais retangulares, a condução para que seja dimensionada a seção de mínimo perímetro molhado é: $m = 2$ ou $m = \frac{b}{y} = 2 \therefore b = 2y$.

V. A seção de mínimo perímetro molhado deve ser, sempre que possível, levada em consideração no momento do dimensionamento.

Após analisar as sentenças marque, dentre as alternativas a seguir, aquela que apresenta todas as afirmações verdadeiras.

- a) I, II e III.
- b) I, III, IV e.
- c) I, II, III e V.
- d) II, III, IV e V.
- e) I, II, III, IV e V.

2. O uso da seção de mínimo perímetro molhado é um artifício para se atingir a máxima vazão escoada em determinado canal. Para o atendimento dessa seção, cada forma de canal tem determinado critério, ou melhor, fórmula matemática a ser seguida.

Sabendo que a fórmula utilizada para verificar a seção de mínimo perímetro molhado para seções trapezoidais é $m = 2(\sqrt{1+Z^2} - Z)$, assinale a alternativa que apresenta o valor da razão de aspecto obtida a partir da condição.

Canal trapezoidal com taludes 2H:1,5V, declividade de fundo $I_0 = 0,0013$ m/m, leito pedregoso e vegetação nos taludes em condições regulares ($n = 0,035$) escoando vazão de $5 \text{ m}^3/\text{s}$. A razão de aspecto corresponde

a $m = \frac{b}{y} = 1,5$.

- a) 1,5.
- b) 2.
- c) 0,67.
- d) 0,47.
- e) 1,47.

3. As seções circulares parcialmente cheias têm elementos geométricos e hidráulicos com comportamentos distintos das demais formas. Esses parâmetros são condicionados pela altura da lâmina d'água e, geralmente, tratados como relações entre a grandeza momentânea e quando em seção plena.

Sabendo que a relação da vazão é dada pela seguinte fórmula:

$$\frac{Q}{Q_p} = \frac{1}{2\pi} (\theta - \text{sen}\theta) \left(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta}\right)^{\frac{2}{3}}. \text{ Determine seu valor para uma lâmina}$$

d'água que proporciona ângulo de 273° .

- a) 0,74.
- b) 0,64.
- c) 0,84.
- d) 0,94.
- e) 0,54.

Referências

BAPTISTA, B. B.; COELHO, M. M. L. P. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2010, 480p.

VÍDEO-AULA 31 - Características básicas dos escoamentos livres - parte 1. Marllus Gustavo Neves, 2013. Vídeo do YouTube. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=RLPFHYFdFC8>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

VÍDEO-AULA 32 - Características básicas dos escoamentos livres - parte 2. Marllus Gustavo Neves, 2013. Vídeo do YouTube. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=tGXZdCd61d0>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

VÍDEO-AULA 34 - número de Froude. Marllus Gustavo Neves, 2013. Vídeo do YouTube. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=cnqkEMYOFV0>>. Acesso em: 8 fev. 2017.

PORTO, R. de M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006, 540p.

Hidrometria

Convite ao estudo

A Unidade 4 do curso de *Fundamentos de hidráulica e hidrometria* manterá a mesma dinâmica estrutural das unidades anteriores, no entanto, tratará de um assunto à parte, a hidrometria. No caso da hidráulica, é a área que trata, principalmente, das medições de vazão e velocidade dos escoamentos líquidos, ou sob uma abordagem mais específica, da água.

Os temas tratados anteriormente forneceram conhecimento sobre como é o escoamento em tubulações sob pressão e canais, como se comporta a energia nesses diversos condutos. Assim, o estudo dos processos, dos equipamentos e das técnicas de medição de vazão e velocidade concluirá nossa disciplina.

O objetivo específico inicial desta unidade é a apresentação da importância desse tema, assim como alguns processos de medição de vazão em canais, os quais são apresentados na Seção 4.1. O tema posterior envolve o estudo sobre os medidores empregados em tubulações – Venturi, diafragma, medidor magnético, hidrômetro, fluxograma e hidrômetro. Esse tema, abordado na Seção 4.2, tem como objetivo familiarizar esses equipamentos, contextualizando seus usos. A Seção 4.3 aborda o tema desde uma forma mais aplicada até a determinação da velocidade e vazão nos escoamentos, contando com aula prática, justamente para tratar do tema sobre vários enfoques e, assim, proporcionar a você maior entendimento do conteúdo.

Com a finalização desta unidade, você será capaz de aplicar as diferentes técnicas de hidrometria nas diversas situações do cotidiano, tanto em escoamentos forçados quanto livres. Remetendo esse tema ao nosso cenário hipotético da equipe de projetos que você integra, pode-se destacar vários pontos nos quais o conhecimento de hidrometria é de suma importância.

Pensando no projeto da estação de tratamento de água (ETA), há necessidade de saber a vazão do corpo hídrico que fornecerá a água a ser tratada, pois é necessário solicitar outorga de uma determinada vazão. A medida da vazão de água retirada deste também deve ser monitorada. Uma vez dentro da ETA, a determinação da vazão e velocidade são determinantes nos tratamentos empregados, sendo condicionantes de processos e compostos químicos aplicados. Com base nisso, conhecer quais processos de medição de vazão são mais adequados a cada fim é determinante para a eficiência do processo.

Justamente pela importância dessas questões, você deverá discorrer ao final da unidade sobre a determinação de velocidade e os dispositivos de medição da vazão, definindo a situação que apresenta melhores resultados.

Podemos dizer que todos os temas apresentados nesta disciplina têm seu valor, no entanto, a Unidade 4 aborda questões que são essenciais à operação das estruturas hidráulicas.

Aproveito para animá-lo quanto à nossa localização temporal dentro do conteúdo, pois esta é a última parte, a qual fecha todo nosso esforço com "chave de ouro". Por isso, mantenha-se focado nesta que é uma das mais importantes e interessantes unidades.

Seção 4.1

Processos de medição de vazões

Diálogo aberto

Em geral, para projetos hidráulicos, a determinação da vazão de água que está percorrendo o canal ou a tubulação é de extrema importância. A aplicação da água em diversos processos exige que se tenha conhecimento dessa grandeza.

Você integra a equipe de engenheiros de um projeto de ETA. Esse projeto necessitará de um aparato de medição de vazão no canal que antecede a unidade de coagulação/floculação. O engenheiro responsável pelos processos químicos de tratamento afirmou que a determinação da vazão é necessária para a adequada dosagem de coagulante, pois esse fato pode reduzir a eficiência do processo, comprometendo todo o restante dos processos de tratamento.

Como sabemos desde o princípio do projeto, você é o engenheiro responsável pelos fatores hidráulicos e, por isso, necessita determinar qual processo é o mais adequado para esse ponto da unidade. Nesse contexto, qual processo de medição você adotará? Quais são as vantagens dele frente aos outros?

Esta seção apresentará conteúdo específico para que você tenha discernimento sobre os principais métodos de medição de vazão em canais, sabendo qual seria mais bem aplicado ao caso.

Sabendo da necessidade real de confeccionar um relatório ao final da unidade sobre a determinação de velocidade e dispositivos de medição de vazão, definindo a situação que apresenta melhores resultados, esta primeira seção dará a você o conhecimento sobre os processos de medida de vazão em canais.

Agora que já sabe do tema que trabalharemos e sua aplicação prática, mãos à obra!

Não pode faltar

As unidades anteriores abordaram os escoamentos forçados (que ocorrem em tubulações fechadas sob pressão superior à atmosférica) e escoamentos livres (presentes em canais e tubulações parcialmente cheios em contato com a atmosfera). A Unidade 1 introduziu o tema dos escoamentos forçados, discorrendo principalmente sobre o número de Reynolds e as perdas de carga. A unidade subsequente abordou as associações de tubulações, os condutos equivalentes e as estações elevatórias, incluindo o dimensionamento dessas unidades. Com tema um pouco distinto, a Unidade 3 tratou dos escoamentos livres em canais e tubulações sob pressão atmosférica, apresentando o comportamento da energia, as perdas de carga e o dimensionamento. Com o objetivo de fechar o conteúdo relacionado à nossa disciplina, a Unidade 4 abordará a hidrometria, que, de forma simples, pode ser definida como a área da hidrodinâmica que estuda as medições de vazão e velocidade. Tema este essencial aos contextos hidráulicos, pois o conhecimento do volume de água com o qual se trabalha, conduz, trata, descarta etc, é uma questão imprescindível para setores que lidam diretamente com ela.

Processos de medição de vazão

Há diversos métodos de medição de vazão, tanto em tubulações sob pressão quanto em escoamentos livres.

Para canais fluviais (corpos hídricos), especificamente, esses métodos podem ser classificados em diretos e indiretos. Segundo Carvalho (2008), essa distinção acontece pelos equipamentos e/ou técnicas empregadas. Para os métodos diretos são utilizados equipamentos convencionais e precisos, como ecossonda e molinete, ou correntômetro acústico de efeito doppler (ADCP). De forma diferente, para os métodos indiretos são utilizadas técnicas mais simples, muitas vezes, manuais, como flutuador e batimetria manual, realizada com réguas e/ou balizas.

Há correlação entre as técnicas de medição de vazão e velocidade, pois, em geral, o cálculo da vazão se faz a partir da velocidade do escoamento.

Esta seção se limitará aos processos utilizados em escoamentos livres, sendo eles: orifícios, bocais e vertedouros.

Orifícios

De forma ampla e clara, pode-se utilizar o conceito definido por Porto (2006), que descreve orifício como uma abertura de perímetro fechado, de forma geométrica definida (circular, triangular, retangular etc.), realizada na parede de determinado

reservatório ou de determinado canal ou conduto em pressão, pela qual o líquido escoar em virtude de sua energia potencial e/ou cinética.

Com base no local onde ocorre esse escoamento, surgem algumas classificações: *descarga livre* ou *afogada*.

A *descarga livre* ocorre quando esse orifício verte líquido para uma determinada região submetida à pressão atmosférica. Por outro lado, quando esse escoamento é direcionado às regiões em que há continuação do escoamento anterior, ou seja, há quantidade de líquido acima do nível do orifício, essa descarga é denominada *afogada* ou *submersa*.

Continuando com o tema das classificações relacionadas aos orifícios, porém agora de forma específica do dispositivo e não do escoamento ocorrido neles, pode-se classificá-los sob os seguintes parâmetros: forma geométrica, orientação do orifício em relação à superfície do líquido, tamanho em relação à carga e espessura da parede.

A classificação que leva como parâmetro a forma geométrica do perímetro tem como principais categorias as formas: *circular*, *retangular* e *triangular*.

Já a classificação que leva em consideração a orientação do orifício pode ser *vertical*, *horizontal* ou *inclinado* em relação à superfície do escoamento.

No que se refere à carga sobre o orifício em comparação ao seu tamanho, pode-se classificá-lo em pequeno ou *grande*, sendo que o primeiro seria para uma medida vertical do orifício menor que um terço da carga de líquido acima desse orifício. Para ser mais claro, imagine um orifício na parte inferior da parede lateral de um determinado reservatório. Sabendo que a medida de coluna de água desde o centro do orifício até a superfície livre do reservatório é H , para que esse orifício seja classificado como pequeno, ele deve ter dimensão vertical inferior a $\frac{H}{3}$.

Quanto à espessura da parede, pode ser classificado em *parede fina* ou *delgada* e *grossa* ou *espessa*. Segundo Porto (2006), o que difere nessas duas categorias é o contato do líquido com a superfície interna do orifício, sendo que para se enquadrar na *parede fina*, a *veia líquida* deve ter contato somente com a linha de contorno, perímetro interno. Diferentemente, nos orifícios de parede espessas, o jato adere à superfície interna. No entanto, para que seja considerado orifício, a espessura da parede não deve ultrapassar uma vez e meia a menor dimensão do orifício.

Porto (2006) ainda afirma que dimensões superiores a duas ou três vezes a descarga seriam realizadas por bocal, e não por orifício.

Vazão descarregada pelo orifício

A equação de Bernoulli aplicada a dois pontos pode ser empregada para o cálculo da vazão em orifícios, no entanto, para tal execução, devem ser desconsiderados o efeito de contração do jato e as perdas de carga durante o escoamento através do orifício.

Como se sabe que na prática não se pode desconsiderar esses fatos, a dedução a partir de Bernoulli deve ser acrescida de dados experimentais para seu ajuste.

Partindo do *teorema de Torricelli*, deduzido a partir do teorema de Bernoulli para um orifício vertical, pequeno, em parede fina em um reservatório de grandes dimensões, temos:

$$V_t = \sqrt{2gH}.$$

Em que: V_t = velocidade do jato na saída do orifício.

H = altura desde o centro do orifício até a superfície livre.



Pesquise mais

O capítulo 12, especificamente a partir da p. 353, da obra a seguir, demonstra a dedução do teorema de Torricelli com base no teorema de Bernoulli.

PORTO, R. de M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006. 540p.

Outra referência que demonstra de forma bastante clara a dedução do teorema de Torricelli é o vídeo disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=XTt_FldNXM4> (Acesso em: 8 mar. 2017). Acesso em: 8 mar. 2017.

Devido à perda de carga, desconsiderada no teorema de Torricelli, há redução da velocidade do escoamento, sendo a velocidade real inferior à teórica calculada por este teorema. Dessa maneira, surge o *coeficiente de velocidade*, C_v , cuja ordem de grandeza para orifícios circulares de parede fina é 0,98 (PORTO, 2006).

$$C_v = \frac{V}{V_t}.$$

Em que: V = velocidade real.

V_t = velocidade teórica.

Logo, a velocidade ajustada por este índice pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$V = C_v \sqrt{2gH} .$$

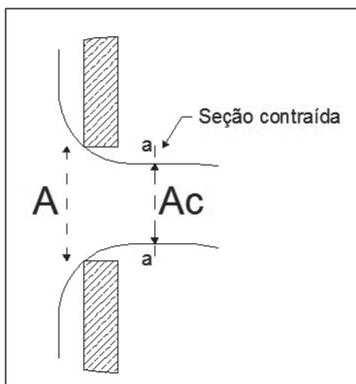
Sabe-se que a vazão pode ser calculada pela multiplicação da velocidade pela área do jato (equação da continuidade). Essa área é inferior à do orifício, pois assim, como se pode notar na Figura 4.1, há contração da área pela configuração da aproximação do líquido. O *coeficiente de contração*, C_c , corrige esse aspecto. O valor médio de C_c é da ordem de 0,62, condicionado pelas dimensões do orifício e da carga H (PORTO, 2006).

$$C_c = \frac{A_c}{A} .$$

Em que: A_c = área da seção contraída.

A = área do orifício.

Figura 4.1 | Seção contraída após passagem pelo orifício



Fonte: adaptada de Porto (2006, p. 352).

Assim, a vazão real é o produto da velocidade real pela área contraída:

$$Q = A_c \times V = A_c \times C_v \sqrt{2gH} .$$

Logo, adaptando para a área do orifício, temos:

$$Q = C_c \times C_v \times A \sqrt{2gH} .$$

Para simplificar a equação, a multiplicação $C_c \times C_v$ é denominada *coeficiente de vazão* ou *descarga*, C_d . Para orifícios circulares de parede fina, seu valor médio é 0,61, variando, com a forma geométrica, as dimensões e o valor da carga H.

Com todas essas operações, surge a equação geral para a vazão descarregada através de um orifício de área A , de pequenas dimensões e parede fina, sujeito a uma carga H , conhecida também como *lei dos orifícios*.

$$Q = C_d \times A \sqrt{2gH} .$$

O coeficiente de vazão pode ser obtido a partir de tabelas apresentadas por diversos autores. Porto (2006) apresenta uma dessas (Quadro 4.1).

Quadro 4.1 | Coeficiente de vazão para orifícios circulares verticais de parede fina

Carga H (m)	Diâmetro do orifício (cm)				
	2	3	4	5	6
0,20	0,653	0,632	0,609	0,607	0,607
0,40	0,651	0,625	0,61	0,607	0,607
0,60	0,648	0,625	0,61	0,607	0,608
0,80	0,645	0,623	0,61	0,607	0,608
1,00	0,642	0,622	0,61	0,607	0,608
1,50	0,638	0,622	0,61	0,607	0,608
2,00	0,636	0,622	0,61	0,607	0,608
3,00	0,634	0,621	0,611	0,607	0,608
5,00	0,634	0,621	0,611	0,607	0,608
10,00	0,634	0,621	0,611	0,607	0,609

Fonte: Netto (1973 apud PORTO, 2006, p. 356).



Exemplificando

Um determinado reservatório de 3,5 m de altura total tem um orifício a 50 cm do solo é circular, pequeno e de parede fina, com 5 cm de diâmetro. Pode-se calcular a vazão de água da seguinte forma:

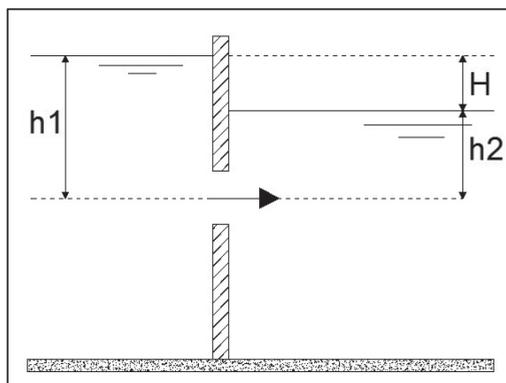
Coeficiente de vazão, C_d , segundo o Quadro 4.1: 0,607

$$Q = C_d \times A \sqrt{2gH} = 0,607 \times (\pi \times (\frac{0,05}{2})^2) \sqrt{2 \times 9,8 \times 3} = 0,009 \text{ m}^3/\text{s} .$$

Para orifícios afogados ou submersos, os quais têm nível d'água a jusante superior à saída do orifício, a fórmula da vazão tem uma pequena adaptação. Sabendo que H é a carga d'água localizada acima no eixo do orifício, quando há um segundo nível d'água (jusante), essa carga é alterada. O nível de referência

passa a ser o nível a jusante, e não o eixo do orifício. Assim, $H = h_1 - h_2$, em que h_1 = medida vertical desde o centro do orifício até a superfície (montante) e h_2 = medida vertical desde a superfície a jusante até a superfície a montante (Figura 4.2).

Figura 4.2 | Carga H para orifício afogado

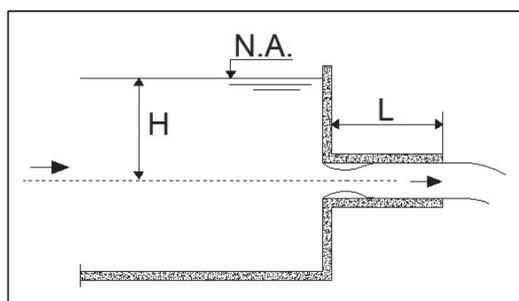


Fonte: adaptada de Porto (2006, p. 360).

Bocais

A definição de orifício de parede espessa limita a espessura dela até uma vez e meia a medida (diâmetro ou sua menor dimensão). Para valores de espessura superiores a duas ou três vezes, são denominados bocais (Figura 4.3).

Figura 4.3 | Bocal externo



Fonte: adaptada de Porto (2006, p. 365).

Com base em deduções a partir do teorema de Bernoulli, e, assumindo o valor médio do coeficiente de contração $C_c = 0,62$, obtém-se o valor de 0,82 para a proporcionalidade da velocidade real V e carga H , resultando na seguinte equação da velocidade (Porto, 2006):

$$V = 0,82\sqrt{2gH} .$$

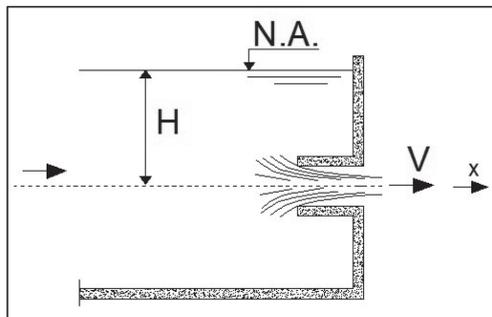
Como se pode notar na Figura 4.3, o jato a jusante do bocal não apresenta seção contraída, ou seja, $C_c = 1$. Assim, a vazão do bocal pode ser calculada pela área do bocal, ou seja, pela seguinte fórmula:

$$Q = 0,82 \times A\sqrt{2gH} .$$

Porto (2006) destaca ainda que: comparando a vazão através do bocal calculada pela fórmula descrita anteriormente com a vazão do orifício de parede fina de mesma área A e sujeita à mesma carga H , com $C_d = 0,61$, verifica-se vazão aproximadamente 34% maior no bocal, apesar de sua perda de carga.

Por outro lado, se o bocal se encontra interno (Figura 4.4) é denominado como *bocal de borda*, e a configuração do jato se altera (PORTO, 2006).

Figura 4.4 | Bocal interno ou de borda



Fonte: adaptada de Porto (2006, p. 369).

Esses bocais devem ter comprimento entre 2 e 2,5 vezes a medida de seu diâmetro. O bocal de borda propicia a formação de jato regular, com contração superior aos orifícios.

Sua fórmula para o coeficiente de velocidade, $C_v = 0,98$, fica $C_c = 0,52$, como $C_d = C_c \times C_v = 0,51$.

$$Q = 0,51 \times A\sqrt{2gH} .$$



Refleta

A introdução de um bocal em determinado orifício altera substancialmente o comportamento do fluxo do escoamento.

O fato de o bocal se encontrar na parte externa do orifício aumenta a vazão, porém, quando instalado na parte interna, a reduz.

Com base nos comentários e nas fórmulas apresentadas, pense nos motivos dessas diferenças.

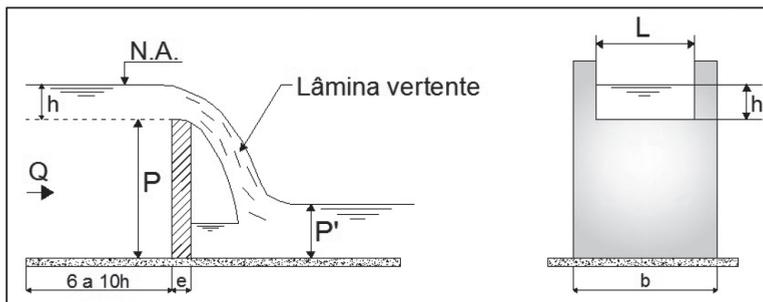
Vertedouro

Os vertedouros são dispositivos utilizados para medir e/ou controlar a vazão em canais ou obras hidráulicas (PORTO, 2006).

Geralmente, são estruturas perpendiculares ao fluxo da corrente, que acumulam água a sua montante até que se atinja o nível suficiente para que escoe por cima da soleira do vertedouro. Isso demonstra claramente que a pressão reinante nesse dispositivo, diferentemente do orifício e bocal, é a pressão atmosférica.

Com base na Figura 4.5, as partes de um vertedor são as seguintes:

Figura 4.5 | Vista do vertedor em corte longitudinal e frontal



Fonte: adaptada de Porto (2006, p. 382).

- *Crista ou soleira*: parte superior da parede que entra em contato com a lâmina d'água vertida.

- *Carga sobre a soleira (h)*: diferença entre o nível d'água a montante e o nível da soleira. A medida do nível d'água deve ser realizada, a montante, a uma distância pelo menos seis vezes o valor de h (Figura 4.5).

- *Altura do vertedor (P)*: medida desde a soleira até o fundo do canal.

- *Largura ou luz da soleira (L)*: medida horizontal perpendicular ao fluxo, na qual ocorre escoamento.

Segundo Porto (2006), esses dispositivos podem ser classificados com base nos seguintes parâmetros:

- Forma geométrica da abertura: *retangular, triangular, trapezoidal, circular e parabólica*.
- Altura relativa da soleira: *descarga livre*, quando $P > P'$; e *descarga submersa* se $P < P'$; ou *seja*, quando o nível d'água de saída for maior que o nível da soleira.
- Natureza da parede: *parede delgada*, quando a espessura desta não ultrapassa dois terços da carga ($e < 2/3 h$); e *parede espessa*, caso seja maior ($e > 2/3 h$).
- Largura relativa da soleira: *sem contrações laterais*, para largura da soleira igual à largura do canal ($L = b$), e *com contração lateral*, se a largura da soleira for inferior a largura do canal ($L < b$).
- Natureza da lâmina: *lâmina livre*, região abaixo da lâmina suficientemente arejada, de modo que a pressão reinante seja a atmosférica; *lâmina deprimida*, se a pressão abaixo da lâmina for inferior à atmosférica; e *lâmina aderente*, quando não há bolsa de ar abaixo da lâmina e esta cola no paramento a jusante.
- Inclinação do paramento da estrutura em relação à vertical: *vertical* ou *inclinado*.
- Geometria da crista: crista *retilínea, circular, poligonal* ou *labiríntica*.



Pesquise mais

Os vertedouros são obras complexas e condicionadas à sua forma, assim, indica-se para aprofundamentos no tema o capítulo 12 da obra a seguir. Ele trata de forma bastante didática das diferentes formas, equações; deduções e algumas possíveis aplicações.

PORTO, R. de M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006. 540p.



Assimile

Há diversas formas de medidas de vazão, sendo que em escoamentos livres (canais), algumas das principais são os orifícios, bocais e vertedores.

Os orifícios são dispositivos submetidos, principalmente, à pressão de determinada carga H . Para ser incluso nessa categoria, a espessura de sua parede não deve ultrapassar uma vez e meia sua menor dimensão. A fórmula que calcula sua vazão é: $Q = C_d \times A \sqrt{2gH}$.

Os bocais são orifícios com a introdução de acessórios, internos ou externos, que tornam sua parede superior a duas ou três vezes sua menor dimensão. A determinação de sua vazão pode ser calculada pelas seguintes fórmulas:

Bocal com acessório externo: $Q = 0,82 \times A\sqrt{2gH}$.

Bocal com acessório interno ou bocal de borda: $Q = 0,51 \times A\sqrt{2gH}$.

Os vertedores são dispositivos instalados, em geral, perpendicularmente ao fluxo de água. Trata-se de uma barreira que tem por objetivo forçar o acúmulo de água à sua montante, extravasando o volume que superar o limite de sua soleira. Suas fórmulas de vazão são mais complexas e condicionadas a diversos fatores.

Assim, encerra-se a Seção 4.1, a qual fez a introdução do tema de hidrometria, abordando alguns dispositivos de medida de vazão. Esses conceitos serão muito úteis na confecção do relatório ao final da unidade, assim como para resolução de problemas cotidianos de um engenheiro.

Sem medo de errar

Os projetos hidráulicos, em geral, dependem de determinações de vazão. Esse parâmetro é de extrema importância para a determinação de outros fatores por ela condicionados.

Como foi reportado a você, há necessidade de um aparato de medição de vazão no trecho que antecede a unidade de coagulação/floculação.

Pensando sobre a situação específica, trata-se de um canal que conduz água desde o desarenador (equipamento que tem como função a retirada de materiais inertes, principalmente areia, da corrente líquida) até a unidade.

Qual processo de medição você adotará? Quais são as vantagens dele frente aos outros?

Com base nos processos apresentados por esta seção, o mais adequado para o cenário seria o vertedouro. O motivo principal é a vazão consideravelmente alta, pois se trata de uma estação de tratamento que abastecerá uma cidade. Isso implicaria em um orifício grande, o que desconsideraria toda a teoria a respeito desse dispositivo. O mesmo ocorreria com o bocal, pois apesar de ter vazão de cerca de 34% superior ao orifício, quando ele for externo ao orifício, isso não será suficiente.

O vertedouro é uma estrutura hidráulica destinada às vazões superiores, condicionada ao seu projeto, além de ter algumas características, como principalmente, por ser aberto à atmosfera e com projeto flexível frente à necessidade de grandes vazões.

O fato de possibilitar um projeto para maiores vazões é a grande vantagem diante dos outros dois métodos, sendo necessário somente um correto dimensionamento do canal e vertedor.

Nas seções subsequentes veremos as calhas, isto é, vertedores adaptados, sendo essa a configuração mais adequada para a função solicitada.

Avançando na prática

Determinação de pequenas vazões

Descrição da situação-problema

As estações de tratamento de água têm canais de diversas dimensões. Há canais principais, pelos quais é conduzida a água a ser tratada, e secundários, no quais passam correntes de menores vazões, que atenderão finalidades específicas dentro da planta. Imagine que durante a mesma reunião em que lhe foi solicitada a escolha do melhor dispositivo para o canal principal, pediram também que você determinasse o melhor método para pequenas vazões. Esse dispositivo poderá ser utilizado em um pequeno canal, que retira uma fração de água do canal principal e a conduz para um sistema de dissolução de compostos químicos. Com base nos dispositivos estudados, qual você indicaria para esse caso? Por quê?

Resolução da situação-problema

Poderia ser empregado nessa situação tanto o orifício quanto o bocal. No caso do bocal de acessório externo, a vazão poderia ser incrementada em 34% se comparado ao orifício, no entanto, todos eles atenderiam a essas condições.

Os orifícios e bocais são dispositivos operados sob a pressão hidrostática (e cinética, se for o caso), por isso, são empregados em pequenas vazões, em geral, situações nas quais se tenha uma carga H considerável a montante. Os vertedouros são indicados para vazões maiores, não sendo condicionados por carga hidráulica; são mais flexíveis nessas questões de maiores vazões.

Faça valer a pena

1. Em hidráulica, pode-se definir como orifício uma abertura de perímetro fechado, de forma geométrica definida, realizada na parede ou no fundo de um reservatório, canal ou conduto (PORTO, 2006).

A respeito das classificações desse dispositivo, analise as sentenças a seguir.

I – Em relação à forma geométrica de seu perímetro, as classificações mais comuns são: circular, linear e triangular.

II – A orientação do orifício em relação à superfície livre do líquido também é classificatória, podendo ser vertical, horizontal ou inclinada.

III – Sua dimensão, comparativamente à carga H na qual está submetido, o classifica como pequeno ou circular.

IV – A espessura da parede pode ser fina ou delgada e grossa ou espessa.

V – Dependendo da pressão a que está submetido, pode-se classificá-lo como orifício de baixa pressão ou alta pressão.

Após analisar as sentenças, assinale a alternativa que apresenta somente as alternativas verdadeiras.

- a) I, II e V.
- b) I, II e III.
- c) II, IV e V.
- d) I, II, III e IV.
- e) II e IV.

2. A vazão que escoar através de determinado orifício é condicionada por diversos fatores, como: a carga de coluna de água acima de seu eixo central; a gravidade; e os fatores relacionados ao comportamento do líquido na aproximação da saída (perda de carga e contração do jato).

Sabendo que a fórmula resultante para o cálculo da vazão de orifícios é

$$Q = C_d \times A \sqrt{2gH}, \text{ determine-a para as seguintes condições:}$$

- Orifício de 3 cm de diâmetro a uma distância de 1 m da superfície d'água.

Dado auxiliar: coeficiente de vazão para 3 cm de diâmetro e 1 m de carga H é 0,622.

Marque a alternativa que apresenta a vazão obtida.

- a) $0,0017 \text{ m}^3/\text{s}$.
- b) $0,0019 \text{ m}^3/\text{s}$.
- c) $0,19 \text{ m}^3/\text{s}$.
- d) $0,017 \text{ m}^3/\text{s}$.
- e) $0,018 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.



Quando se pretende dirigir o jato e alterar o coeficiente de vazão de um orifício, adiciona-se ao orifício certo comprimento de tubo. Esse dispositivo é chamado de bocal ou tubo adicional, e é caracterizado por ter comprimento L variando entre $1,5D$ e $5D$, em que D é o diâmetro do orifício (PORTO, 2006, p. 365).

A adição de bocal em um orifício altera sua vazão, podendo ser para mais, caso essa inclusão seja externa, ou menos, caso seja interna. Sabendo que as fórmulas utilizadas para o cálculo da vazão em bocal externo e interno são $Q = 0,82 \times A\sqrt{2gH}$ e $Q = 0,51 \times A\sqrt{2gH}$, respectivamente, calcule a diferença de vazão, utilizando as duas fórmulas, se aplicada a seguinte condição:

- Orifício de 3 cm, comprimento do bocal de 6 cm e 1 m de carga H .

Marque a alternativa que apresenta o valor, em módulo, da diferença entre as vazões em m^3/hora .

- a) $3,0 \text{ m}^3/\text{h}$.
- b) $6,2 \text{ m}^3/\text{h}$.
- c) $4,5 \text{ m}^3/\text{h}$.
- d) $5,7 \text{ m}^3/\text{h}$.
- e) $3,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

Seção 4.2

Medidores

Diálogo aberto

Todos os equipamentos e processos utilizados para manejar os escoamentos de água em tubulações são mais próximos da nossa realidade do que aqueles utilizados para os canais. Isso ocorre porque convivemos com eles em nossas casas. Conhecemos a determinação de vazão em tubulações através do hidrômetro residencial, mas ela não se resume à aplicação desse medidor. Há diversos outros tipos de medidores, sendo cada um deles mais adequado a uma situação. Por conta dessa variedade de modelos, a equipe de projetos que você integra como engenheiro está com problemas para determinar o medidor mais adequado para a tubulação de saída da ETA. Durante a reunião semanal, você é indagado sobre as seguintes questões:

Você implantaria um hidrômetro nessa situação? Por quê?

Qual seria o medidor mais adequado? Por quê?

Após estudar esta seção, você conhecerá os principais modelos de medidores, tendo assim conhecimento suficiente para responder a estas questões e continuar a confecção do relatório técnico solicitado ao final da unidade. Para tal relatório, os conhecimentos de medição de vazão e velocidade em tubulação serão de grande importância, possibilitando a descrição dos modelos de medidores e das condições mais adequadas para cada um deles.

Animado para conhecer os principais medidores empregados em tubulação? Você verá que o hidrômetro da sua casa é somente um deles!

Não pode faltar

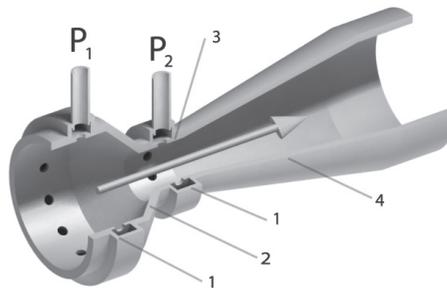
A hidrometria foi introduzida em nossos estudos pela seção anterior (4.1), ressaltando a importância do tema para obras hidráulicas em geral. De forma específica, ela abordou os processos de medição de vazão e velocidade para os condutos livres, destacando os orifícios, bocais e vertedores.

A Seção 4.2 dará continuidade no tema, no entanto, voltando os processos de medida de vazão e velocidade para os escoamentos forçados. Os principais modelos de medidores utilizados para tais procedimentos serão descritos nesta seção, sendo eles: Venturi, diafragma, medidor magnético, fluxômetro e hidrômetro.

Venturi

Segundo Netto et al. (1998), o Venturi, ou tubo de Venturi, é um aparato desenvolvido por Clemens Herschel, em 1881. Porém, seu nome é uma homenagem a Giovanni Battista Venturi, por ele ter sido o primeiro a fazer experimentações com tubos divergentes. Sua função é medir a velocidade e, conseqüentemente, a vazão de fluidos incompressíveis (Figura 4.6).

Figura 4.6 | Esquema em corte do tubo Venturi. 1. Canais unificados de tomada de pressão; 2. Região convergente; 3. Seção de diâmetro reduzido; 4. Região divergente; P1 e P2 – tomadas de pressão



Fonte: <<https://goo.gl/TXwVzy>>. Acesso em: 8 mar. 2017.

A Figura 4.6 demonstra como é constituído o aparato, sendo que a seta aponta o sentido do fluxo.

O princípio de funcionamento do tubo de Venturi é submeter determinado escoamento a uma maior seção de tubulação (área 1) e logo a uma seção contraída (de diâmetro inferior – área 3). Além das medidas das seções serem conhecidas, em cada uma delas há uma tomada de pressão (P1 e P2). Seu funcionamento está justamente na relação de velocidade e pressão entre esses dois pontos.

Como vimos na equação de Bernoulli, o valor da energia contida em determinado escoamento em um ponto qualquer é a somatória das três formas de energia: carga de pressão; topográfica ou geométrica e cinética. Sabe-se que o líquido escoado é incompressível e o fluxo permanente, e pela equação da continuidade, para que um mesmo volume de líquido passe pela seção de diâmetro reduzido, deverá haver aumento da velocidade. Para que se mantenha a somatória final de energia (desconsiderando as perdas de carga por atrito, pelo fato de serem pontos muito próximos), a carga de pressão deverá diminuir, haja vista a não variação da carga geométrica.

Quando o criador desse aparato o criou, a ideia era justamente o contrário: provar que a redução da seção causaria um aumento da pressão, ideia refutada pelos resultados.

O tubo de Venturi pode ser utilizado para medições de velocidade e vazão em tubulações sob pressão simplesmente aplicando os dados coletados às fórmulas de Bernoulli e continuidade.



Exemplificando

No laboratório de hidráulica há um tubo Venturi instalado em uma determinada tubulação. Sabe-se que a seção estrangulada tem 10 cm de diâmetro e a seção maior do Venturi é coincidente a medida da tubulação (20 cm). Ligado a esse aparato há um manômetro duplo, o qual marca 9000 e 3000Pa para as seções maior e menor, respectivamente. Assim, podemos determinar a velocidade e vazão do escoamento.

$$Q = v \times A$$

$$v_1 \times A_1 = v_2 \times A_2 \rightarrow v_1 = \frac{v_2 \times A_2}{A_1}$$

$$A_1 = \pi \times \left(\frac{0,2}{2}\right)^2 = 0,0314m^2$$

$$A_2 = \pi \times \left(\frac{0,1}{2}\right)^2 = 0,00785m^2$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \rightarrow Z_1 = Z_2$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \rightarrow \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\left(\frac{v_2 \times A_2}{A_1}\right)^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

$$= \frac{9000}{10000} + \frac{\left(\frac{v_2 \times (0,00785)}{0,0314}\right)^2}{2(9,8)} = \frac{3000}{10000} + \frac{v_2^2}{2(9,8)}$$

$$0,9 + \frac{(0,25v_2)^2}{19,6} = 0,3 + \frac{v_2^2}{19,6} \rightarrow 0,6 = \frac{v_2^2}{19,6} - \frac{0,0625v_2^2}{19,6}$$

$$0,9375v_2^2 = 0,6 \times 19,6 \rightarrow v_2^2 = 12,544 \rightarrow v_2 = \sqrt{12,544} \rightarrow v_2 = 3,54 \text{ m/s}.$$

É importante distinguir a seção maior (diâmetro da tubulação) da estrangulada. Para o cálculo da velocidade e da vazão do escoamento, os valores utilizados devem ser referentes à seção da tubulação, pois é nela que há o escoamento nas condições normais.

$$v_1 = \frac{v_2 \times A_2}{A_1} = \frac{3,54 \times 0,00785}{0,0314} = 0,89 \text{ m/s}.$$

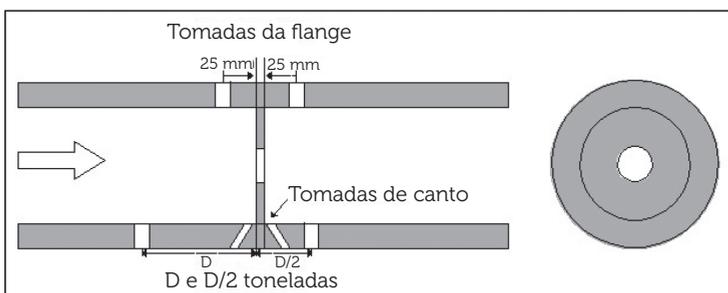
$$Q_1 = v_1 \times A_1 = 0,89 \times 0,0314 = 0,027946 \text{ m}^3/\text{s} \text{ ou } 27,9 \text{ l/s}.$$

Quando comparado a outros modelos de medidores, o Venturi tem elevado custo de implantação, porém, reduzida perda de carga, o que proporciona menor custo operacional (FOX et al., 2015).

Diafragma

O diafragma, também conhecido como tubo de diafragma ou placa de orifício (Figura 4.7), assim como o tubo Venturi, é um equipamento deprimogênio. Isso significa que a medida da vazão do fluxo é calculada com base no diferencial de pressão ocasionado.

Figura 4.7 | Diafragma em corte e as diferentes posições para as tomadas de pressão



Fonte: adaptada de Fox et al. (2015, p. 390).

Trata-se de uma placa com um orifício, centralizado ou não, instalada perpendicularmente ao fluxo. Assim como se pode verificar na Figura 4.7, assemelha-se ao Venturi pelo fato de restringir a seção e ter tomadas de pressão, no entanto, também remete a outro processo de medida de vazão: o orifício, apresentado na seção anterior.



Refleta

No caso de aplicação de diafragma em escoamentos com considerável quantidade de sólidos em suspensão, pode ser que ocorra a sedimentação destes na parte na qual antecede a placa. Isso pode impedir a correta tomada de pressão, além de outros efeitos hidrodinâmicos do fluxo.

Destacado esse ponto, você acha que poderia ser utilizada uma placa com orifício descentralizado, especificamente nesse caso, situada abaixo do centro, para evitar esse acúmulo? Por quê?

De forma bastante simplificada, sua equação de cálculo de vazão pode ser obtida por analogia ao processo de medida citado (orifício).

A fórmula do cálculo de vazão dos orifícios é $Q = C_d \times A \sqrt{2gH}$. Porém sabemos que esse processo tem como força motriz, por assim dizer, a pressão promovida pela coluna de água localizada acima de seu eixo central, representada na fórmula pelo fator H.

Para o diafragma, pode-se verificar na Figura 4.7 que há um segundo nível de pressão, medido logo após a passagem da placa. Assim como ocorre com o orifício afogado, a pressão que atua no aparato não é a pressão 1 (ou coluna d'água), e sim a diferença entre a pressão 1 e pressão 2 (altura d'água 1 e 2, no caso do orifício afogado).

Assim, a fórmula da vazão resultaria na seguinte:

$$Q = C_d \times A \sqrt{2g \left(\frac{P_1 - P_2}{\gamma} \right)}.$$

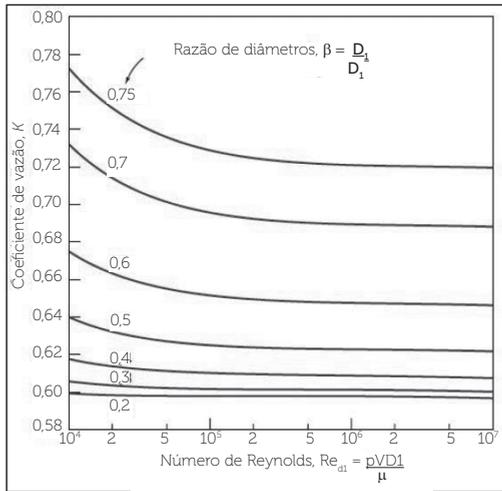
Porém, há outra alteração que deve ser realizada pelas características do comportamento do diafragma. Surge assim o *coeficiente funcional do dispositivo (K)*, o qual simplifica vários fatores complexos específicos da forma do dispositivo.

$$K = \frac{C_d}{\sqrt{\alpha_2 - \alpha_1 \times C_c^2 \left(\frac{A}{A_1} \right)^2}}.$$

Portanto, a equação final para esse tipo de medidor é: $Q = K \times A \sqrt{2g \frac{(P_1 - P_2)}{\gamma}}$.

A determinação do coeficiente funcional (K) pode ser obtida em manuais ou normas específicas para cada configuração de diagrama. A Figura 4.8 apresenta uma tabela para obtenção desse coeficiente para diagrama com tomada de pressão no canto, em função do número de Reynolds e da relação de diâmetros.

Figura 4.8 | Coeficiente K para diagrama com tomada de canto e orifício concêntrico



Fonte: Fox et al. (2015, p. 391).

Para Fox et al. (2015), as principais vantagens do diafragma são seu baixo custo e sua fácil instalação ou reposição. No entanto, destacam-se também suas desvantagens: capacidade volumétrica limitada e elevada perda de carga.

Medidor magnético

O medidor magnético tem a lei de Faraday como princípio básico: *a velocidade na qual determinado condutor se move é proporcional à tensão induzida por este em movimento reto através de um campo magnético.*

Eles podem ser aplicados aos mais diversos fluidos, tendo como única condição a existência de condutividade mínima, variável para cada modelo. Em outras palavras, pode-se dizer que sua aplicação não seria confiável em águas isentas de sais e compostos, como oriundas de osmose reversa, deionizadas e outras que passaram por tratamentos desse mesmo nível de purificação.

De forma simplificada, pode-se afirmar que o medidor magnético (eletromagnético) gera, por meio de ímãs ou bobinas situadas em ângulo reto com o fluxo, campo magnético na seção da tubulação. Isso causa uma separação das partículas do líquido por carga elétrica. Isso é mensurado por dois eletrodos capazes de fazer esse reconhecimento, dispostos em regiões opostas da mesma seção.



Pesquise mais

O vídeo a seguir exemplifica o funcionamento do medidor eletromagnético. Note a formação do campo magnético pelas bobinas e a mensuração das tensões pelos eletrodos situados perpendicularmente às bobinas.

MEDIDOR de vazão - eletromagnético. Vinícius RM, 2015. Vídeo do YouTube. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=-XD0LmJyYJQ>>. Acesso em: 8 mar. 2017.

Esses medidores são muito utilizados na indústria, pois possibilitam medidas precisas, não causam perda de carga no escoamento e evitam possíveis contaminações, além de não haver restrição quanto aos líquidos corrosivos e/ou tóxicos.

Fluxômetro

Este modelo de medidor é geralmente empregado em medições de vazões gasosas. O exemplo mais comum com o qual estamos acostumados trata-se daqueles utilizados na saída de cilindros de gás comprimido.

De funcionamento bastante semelhante, temos o *rotâmetro*, que, assim como o fluxômetro, é um medidor de área variável ou de flutuador.

O princípio de funcionamento desses dois medidores é a sustentação de um corpo móvel, presente na parte interna do equipamento, pelo fluxo do fluido aplicado.

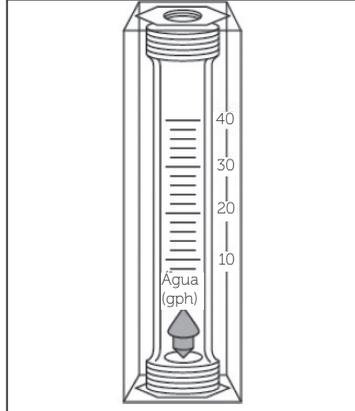
Esses equipamentos fornecem leituras diretas, ou seja, a parte externa deles é transparente e graduada, sendo a leitura feita com base na altura na qual o corpo flutuante interno se estabiliza. Essa estabilização ocorre pelo equilíbrio entre a força peso e o arraste promovido pelo movimento do líquido.

Por esse princípio de funcionamento, esses medidores devem sempre ser instalados na vertical, com fluxo de fluido no sentido ascendente.

Outras desvantagens desses medidores são o fato de serem calibrados para determinado fluido, não podendo ser utilizados para outros que não aquele para o qual foi dimensionado. Em geral, são também limitados às pequenas vazões.

Apesar de serem mais utilizados em equipamentos médicos, há modelos com aplicações hidráulicas (Figura 4.9).

Figura 4.9 | Representação de rotâmetro hidráulico utilizado para água



Fonte: Fox et al. (2015, p. 397).

Hidrômetro

Assim como o fluxômetro, o hidrômetro é um equipamento de medida de vazão linear, o que significa que o parâmetro de saída é diretamente proporcional à vazão, diferentemente dos medidores de restrição de seção, os quais têm a variação de pressão como saída, o que não tem relação linear com a vazão (FOX et al., 2015).

Tecnicamente incluso na categoria de medidores de *turbina*, o hidrômetro é composto de diversas partes. De forma simplificada, pode-se destacar a turbina, movida pelo fluxo da água ao atravessar o aparelho; as engrenagens, localizadas acima da turbina; e a parte registradora, na qual visualizamos o registro da vazão.

Há hidrômetros com diversas capacidades de medidas, e são comumente utilizados pelas concessionárias de fornecimento de água para controle do volume consumido pelos seus consumidores, tanto residenciais quanto comerciais e industriais. Além das vazões máximas admitidas, outro fator que deve ser levado em consideração é a especificação para aplicações em água fria ou quente, pois os materiais empregados em sua construção são específicos e limitantes a esses aspectos.

A principal vantagem do hidrômetro é o fato de ele registrar o volume total de forma bastante simples, independentemente do espaço de tempo ocorrido. Isso descarta a necessidade de leituras frequentes do equipamento.



Pesquise mais

O material a seguir demonstra o funcionamento do hidrômetro utilizado em nossas casas. Ele apresenta um hidrômetro em corte, explicando, de forma bastante didática, as partes que o compõe.

ENTENDA o funcionamento do hidrômetro de sua casa. Águas Guariroba, 2013. Vídeo do YouTube. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=S0qTBCiLgM8>>. Acesso em: 8 mar. 2017.



Assimile

Os medidores de vazão empregados em escoamentos forçados são de grande importância para controle de vazão e volume. Alguns dos principais foram descritos nesta seção.

Venturi: medidor de vazão com restrição de seção, para o qual a relação da variação de pressão e do aumento da velocidade são as bases de seus cálculos de vazão. Para esse cálculo, não há fórmula determinada, deve-se aplicar os dados à equação de Bernoulli e continuidade.

Diafragma: assim como o Venturi, seus cálculos baseiam-se na variação de pressão e velocidade, no entanto, apresentam maior perda de carga do que este outro. Trata-se de uma placa com orifício, instalada perpendicularmente ao fluxo de escoamento. Para o cálculo de sua vazão,

deve-se aplicar a seguinte fórmula:
$$Q = K \times A \sqrt{2g \frac{(P_1 - P_2)}{\gamma}}$$

Medidor magnético: há formação de campo eletromagnético, o qual provoca a geração de tensão no líquido ao separar suas partículas de diferentes cargas elétricas. Sua principal vantagem é a perda de carga nula.

Fluxômetro: trata-se de medidor vertical, transparente, com parte móvel "flutuante". Seu funcionamento é baseado no equilíbrio da força peso, gerada pela parte flutuante, e força de arraste, causada pelo fluxo do fluido. É utilizado para pequenas vazões.

Hidrômetro: medidor de turbina que, além de medir a vazão, registra o volume acumulado. É muito utilizado por concessionárias responsáveis pelo abastecimento de água tratada.

Esses cinco medidores podem ser considerados os mais populares. Agora, você é capaz de tratar do tema com propriedade.

Assim, concluímos a Seção 4.2, destinada à abordagem dos medidores de vazão em escoamentos forçados. Isso possibilitará a você a capacidade de lidar com o tema, definindo as melhores condições para aplicação de cada um deles. O relatório técnico desta unidade solicita justamente essa discussão, sendo que a seção anterior explanou sobre os escoamentos livres, e esta, os escoamentos forçados.

Sem medo de errar

A determinação da vazão escoada por uma determinada tubulação é um fator de suma importância em ambientes industriais e domésticos. Apesar de estarmos em contato com o hidrômetro residencial, os modelos de medidores não se resumem somente a ele. Há diversos outros tipos, sendo cada um deles mais adequado a uma situação. Por conta dessa variedade de modelos, a equipe de projetos que você integra como engenheiro está com problemas para determinar o medidor mais adequado para a tubulação de saída da ETA. Durante a reunião semanal, você é indagado sobre as seguintes questões:

Você implantaria um hidrômetro nessa situação? Por quê?

Qual seria o medidor mais adequado? Por quê?

O hidrômetro poderia ser um dos métodos aplicados no cenário descrito. Mas além de verificar a existência de hidrômetros que operam sob a faixa de vazão de água tratada que sairá da ETA, deve-se realizar uma análise de custo frente a outras possibilidades.

Há outros métodos que poderiam ser utilizados nesse caso, sendo que um sistema de sensores e computador poderia resultar em medidor de volume acumulado com pequena margem de erro.

O tubo Venturi é uma dessas alternativas. Além de ter estrutura mais simplificada que o hidrômetro, garantiria uma menor perda de carga e, possivelmente, menor custo de implantação.

O diafragma também poderia ser aplicado nesse caso. A vantagem seria o menor custo de implantação, porém, haveria uma elevada perda de carga.

O medidor magnético poderia ser utilizado nesse caso, pois a água tratada, clorada e fluoretada atenderá à condutividade mínima necessária. Um dos pontos positivos desse equipamento seria o fato de não haver perda de carga, o que reduziria o custo de operação (energia de recalque).

O fluxômetro não seria a melhor opção, pois suas características não permitem sua aplicação a grandes vazões.

Dessa maneira, pode-se concluir que as possíveis opções para esse caso seriam, em ordem de melhor adequabilidade: medidor magnético, Venturi, diafragma e hidrômetro. A escolha do melhor estaria condicionada a outros fatores, como custo de implantação e operação.

Avançando na prática

Condições adequadas a cada medidor

Descrição da situação-problema

Sabendo da importância da medição de vazão em escoamentos forçados, deve-se destacar que o atendimento das condições adequadas de cada um dos possíveis modelos de aparato é muito importante. Assim, durante uma reunião da equipe de projetos da qual você faz parte, um dos engenheiros solicitou a você a descrição das condições ideais de alguns medidores, a fim de confeccionarem uma lista que facilitaria a escolha do melhor deles, segundo as características do ponto da instalação.

Os medidores a serem incluídos na lista são: tubo Venturi, diafragma, medidor magnético, fluxômetro e hidrômetro. Quais devem ser os critérios que melhor se adequam a cada um desses modelos?

Resolução da situação-problema

Tubo Venturi: esse medidor não tem limitação de vazão, devendo somente ser dimensionado para tal. Sobre as características da água, também não há restrição, além de ter custo de instalação elevado, mas pequena perda de carga, o que reduz seu custo operacional.

Diafragma: assim como o tubo Venturi, não há restrição de vazão ou característica da água. Tem custo de implantação baixo, porém, elevada perda de carga, o que eleva o custo operacional.

Medidor magnético: de forma geral, não tem limitação de vazão. As características físico-químicas da água devem proporcionar determinadas condutividades mínimas específicas para cada configuração de medidor. O custo de instalação é considerável, e envolve equipamentos eletroeletrônicos. Não há perdas de carga, o que proporciona a redução do custo operacional, apesar de utilizar energia elétrica.

Fluxômetro: empregado para pequenas vazões, além de haver restrição quanto à elevada cor verdadeira e/ou aparente. Como se trata de leitura direta, isso poderia dificultar seu uso. Por referir-se a equipamento simples, não tem um custo de

implantação elevado. Há considerável perda de carga, o que pode onerar os custos de operação.

Hidrômetro: apesar de não haver restrições técnicas, esse equipamento é mais utilizado para pequenas vazões. A presença de sólidos pode danificar a turbina, assim como reduzir sua vida útil. Além disso, tem custo de implantação e perda de carga consideráveis.

Faça valer a pena

1.



A maioria dos medidores de restrição de área para escoamentos internos baseia-se no princípio da aceleração da corrente fluida através de alguma forma de bocal. A ideia é que a variação na velocidade leva a uma variação na pressão (FOX et al., 2015, p. 387).

A respeito dos medidores de vazão do tipo tubo Venturi e diafragma, analise as seguintes afirmações:

- I. O diafragma tem custo de implantação mais elevado do que o tubo de Venturi, pois sua estrutura física é mais complexa.
- II. A perda de carga do medidor diafragma é a menor dentre todos os outros modelos disponíveis.
- III. O tubo Venturi e o diafragma são considerados deprimogênios pelo fato de realizarem a medida de vazão em comparação à alteração da pressão.
- IV. A perda de carga no tubo Venturi é muito reduzida por causa de suas partes convergente e divergente.
- V. O custo operacional do diafragma é menor do que o do tubo Venturi pelo fato de ter menor perda de carga.

Agora, marque, dentre as alternativas a seguir, aquela que apresenta as afirmações verdadeiras.

- a) I, II, III e IV.
- b) II, III e IV.
- c) I, III e V.
- d) III e V.
- e) III e IV.

2. Os medidores Venturi ou tubos de Venturi são, em geral, fundidos e usinados com pequena tolerância às variações, o que, em precisão, no entanto, os torna pesados, volumosos e caros. A seção do difusor cônico a jusante da garganta (área de seção reduzida) proporciona excelente recuperação de pressão, o que resulta em perda de carga total baixa. Outra característica do medidor Venturi é ser autolimpante, por ter um contorno interno muito liso (FOX et al., 2015).

Há, em determinada tubulação de água, um tubo Venturi instalado. Sabe-se que sua seção estrangulada tem área de $0,15 \text{ m}^2$ e a seção maior, $0,25 \text{ m}^2$. Ligado a esse aparato há um manômetro diferencial, ou seja, aponta a diferença entre as duas pressões medidas. Esse instrumento marca 5500 Pa .

Dado auxiliar: $\gamma = 10000 \text{ N} / \text{m}^3$.

Marque a alternativa que apresenta o valor da vazão escoada pela tubulação.

- a) $4,1 \text{ m}^3/\text{s}$.
- b) $2,46 \text{ m}^3/\text{s}$.
- c) $0,615 \text{ m}^3/\text{s}$.
- d) $0,41 \text{ m}^3/\text{s}$.
- e) $6,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

3. A placa de orifício ou diafragma tem geometria simples, o que proporciona baixo custo e facilidade de instalação e/ou reposição. A borda do orifício deve permanecer sempre limpa, não havendo incrustamento de sólidos ou matéria em suspensão. As principais desvantagens desse medidor são sua capacidade limitada e elevada perda de carga permanente (FOX et al., 2015, p. 391).

Sabendo que a fórmula para a determinação da vazão em medidores diafragma é $Q = K \times A \sqrt{2g \frac{(P_1 - P_2)}{\gamma}}$, determine a vazão para as condições a seguir.

Diafragma de orifício de 10 cm de diâmetro, instalado em tubulação de diâmetro de $20'$ (50 cm), o que resulta em $\beta = \frac{D_i}{D_1} = 0,2$. As pressões medidas antes e depois da placa é 14500 e 2500 Pa .

Dados auxiliares: para $\beta = 0,2$, $K = 0,6$.

$$\gamma = 9800 \text{ N} / \text{m}^3 .$$

Marque a alternativa que apresenta o valor obtido para a vazão.

- a) $0,53 \text{ m}^3/\text{s}$.
- b) $0,32 \text{ m}^3/\text{s}$.
- c) $0,032 \text{ m}^3/\text{s}$.
- d) $0,43 \text{ m}^3/\text{s}$.
- e) $0,023 \text{ m}^3/\text{s}$.

Seção 4.3

Hidrometria aplicada

Diálogo aberto

Sabendo da importância da determinação da vazão em unidades hidráulicas, principalmente no caso de uma ETA, o tema foi pauta de uma reunião extraordinária da equipe de projetos que você integra.

Após conversas e explicações, o engenheiro-chefe solicitou a você um método de medição de vazão na entrada da ETA, pois, segundo ele, é o melhor lugar para se calcular a quantidade de água que está sendo tratada, além de ser um importante dado técnico para a unidade.

Após estudar as possibilidades, você sugere a implantação de uma calha Parshall. Quais são as razões para essa escolha?

Responder a esta questão fará com que você desenvolva o raciocínio conclusivo desta seção, item importante em sua vida profissional como engenheiro e na execução do relatório desta unidade.

Mãos à obra!

Não pode faltar

A Unidade 4 está abordando a hidrometria, área relacionada à medição de velocidade e vazão de escoamentos.

A Seção 4.1 tratou das medidas de vazão (e de forma indireta, velocidade) em escoamentos forçados. Destacou a importância do tema para unidades hidráulicas, além de discorrer sobre os seguintes métodos: orifícios, bocais e vertedores.

Por outro lado, a Seção 4.2 apresentou alguns medidores de vazão aplicados aos escoamentos forçados, sendo eles: tubo Venturi, diafragma, medidor magnético, fluxômetro e hidrômetro. Esta descreveu a parte deste tema com o qual mais estamos em contato, pois toda a água que utilizamos em nossa residência é encaminhada por tubulações sob pressão e quantificada por um hidrômetro ao adentrar em nossas casas.

Esta última seção (4.3) abordará o tema da hidrometria de forma mais objetiva, com o intuito de expor o conhecimento de forma mais aplicada. Ela tratará de três medidores de velocidade: flutuador, tubo de Pitot e molinete, além do medidor de vazão denominado calha Parshall.

Flutuador

Esse medidor, ou melhor, essa técnica de medida de vazão, é considerada indireta por necessitar de alguns conhecimentos básicos do processo, além de ser manual (CARVALHO, 2008).

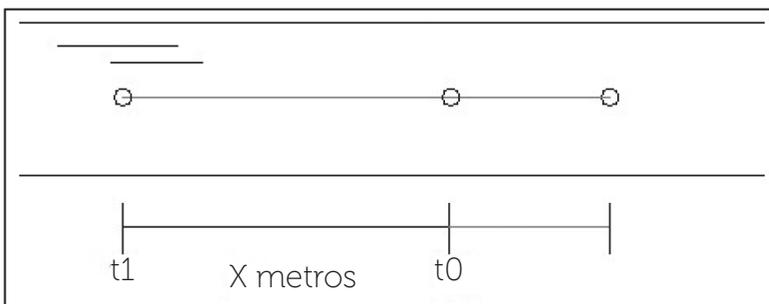
Trata-se do cálculo do tempo gasto para que um recipiente “flutuador” percorra determinada distância em um canal específico.

O elemento utilizado como flutuador pode ser uma garrafa plástica com uma quantidade de água que a faça emergir a maior parte de seu corpo, mantendo, assim, a velocidade do escoamento (caso esteja vazia, pode haver grande influência da corrente de ar, alterando a velocidade do frasco). Outros elementos que também podem ser utilizados são lâmpadas incandescentes, assim como saco plástico inflado e com determinada quantidade de água (mesmo caso da garrafa plástica).

O local escolhido deve ser retilíneo, sem influência de curvas do canal ou quedas d’água.

O procedimento, de forma resumida, é a tomada de tempo que o flutuador leva para percorrer determinada distância (conhecida e determinada previamente), sendo abandonado a certa distância antecedente ao ponto inicial, para que adquira a velocidade do escoamento (Figura 4.10).

Figura 4.10 | Esquema simplificado da técnica do flutuador para determinação de velocidade de escoamentos livres



Fonte: elaborada pelo autor.

Sabendo o tempo gasto e a distância percorrida, utilize a fórmula básica da velocidade:

$$v(m/s) = \frac{\text{distância}(m)}{\text{tempo}(s)}$$

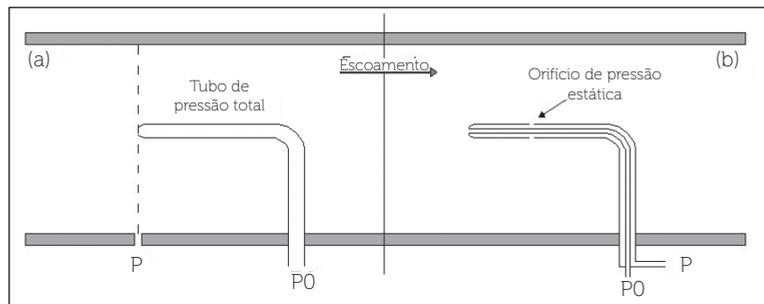
Esta técnica deve ser utilizada somente em casos de estimativa de vazão ou caso não haja alternativa, justamente pela sua baixa precisão.

Tubo de Pitot

Seu nome é uma homenagem ao engenheiro francês Henri Pitot, pesquisador que dedicou parte dos seus estudos ao tema da velocidade de fluidos.

Trata-se de um aparato simples (Figura 4.11), que determina a velocidade do escoamento a partir da diferença de pressão.

Figura 4.11 | Esquema de dois tipos diferentes de tubo de Pitot



Legenda: (a) tubo de pressão total com tomada de pressão estática na parede; (b) tubo de Pitot-estática

Fonte: adaptada de Fox et al. (2015, p. 245).

O princípio de funcionamento desse medidor de velocidade é o fato de haver três possíveis apresentações da pressão: estática, de estagnação (ou total) e dinâmica.

A pressão estática é a medida da pressão utilizada na equação de Bernoulli, ou seja, é a pressão piezométrica do escoamento. Essa pressão é aquela que não tem influência da movimentação do fluido. No caso da Figura 4.11, a pressão estática é medida na parede (a) ou na lateral do Pitot (b), sendo representada por P.

A pressão de estagnação é a total, ou seja, a pressão estática acrescida da oriunda da movimentação do fluido (pressão dinâmica). Na mesma figura, a

pressão de estagnação é medida no orifício que intercepta o escoamento, em ambas as configurações, sendo representada por P_0 .

A pressão dinâmica, como o próprio nome diz, é aquela oriunda da movimentação do escoamento. É obtida pela diferença da pressão de estagnação (P_0) e estática (P).

A aplicação de Bernoulli para essa situação resulta na equação utilizada para o cálculo da velocidade.

$$v = \sqrt{\frac{2(P_0 - P)}{\rho}}$$

Em que: v = velocidade.

P_0 = pressão de estagnação ou total.

P = pressão estática.

ρ = massa específica do fluido escoado.

Molinete

Molinete hidrométrico ou correntômetro de hélice é um velocímetro, em geral, em forma de torpedo, utilizado para medir a velocidade de escoamentos em canais (incluindo corpos hídricos) (CARVALHO, 2008).

Geralmente, é composto por um corpo e por uma haste metálica, além de uma hélice, a qual converte o movimento linear da corrente de água interceptada em movimento de rotação de seu eixo.

Há diversos modelos, sendo que alguns deles são conectados a softwares específicos, resultando na velocidade pontual. Outros modelos somente têm um contador de voltas, sendo necessária a utilização da "equação do molinete" fornecida pelo fabricante (CARVALHO, 2008).

Como apresentado na Unidade 3, os canais não têm distribuição de velocidade regular, sendo que um dos sentidos da variação da velocidade é horizontal (das bordas ao eixo longitudinal). Outro sentido de variação da velocidade é em seu perfil vertical, o que significa que há diferença da velocidade condicionada à profundidade. Para determinar a velocidade média do escoamento utilizando o molinete, deve-se planejar diferentes tomadas de velocidades, distribuídas sem diferentes pontos transversais (Quadro 4.2), assim como em diferentes profundidades da seção (Quadro 4.3).

Quadro 4.2 | Pontos de medida de velocidade segundo a profundidade do canal

Profundidade do canal (m)	Número de pontos	Profundidade do ponto em relação a total
0,15 a 0,60	1	0,6
0,60 a 1,20	2	0,2 e 0,8
1,20 a 2,00	3	0,2; 0,6 e 0,8
2,00 a 4,00	4	0,2; 0,4; 0,6 e 0,8
> 4,00	6	0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 e fundo

Fonte: Gomes e Santos (2003 apud CARVALHO, 2008, p. 79).

Quadro 4.3 | Distância dos pontos de medida de velocidade segundo a largura do canal

Largura do canal (m)	Distância entre as seções verticais (m)
< 3	0,3
3 a 6	0,5
6 a 15	1
15 a 30	2
30 a 50	3
50 a 80	4
80 a 150	6
150 a 250	8
> 250	12

Fonte: Gomes e Santos (2003 apud CARVALHO, 2008, p. 80).



Pesquise mais

O vídeo indicado a seguir apresenta o molinete hidrométrico, detalhando cada um dos seus componentes e suas possíveis formas de registrar os dados. O material está em espanhol, porém, por ser bastante didático e autoexplicativo, não será um problema a questão do idioma.

HIDALGO, J. **Molinete hidráulico monitorado con una DAQ NI USB 6009**. 2015. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=GMiVRp61dDc>>. Acesso em: 8 mar. 2017.

Outra obra científica que aborda o tema é o artigo intitulado *Técnicas de medição de vazão por meios convencionais e não convencionais*, de Carvalho (2008). Este trata de diversos métodos de medida, sendo o molinete hidrométrico um deles.

Disponível em: <https://scholar.google.com.br/citations?view_op=view_citation&hl=pt-BR&user=v3AyKCMAAAAJ&citation_for_view=v3AyKCMAAAAJ:TQgYirikUclC>. Acesso em: 8 mar. 2017.

Calha Parshall

A calha Parshall é possivelmente o aparato mais empregado nas medições de vazão em canais. Seu nome homenageia seu criador, o engenheiro estadunidense Ralph Leroy Parshall.

Esse dispositivo faz parte do grupo dos medidores de regime crítico. O que ocorre na calha é a concentração da corrente de água pelo formato convergente de sua parte inicial e/ou elevação de fundo e, posteriormente, a passagem do escoamento pelo regime crítico, o que garante a simplificação do processo de medida.

Para Netto et al. (1998), as vantagens dos medidores de regime crítico são: facilidade de execução, necessidade de uma só determinação de carga (diferentemente do tubo Venturi e diafragmas que necessitam de duas), perda de carga reduzida e a não existência de obstáculos capazes de formar depósitos em seu interior.



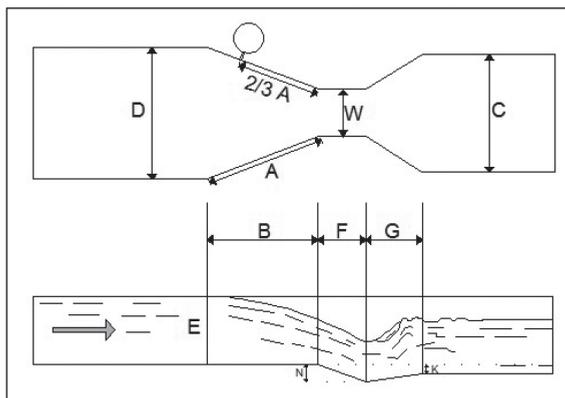
Pesquise mais

A calha Parshall também é utilizada para outros fins, como controle da velocidade e dispositivo de mistura rápida em unidades de tratamento de água. O material indicado a seguir discorre, de forma geral, sobre esse aparato, além de tratar com detalhes este último uso citado.

FERNANDES, C. **Medidores Parshall**. Disponível em: <<http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/PARSHALL.html>>. Acesso em: 8 mar. 2017.

A calha Parshall (Figura 4.12), por ser bastante popularizada, já tem medidas padronizadas (Quadro 4.4), fato este que facilita seu dimensionamento.

Quadro 4.12 | Vista de cortes superior e lateral da calha Parshall convencional



Fonte: adaptada de Netto et al. (1998, p. 455).

Quadro 4.4 | Medidas (cm) referentes ao modelo padronizado da calha Parshall convencional

Medida do medidor (largura da garganta)	W	A	B	C	D	E	F	G	K	N	λ	n
1"	2,5	36,3	35,6	9,3	16,8	22,9	76	20,3	1,9	2,9	-	-
3"	76	46,6	45,7	17,8	25,9	38,1	15,2	30,5	2,5	5,7	0,176	1,547
6"	15,2	62,3	61	30,4	40,3	61	30,5	61	76	11,4	0,381	1,58
9"	22,9	88,1	86,4	38,1	57,5	76,2	30,5	45,7	76	11,4	0,535	1,53
1'	30,5	137,1	134,4	61	84,5	91,5	61	91,5	76	22,9	0,69	1,522
1 1/2'	45,7	144,8	142	76,2	102,6	91,5	61	91,5	76	22,9	1,054	1,538
2'	61	152,3	149,3	91,5	120,7	91,5	61	91,5	76	22,9	1,426	1,55
3'	91,5	167,5	164,2	122	157,2	91,5	61	91,5	76	22,9	2,182	1,566
4'	122	182,8	179,2	152,5	193,8	91,5	61	91,5	76	22,9	2,935	1,578
5'	152,5	198	194,1	183	230,3	91,5	61	91,5	76	22,9	3,728	1,587
6'	183	213,3	209,1	213,5	266,7	91,5	61	91,5	76	22,9	4,515	1,595
7'	213,5	228,6	224	244	303	91,5	61	91,5	76	22,9	5,306	1,601
8'	244	244	239	274,5	340	91,5	61	91,5	76	22,9	6,101	1,606
10'	305	274,5	260,8	366	475,9	122	91,5	183	15,3	34,3	-	-

Legenda: polegadas (") e pés (')

Fonte: adaptada de Netto et al. (1998, p. 455).

Utilizando as grandezas representadas por λ e n no Quadro 4.4, a vazão da calha Parshall pode ser determinada pela seguinte equação:

$$Q = \lambda \times H^n .$$



Exemplificando

Utilizando os dados do Quadro 4.4, podemos determinar a equação da vazão específica para determinada medida de calha Parshall.

Exemplo: sabendo que a garganta da calha tem entre um terço e metade da largura do canal, chega-se ao valor hipotético de 6" para determinada situação.

Segundo o Quadro 4.4, para uma calha de 6" o valor de λ é 0,381, assim como n é 1,58.

Aplicando-os à equação geral citada **anteriormente**, teremos a equação da vazão em função da altura do nível d'água:

$$Q = \lambda \times H^n = 0,381 \times H^{1,58} .$$

O Quadro 4.5 facilita a escolha da medida da calha Parshall, levando em consideração a vazão mínima e máxima para que a descarga permaneça livre. Manter essa característica garante a determinação da vazão somente com uma medida de altura (ponto convencional). Caso a descarga passe a ser submersa, deverão ser realizadas duas medidas de altura: ponto convencional e final da garganta.

A regra geral para que a descarga seja livre é a relação H/H_2 menor que 0,6 (60%) no caso de calhas inferiores à 1 pé e 0,7 (70%) para maiores que 1, no entanto, inferiores à 8 pés (NETTO et al., 1998).

Quadro 4.5 | Limites de aplicação do medidor Parshall em descarga livre

W		Capacidade (l/s)	
pol.	cm	Mínima	Máxima
3"	7,6	0,85	53,8
6"	15,2	1,42	110,4
9"	22,9	2,55	251,9
1'	30,5	3,11	455,6
1 1/2'	45,7	4,25	696,2
2'	61	11,89	936,2
3'	91,5	17,26	1426,3
4'	122	36,79	1921,5
5'	152,5	45,3	2422
6'	183	73,6	2929
7'	213,5	84,95	3440
8'	244	99,1	3950
10'	305	200	5660

Fonte: adaptada de Netto et al. (1998, p. 458).



Refleta

Conhecendo as características físicas e técnicas do medidor (calha) Parshall, pense sobre as vantagens que ele tem sobre os demais dispositivos e as demais técnicas de medida de vazão, principalmente aqueles utilizados para escoamentos livres.

De forma análoga, pense nos dispositivos empregados para determinação de vazão em condutos forçados: qual deles é mais semelhante ao medidor Parshall?



Assimile

Esta seção apresentou três formas (técnica e dispositivos) de medida de velocidade, abrangendo os escoamentos livres e forçados: flutuador, tubo de Pitot e molinete. Além destes, a seção ainda discorreu sobre a calha Parshall, dispositivo empregado na medida de vazões.

O flutuador é a técnica mais rudimentar destas aqui apresentadas. Trata-se de cronometrar um “flutuador” em movimento no canal durante determinada distância conhecida. Obtém-se com esse método uma estimativa da velocidade média da corrente de água.

O tubo de Pitot é um dispositivo utilizado para determinar a velocidade, principalmente, em escoamentos forçados. Ele mede a pressão estática e total, proporcionando o cálculo da pressão dinâmica. A partir desta medida, pode-se calcular a velocidade utilizando-se a seguinte equação:

$$v = \sqrt{2 \frac{(P_0 - P)}{\rho}}$$

O molinete é outro dispositivo empregado para determinações da velocidade em escoamentos livres. Esse equipamento tem forma de torpedo, sendo composto por três partes principais: corpo, haste e hélice. Por estar conectado a um computador ou contador de voltas. Dependendo do modelo, a obtenção final da velocidade está relacionada à aplicação da “equação do molinete” de forma manual ou realizada por softwares.

A calha Parshall, por sua vez, é um dispositivo utilizado para medições de vazões em canais. Faz parte dos medidores de regime crítico, o que possibilita a determinação da velocidade apenas com uma medida de nível d’água (quando operada em descarga livre). A equação utilizada para o cálculo da vazão é condicionada por fatores geométricos de sua estrutura, sendo esta a fórmula geral: $Q = \lambda \times H^n$.

Assim, esta seção abordou de forma rápida os principais métodos de medição de velocidade, tanto em canal quanto em tubulação forçada (flutuador, tubo de Pitot e molinete), e tratou também do método mais popularizado de medição de vazão em canais (calha Parshall). Esses conhecimentos são de grande utilidade prática, e serão úteis em sua vida profissional e para o desenvolvimento do relatório desta unidade.

Sem medo de errar

A determinação da vazão de água é uma questão essencial para plantas industriais, estações de tratamento de água e esgoto e outras instalações que trabalham com esse fluido em seus processos.

Sabendo da importância da determinação da vazão em unidades hidráulicas, principalmente no caso de uma ETA, o tema foi pauta de uma reunião extraordinária da equipe de projetos que você integra.

Após conversas e explicações, o engenheiro-chefe solicitou a você um método de medição de vazão na entrada da ETA, pois, segundo ele, é o melhor lugar para se calcular a quantidade de água que está sendo tratada, além de ser um importante dado técnico para a unidade.

Após estudar as possibilidades, você sugere a implantação de uma calha Parshall.

Quais são as razões para essa escolha?

Como se sabe, há diversas técnicas e dispositivos que podem ser utilizados para medições de vazão. Mesmo aqueles que determinam a velocidade do escoamento, se conhecida a área da seção, podem calcular a vazão ali escoada.

A calha Parshall é o dispositivo mais aplicado nas medições de vazão em todo o mundo. Foi desenvolvida por um engenheiro estadunidense que trabalhava com irrigação. O que proporcionou a ela a popularização foi sua simplicidade e facilidade de construção e operação. Ela pode ser construída de diversos materiais (concreto, metal, fibras sintéticas etc), sendo atualmente vendida pré-fabricada em fibra de vidro e outros materiais plásticos.

Os principais motivos que se pode apontar para adoção desse dispositivo é o baixo custo e a facilidade de operação e manutenção, além da precisão.

A calha Parshall faz parte dos medidores de regime crítico, ou seja, na entrada de sua garganta, o escoamento é forçado a passar pelo escoamento crítico. Isso possibilita a medida da vazão baseada somente em um ponto a montante da garganta, pois o incremento da vazão refletirá somente na elevação do nível d'água, e não da velocidade da passagem dela pela garganta.

Sobre a precisão e facilidade de operação, há diversos modelos de sensores que podem ser instalados nesse ponto de medição, operacionalizando esse procedimento e aumentando sua precisão.

Esse dispositivo não necessita de manutenção, pois tem interior autolimpante, não havendo acúmulo ou incrustações de sólidos.

Esta análise será de suma importância na confecção de seu relatório técnico denominado "Determinação de velocidade e dispositivos de medição de vazão, definindo a situação que apresenta melhores resultados".

Esse relatório que, no caso hipotético, seria entregue ao engenheiro-chefe da empresa de projetos, em nosso caso real, deverá ser entregue ao professor, contendo a seguinte estrutura:

- Introdução: nesse tópico deverá ser abordada, de forma sucinta, a importância da medida de vazão e velocidade para unidades que utilizam a água. Posteriormente, deverá conceituar e apresentar os principais métodos de medidas de vazão e velocidade aplicáveis tanto a escoamentos forçados quanto livres.

- Análise descritiva: essa seção deverá constar de princípio de funcionamento, vantagens e desvantagens, além da situação ideal para aplicação de cada um dos métodos de medida de velocidade e vazão estudados.

- Parecer final: apresentar nesse tópico a conclusão do relatório, destacando, para condições mais gerais, qual seria o melhor método para o escoamento em tubulações forçada e conduto livre.

Avançando na prática

Vazão do manancial fornecedor de água

Descrição da situação-problema

Para uma estação de tratamento de água, a vazão do corpo hídrico utilizado para a retirada da água a ser tratada e fornecida a população é muito importante. Há procedimentos legais a serem cumpridos para que se possa retirar determinada vazão, para os quais o conhecimento da vazão do manancial é decisivo.

Assim, após apresentar o relatório sobre o método mais adequado para a medição da vazão no canal de entrada da estação de tratamento de água, a equipe responsável pela outorga da vazão de água apresenta a você outra situação.

Foi realizado um estudo batimétrico da seção do manancial onde haverá a captação da água para o tratamento, no entanto, necessitamos determinar a velocidade do fluxo de água, pois esses dois dados (área da seção e velocidade do escoamento) são essenciais na determinação da vazão do corpo hídrico.

Qual é o melhor método para se aplicar na medição da velocidade do corpo hídrico?

Quais são suas vantagens em relação aos outros?

Resolução da situação-problema

Por haver a necessidade de se manter uma vazão de manutenção das condições ambientais do manancial, é necessária a gestão desta demanda quantificações volumétricas da água requisitada e existente.

Para determinar a vazão do corpo hídrico, deve-se, impreterivelmente, saber a área da seção e a velocidade. Há diversos métodos de cálculo de ambas as grandezas, sendo a batimetria uma das mais popularizadas para o cálculo da área (técnica descrita no exercício).

Para o cálculo da velocidade, pode ser empregado o método do flutuador ou o molinete.

Nesse caso, o método mais adequado é o molinete, pois tem maior precisão da medida, além de possibilitar o conhecimento da distribuição da velocidade ao longo da seção.

O método do flutuador é uma estimativa da velocidade média, pois não considera a distribuição irregular da velocidade na seção, além de ter outras imprecisões atribuídas ao fator humano.

Faça valer a pena

1. A medição da velocidade de determinado escoamento pode ser de grande utilidade, principalmente por se tratar de um dado fundamental no cálculo da vazão.

Com base em seus conhecimentos sobre métodos de medição de velocidade em escoamentos, analise as sentenças a seguir.

I. O flutuador é muito utilizado em medições de velocidade de escoamentos sob pressão.

II. O tubo de Pitot é um dispositivo utilizado para medir vazões em escoamentos sob pressão.

III. A calha Parshall é o aparato mais empregado na medida de velocidade em escoamentos em condutos livres.

IV. O molinete é muito utilizado para medições de velocidade em escoamentos em canais.

V. O tubo de Pitot também é conhecido como tubo Venturi.

Agora, marque a alternativa que apresenta somente as alternativas verdadeiras.

- a) I, II e IV.
- b) II e V.
- c) I, II e III.
- d) I e IV.
- e) Apenas IV.

2. O método do flutuador pode ser empregado para determinar a velocidade em escoamentos em canais. O método consiste em registrar o tempo gasto para que um “flutuador” percorra uma distância preestabelecida, resultando assim da velocidade média do escoamento avaliado.

Baseando-se no trecho descrito anteriormente e em seus conhecimentos, marque a alternativa verdadeira sobre o método do flutuador.

- a) Trata-se da aplicação da equação de Bernoulli, levando em consideração a carga hidráulica acima de seu eixo central.
- b) Apesar de simples, é um método muito preciso, pois a pessoa que está cronometrando tem a possibilidade de andar na borda do canal, acompanhando o flutuador.
- c) Leva em consideração a diferença de pressão da seção normal e estrangulada para o cálculo da vazão.
- d) O método que utiliza materiais baratos, além de fácil execução, porém, de precisão questionável.
- e) Por se tratar de um método de regime crítico, basta uma só medida.

3. O medidor Parshall se inclui entre os de regime crítico, ou seja, em determinado ponto de sua estrutura, o escoamento é forçado a passar pelo escoamento crítico. Foi idealizado por Ralph Leroy Parshall, engenheiro do serviço de irrigação do departamento de agricultura dos EUA (NETTO et al, 1998).

Sabendo que a equação geral para determinação da vazão em função da altura da lâmina d’água do medidor Parshall é $Q = \lambda \times H^n$, determine a vazão de um canal com as seguintes condições:

Canal de 9": $\lambda = 0,535$ e $n = 1,53$.

Altura da lâmina d’água: 40 cm.

Marque a alternativa que apresenta a vazão calculada.

- a) $0,535 \text{ m}^3/\text{s}$.
- b) $0,473 \text{ m}^3/\text{s}$.
- c) $0,387 \text{ m}^3/\text{s}$.
- d) $0,232 \text{ m}^3/\text{s}$.
- e) $0,132 \text{ m}^3/\text{s}$.

Referências

CARVALHO, T. M. Técnicas de medição de vazão por meios convencionais e não convencionais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 1, n. 1, p. 73-85, 2008.

ENTENDA o funcionamento do hidrômetro de sua casa. Águas Guariroba, 2013. Vídeo do YouTube.

EQUAÇÃO de Torricelli. O Kuadro, 2013. Vídeo do Youtube. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=XTt_FldNXM4>. Acesso em: 8 mar. 2017.

FERNANDES, C. **Medidores Parshall**. Disponível em: <<http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/PARSHALL.html>>. Acesso em: 8 mar. 2017.

FOX, R. W. et al. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. 863p.

MEDIDOR de vazão - eletromagnético. Vinícius RM, 2015. Vídeo do YouTube.

MOLINETE hidráulico monitorado con una DAQ NI USB 6009. Jesus Hidalgo, 2015. Vídeo do YouTube.

NETTO, J. M. A. et al. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1998. 627p.

PORTO, R. de M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006. 540p.

ISBN 978-85-522-0620-0



9 788552 206200 >