

Hidráulica

Hidráulica

Roberto Mac Intyer Simões Larissa Queiroz Minillo

© 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
Gräsiele Aparecida Lourenço
Lidiane Cristina Vivaldini Olo
Paulo Heraldo Costa do Valle

Thatiane Cristina dos Santos de Carvalho Ribeiro

Revisão Técnica

João Carlos dos Santos Roberto Mac Intyer Simões André Luis Gomes Simões Luis Eduardo Zampar Filho

Editorial

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)

Simões, Roberto Mac Intyer
S665h Hidráulica / Roberto Mac Intyer Simões, Larissa Queiroz
Minillo. – Londrina : Editora e Distribuidora Educacional S.A.,
2017.
192 p.

ISBN 978-85-522-0287-5

1. Hidráulica. 2. Engenharia. I. Larissa Queiroz Minillo. II. Título.

CDD 627

Sumário

	_	
Unidade 1 Estática e cinemática dos fluidos	7	
Seção 1.1 - Definição e propriedades dos fluidos	9	
Seção 1.2 - Estática dos fluidos	21	
Seção 1.3 - Cinemática dos fluidos	35	
Unidade 2 Equação da energia e escoamento interno	49	
Seção 2.1 - Equação da energia	51	
Seção 2.2 - Escoamento permanente de um fluido incompressível em conduto fechado	64	
Seção 2.3 - Perda de carga em um escoamento interno	77	
Unidade 3 Sistemas de captação e bombeamento		
Seção 3.1 - Introdução à instalação de bombeamento	93	
Seção 3.2 - Dimensionamento de uma instalação de bombeamento	110	
Seção 3.3 - Dimensionamento de canais	124	
Unidade 4 Hidrometria e barragens	141	
Seção 4.1 - Estudo da água nos solos	143	
Seção 4.2 - Forças de percolação	156	
Seção 4.3 - Fluxo de água nos solos	170	

Palavras do autor

Caro aluno, os Fenômenos de Transporte, governados por leis físicas, são extremamente importantes para o progresso e o conforto da humanidade. Os Fenômenos de Transporte englobam três grandes temas: a mecânica dos fluidos, a transferência de calor e a termodinâmica. Tem-se que conhecê-los e compreendê-los, a fim de aplicá-los nas mais variadas áreas de atuação do egresso dos cursos de Engenharia e dos cursos superiores de tecnologia, é imprescindível, pois a área de ciências térmicas é uma das áreas de maior relevância na formação de tecnólogos e engenheiros de diversas modalidades.

Devido à importância tecnológica destes conceitos, o objetivo desta disciplina é capacitá-lo a modelar, calcular e analisar sistemas e ciclos que envolvam os fenômenos de transporte. Vale ressaltar que o autoestudo é de suma importância para alcançarmos o nosso objetivo.

A competência de fundamento que será trabalhada ao longo deste livro didático é compreender os conceitos básicos de fluidos e os seus comportamentos quando em movimento, mediante o uso das equações fundamentais, bem como as diferentes formas de transferência de calor e os princípios e as aplicações da termodinâmica, utilizados no contexto das engenharias e dos tecnólogos.

Na Unidade 1, estudaremos a estática e a cinemática dos fluidos, ou seja, o comportamento dos fluidos em repouso e em movimento, respectivamente. O intuito desta unidade é, após o conhecimento e a compreensão da definição de fluido e de seus conceitos fundamentais, aplicar os conceitos de pressão, do teorema de Stevin e da lei de Pascal em fluidos em repouso e aplicar os conceitos de escoamento unidimensional, de vazão, de velocidade média e da equação da continuidade para fluidos em movimento.

Na Unidade 2, estudaremos a equação da energia e os conceitos que envolvem o escoamento permanente de um fluido incompressível em um conduto interno, a fim de calcular a perda de carga em um escoamento interno.

Na Unidade 3, estudaremos a transferência de calor, com o objetivo de compreender os modos de transferência de calor existentes: a

condução de calor, modelada pela lei de Fourier; a convecção de calor, regida pela lei de Newton do resfriamento e a radiação de calor, que segue a lei de Stefan-Boltzmann; a fim de analisarmos os trocadores de calor existentes.

Na Unidade 4, estudaremos a termodinâmica básica, introduzindo conceitos e propriedades, como o estado e os processos termodinâmicos, a conservação de energia, o trabalho, o calor e a primeira lei da termodinâmica, a fim de analisarmos os sistemas e os ciclos termodinâmicos a partir do balanço de energia e da equação de estado de um gás ideal.

Compreendendo os conceitos básicos dos fenômenos de transporte, você, aluno, estará apto a acompanhar todas as disciplinas profissionalizantes da área de ciências térmicas, além de estar apto a resolver diversos problemas da realidade profissional dessa área.

Bons estudos!

Estática e cinemática dos fluidos

Convite ao estudo

Caro aluno, nesta unidade de ensino, estudaremos a estática e a cinemática de fluidos. A partir da definição do fluido e de suas propriedades, tem-se que a estática é o ramo da física que estuda o comportamento dos fluidos em repouso e a cinemática estuda o comportamento dos fluidos em movimento.

A competência de fundamento desta disciplina é compreender os conceitos básicos de fluidos e os seus comportamentos quando em movimento, mediante o uso das equações fundamentais, bem como as diferentes formas de transferência de calor e os princípios e as aplicações da termodinâmica, utilizados no contexto das engenharias.

O resultado de aprendizagem desta unidade é compreender as definições e as propriedades dos fluidos, a fim de aplicar o conceito de pressão na área de estática e os conceitos de escoamento laminar e turbulento, de velocidade média, de vazão, e da equação da continuidade na área de cinemática dos fluidos.

O contexto de aprendizagem utilizado como situação da realidade profissional (SR) proposta nesta unidade é focado em uma empresa fabricante de sistemas e equipamentos hidráulicos e pneumáticos, que contratou você, aluno, como projetista, na qual atuará como líder responsável pelo projeto e desenvolvimento de novos produtos. Para atingir os objetivos desta unidade, você deve estar apto a:

- Determinar a viscosidade de um fluido lubrificante, que será utilizado na folga entre o pistão e o cilindro de um atuador pneumático, a fim de diminuir o atrito gerado pelo deslocamento da parte móvel.

- Projetar um elevador hidráulico para levantar um automóvel, levando em consideração a força aplicada no pistão do atuador hidráulico.
- Calcular a vazão e o Número de Reynolds do escoamento de fluido, a partir da velocidade média na tubulação que realiza a conexão entre a bomba e o atuador de um sistema hidráulico de uma prensa, que necessita de uma vazão de fluido a partir de uma bomba hidráulica suficiente para executar a sua função de embutimento.

Para isso, serão tratados nas seções desta unidade os conceitos fundamentais e as definições sobre os fluidos; o conceito de pressão, o teorema de Stevin e a lei de Pascal; os regimes de escoamento e o número de Reynolds, o escoamento unidimensional, o conceito de vazão e de velocidade média do escoamento e a equação da continuidade para regime permanente.

Está preparado para estes grandes desafios? Vamos lá!

Seção 1.1

Definição e propriedades dos fluidos

Diálogo aberto

Tem-se que a mecânica dos fluidos é um ramo da engenharia que abrange praticamente todas as áreas de atuação dos tecnólogos e dos engenheiros, principalmente nas áreas correlatas: esforços em canais, diques e represas, flutuação de embarcações e estabilidade de submarinos, projeto de máquinas hidráulicas e pneumáticas para automação industrial, lubrificação de mancais, sistemas de ventilação e condicionamento de ar, simulação aerodinâmica para a indústria automotiva e aeroespacial, ou até mesmo aplicações inusitadas, como a biomecânica, que projeta válvulas cardíacas a partir da compreensão da mecânica dos fluidos do sangue.

Atualmente, a utilização de sistemas hidráulicos e pneumáticos para automação de processos é de grande importância tecnológica, sendo, desse modo, utilizados em toda e qualquer área e setor industrial na indústria moderna. Assim, o contexto de aprendizagem utilizado com situação da realidade profissional desta unidade envolve uma empresa fabricante de sistemas e equipamentos hidráulicos e pneumáticos, a qual contratou você como projetista que atuará na liderança responsável pelo projeto e desenvolvimento de novos produtos.

Na situação-problema (SP) desta seção, determinaremos a viscosidade de um fluido lubrificante, que será utilizado na folga entre o pistão e o cilindro de um atuador pneumático, a fim de diminuir o desgaste causado pelo atrito gerado a partir do deslocamento da parte móvel.

Para isso, devemos conhecer e compreender os conceitos fundamentais dos fluidos, a tensão de cisalhamento e as seguintes propriedades dos fluidos: a viscosidade dinâmica, a massa específica, o peso específico, a viscosidade cinemática e as definições de fluido ideal e fluido incompressível.

Está preparado para esse desafio? Bons estudos!

Não pode faltar

Conceitos fundamentais e definição de fluido

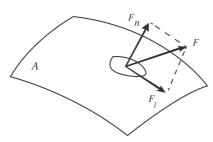
Caro aluno, a Mecânica dos Fluidos é a ciência que estuda os fluidos em repouso e em movimento. No entanto, o que é fluido? Como são definidos e classificados? Tem-se que o fluido é definido como sendo uma substância capaz de escoar e que não tem forma própria, ou seja, é uma substância que adquire o formato do recipiente que a envolve. Esta característica básica é o que diferencia os fluidos dos sólidos, que tem um formato próprio. Os fluidos são classificados em dois tipos: líquidos e gases. A diferença básica entre eles é que os gases sempre ocupam todo o volume do recipiente que os contêm, enquanto os líquidos podem apresentar uma superfície livre. Mais adiante, veremos uma definição mais conceitual do fluido, em que compreenderemos o comportamento físico dos fluidos e sua diferença em relação ao comportamento dos sólidos, a fim de aplicá-los em situações práticas da realidade profissional da área.

Tensão de cisalhamento e Lei de Newton da Viscosidade

Relembrando os tipos de forças que agem sobre uma partícula, as forças podem ser decompostas em dois tipos: as forças de superfície, que são geradas pelo contato da partícula com outras partículas ou com uma superfície sólida e as forças de campo, que são geradas por um campo, como os campos gravitacional e eletromagnético.

A força de superfície é decomposta em dois componentes: normal e tangencial à área de aplicação da força. A Figura 1.1 mostra uma força de superfície \vec{F} decomposta nas forças normal \vec{F}_n e tangencial \vec{F}_t .

Figura 1.1 | Decomposição de uma força em seus componentes



Fonte: adaptado de Fox, Pritchard e McDonald (2013, p. 27).

A tensão normal é dada pela força normal dividida pela área de aplicação da força, como mostra a equação a seguir. Tem-se que a unidade de tensão é N/m^2 , também chamada de Pascal (Pa).

$$\sigma_n = \frac{F_n}{A}$$

A tensão de cisalhamento é definida de maneira análoga,

$$\tau = \frac{F_t}{A}$$

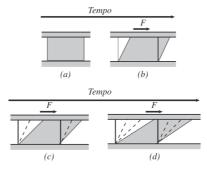
Conhecendo a tensão de cisalhamento, podemos definir o fluido de forma mais aprofundada e precisa, a fim de construir conceitos que serão utilizados ao longo desta disciplina.



Segundo Brunetti (2008), um fluido é uma substância que se deforma continuamente quando submetida à aplicação de uma força de cisalhamento, não atingindo, portanto, uma condição de equilíbrio estático

Para entendermos melhor essa definição, utilizaremos a Figura 1.2, que compara o comportamento de um fluido e de um sólido entre dois planos paralelos, limitados por superfícies sólidas. Esse experimento é conhecido como "Experiência das duas placas".

Figura 1.2 | Comportamento de um fluido e de um sólido entre dois planos paralelos



Fonte: adaptada de Fox, Pritchard e McDonald (2013, p. 4).

A Figura 1.2 (a) mostra as duas substâncias em repouso. Aplicandose uma força tangencial sobre as substâncias sólida e fluida, a partir da superfície superior, como mostra a Figura 1.2 (b), tem-se que as duas substâncias sofrerão uma deformação angular, devido à tensão de cisalhamento desenvolvida a partir da força aplicada. Note que, se a força agindo sobre o sólido não ultrapassar o seu regime elástico de deformação, o sólido entrará em repouso, ou seja, alcançará um equilíbrio estático. Para esse caso, retirada a força tangencial, o sólido voltará à sua posição inicial, Figura 1.2 (a). Já o fluido continuará se deformando continuamente, enquanto a força tangencial for aplicada sobre ele, como ilustra as Figuras 1.2 (c) e (d), ou seja, o fluido não alcança uma condição de equilíbrio estático quando submetido a uma força tangencial, diferentemente dos sólidos. Percebe-se também que a partícula de fluido em contato com a superfície sólida não desliza sobre ela, fato experimental chamado de condição de não deslizamento ou também de princípio da aderência. Portanto, a partícula de fluido em contato com a superfície inferior, que está em repouso, tem velocidade nula e a partícula de fluido em contato com a superfície superior, que está em movimento, adquire a mesma velocidade da placa.

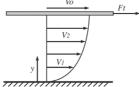
Pesquise mais

Para saber mais sobre a condição de não deslizamento, acesse ao vídeo intitulado *No-Slip Condition*. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=cUTkqZeiMow>. Acesso em: 8 mar. 2017. O vídeo mostra um aparato experimental, em que uma linha de corante é injetada no fundo de um canal com escoamento de água. Nota-se que a linha de corante fica estagnada devido a essa condição.

Considerando-se o comportamento de um fluido contido entre duas placas paralelas e infinitas, tem-se que as tensões de cisalhamento aparecem no fluido devido ao escoamento viscoso, ou seja, a força tangencial aplicada na placa superior é equilibrada por força internas no fluido, resultando em um equilíbrio dinâmico. Portanto, não existe tensão de cisalhamento em um fluido em repouso.

Aplicando a condição de não deslizamento, percebemos que existe um gradiente de velocidade entre a placa inferior (que está fixa) e a placa superior (que se move com uma velocidade constante). Esse gradiente de velocidade é modelado por um perfil parabólico, como mostra a Figura 1.3.

Figura 1.3 | Gradiente de velocidade no fluido contido entre duas placas paralelas e infinitas



Fonte: elaborada pelo autor.

Tem-se que o gradiente de velocidade é relacionado com a taxa de deformação (ou de cisalhamento) do fluido. Além disso, o gradiente de velocidade cria uma espécie de atrito entre as diversas camadas do fluido, originando as tensões de cisalhamento internas no fluido.



A Lei de Newton da Viscosidade diz que a tensão de cisalhamento é proporcional ao gradiente de velocidade.

A constante de proporcionalidade da Lei de Newton da Viscosidade é a viscosidade dinâmica, como mostra a fórmula:

$$\tau = \mu \, \frac{dV}{dy}$$

Tem-se que a viscosidade dinâmica permite equilibrar dinamicamente as forças tangenciais aplicadas em um fluido em movimento. Portanto, a viscosidade dinâmica, que é uma propriedade do fluido, é uma medida da resistência do fluido de se movimentar, correspondendo ao atrito interno gerado nos fluidos devido a interações intermoleculares, sendo, em geral, uma função da temperatura. Quanto maior for a viscosidade de um fluido, maior será sua dificuldade para escoar.

Os fluidos que seguem a Lei de Newton da Viscosidade, ou seja, os fluidos que têm um comportamento linear entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade são chamados de fluidos newtonianos, como o ar, a água, os óleos etc.

Os fluidos que não obedecem à Lei de Newton da Viscosidade são chamados de fluidos não newtonianos, como a pasta dental, a argila, o sangue, as tintas etc. Os fluidos não newtonianos são classificados de acordo com a sua característica reológica em: Plástico de Bingham, Pseudoplástico e Dilatante.

Uma simplificação prática para a Lei de Newton da Viscosidade é dada para casos em que a espessura de fluido é muito delgada, ou seja, a distância entre as placas inferior e superior é muito pequena, em que podemos utilizar a aproximação:

$$\frac{dV}{dy} = \frac{\Delta V}{\Delta y} = \frac{V_0}{\varepsilon}$$

Em que arepsilon é a distância entre as placas. Finalmente, a Lei de Newton da Viscosidade simplificada é dada por:

$$\tau = \mu \frac{\Delta V}{\Delta y} = \mu \frac{V_0}{\varepsilon}$$

Massa específica; peso específico; viscosidade cinemática

Tem-se que os fluidos são caracterizados pelas suas propriedades. Por exemplo, o ar frio é mais denso que o ar quente e a água é muito menos viscosa que um óleo lubrificante. Portanto, podemos ter a mesma situação prática envolvendo dois fluidos diferentes, o que nos levará a diferentes soluções para o mesmo problema.

Para definirmos as propriedades do fluido na Mecânica dos Fluidos clássica, devemos considerar a hipótese de o fluido ser um meio contínuo. Isso significa que qualquer propriedade local do fluido permanece inalterada, não importando o tamanho da amostra examinada, ou seja, estamos analisando o comportamento macroscópico do fluido, considerando, portanto, que os espaços vazios entre as moléculas possam ser desprezados. Em nível microscópico, as moléculas de fluido estão espaçadas entre si por uma distância intermolecular. Então, caso essa distância seja muito menor que o comprimento característico do problema, podemos considerar o fluido como um meio contínuo. Para essa análise. temos que as propriedades do fluido são uniformes, ou seja, ou são constantes, ou variam continuamente, sendo, portanto, as mesmas em qualquer ponto do fluido. Os problemas para os quais a hipótese do contínuo não fornece resultados confiáveis são resolvidos usando a mecânica estatística.

Utilizando-se desse conceito, tem-se que a massa específica ho, também chamada de densidade, é definida por:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Em que m é a massa do fluido e \forall é o volume ocupado por ele. Realizando uma análise dimensional, tem-se que a unidade da massa específica é kg/m^3 .

A massa específica relativa SG, também chamada de densidade relativa ou gravidade específica, é definida por:

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{\text{H2O}}}$$

Em que ho é a massa específica máxima da água, que tem o valor de 1000 kg / m^3 a 4 $^{\circ}$ C .

Exemplificando

Como exemplo de aplicação da formulação da massa específica relativa SG, temos que a SG do mercúrio é tipicamente 13,6, ou seja, a densidade do mercúrio é 13,6 vezes maior que a densidade da água, portanto o mercúrio é mais denso que a água. As tabelas A1 e A2 do livro de Fox, Pritchard e McDonald (2013, p. 659) mostram os valores de SG para vários materiais de engenharia.

O peso específico γ , definido como sendo equivalente a uma força aplicada em um volume, ou também, como uma massa específica submetida a uma aceleração gravitacional, é dado por:

$$\gamma = \frac{F_{peso}}{V} = \frac{m \cdot g}{V} = \rho \cdot g$$

Em que F_{peso} é a força peso do fluido e g é a aceleração da gravidade: $g = 9.81 \, m/s^2$. Realizando uma análise dimensional, tem-se que a unidade do peso específico é N/m^3 .

Finalizando, tem-se que a viscosidade cinemática v é obtida a partir da relação da viscosidade dinâmica com a massa específica.

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

Realizando uma análise dimensional, tem-se que a unidade da viscosidade cinemática é m^2 / s, que é uma grandeza derivada de grandezas fundamentais da cinemática, o que justifica o seu nome.

Fluido ideal; fluido incompressível

O conceito de fluido ideal é utilizado para simular um escoamento sem perdas por atrito, ou seja, um escoamento com viscosidade zero. Portanto, o fluido ideal é modelado com viscosidade nula, fato que não reflete o comportamento dos fluidos reais. Essa modelagem é uma hipótese simplificadora que será bastante utilizada nesta disciplina, por exemplo, na conceituação da Equação de Bernoulli, que versa sobre a conservação da energia em um escoamento fluido.

Tem-se que um fluido é incompressível caso o seu volume não se altere, a partir de um acréscimo ou decréscimo na pressão aplicada sobre ele, ou seja, se a variação da massa específica do fluido for desprezível ao longo do escoamento, o fluido pode ser modelado como incompressível. Esse conceito de fluido incompressível é aplicável aos líquidos, que naturalmente têm um comportamento muito aproximado a este, e aos gases, em situações nas quais não sofram grandes variações de pressão, como em ventiladores, em que a velocidade do escoamento é muito pequena em relação à velocidade do som.

Um parâmetro utilizado para saber se o fluido é compressível ou incompressível é o Número de Mach, representado por Ma, dado pela equação a seguir. $Ma = \frac{V}{c}$

Em que V é a velocidade do escoamento e c é a velocidade local do som no gás, equivalente a 346 m/s no ar, à temperatura ambiente e ao nível do mar.

Tem-se que, para Ma < 0,3, a máxima variação de massa específica é menor que 5%. Portanto, escoamentos de gases com Ma < 0,3 podem ser modelados como incompressíveis. Finalmente, para Ma = 0,3 no ar, temos uma velocidade correspondente a 100 m/s.



Como que a viscosidade pode interferir num projeto de máquinas hidráulicas?

Sem medo de errar

Retomando o contexto de aprendizagem, estamos trabalhando com uma empresa fabricante de sistemas e equipamentos hidráulicos e pneumáticos, que contratou você como projetista, na qual atuará como líder responsável pelo projeto e desenvolvimento de novos produtos.

Nessa situação-problema, determinaremos a viscosidade de um fluido lubrificante, que será utilizado na folga entre o pistão e o cilindro de um atuador pneumático, a fim de diminuir o desgaste causado pelo atrito gerado a partir do deslocamento da parte móvel.

Tem-se que, na direção do movimento, a força aplicada pela haste para executar a função do atuador deve se equilibrar com a força causada pelas tensões de cisalhamento na película de fluido lubrificante, ou seja:

$$F_t = \tau \cdot A$$

A tensão de cisalhamento é dada pela Lei de Newton da Viscosidade simplificada:

$$\tau = \mu \frac{\Delta V}{\Delta y} = \mu \frac{V_0}{\varepsilon}$$

E a área lateral do pistão, que está em contato com o cilindro, é calculada pela equação a seguir, em que r é o raio do pistão e L é o comprimento do pistão.

$$A_{pist\~ao} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L$$

Portanto, tem-se que a viscosidade do fluido lubrificante é dada por:

$$\mu = \frac{F_t}{A_{\text{pistão}}} \cdot \frac{\varepsilon}{V_0}$$

Avançando na prática

Seleção de um fluido lubrificante para um mancal de deslizamento

Descrição da situação-problema

Nesta nova situação-problema, selecionaremos o fluido lubrificante para um mancal de deslizamento. Tem-se um eixo com 10 mm de diâmetro girando a 1000 rpm (rotações por minuto) em um mancal de deslizamento de 100 mm de comprimento. O torque aplicado no eixo é de 0,01 Nm. Uma fina película de lubrificante

de espessura de 0,1 mm preenche a folga anular entre o eixo e o mancal. Calcule a viscosidade dinâmica do fluido lubrificante.

Resolução da situação-problema

Como a película de fluido lubrificante é muito delgada, utilizaremos a Lei de Newton da Viscosidade simplificada, que é dada por:

$$\tau = \mu \frac{V_0}{\varepsilon}$$

Tem-se que a velocidade $V_{\rm 0}$ é relacionada com a velocidade angular ω pela fórmula a seguir, em que r é o raio do eixo.

$$V_0 = \omega \cdot r$$

Em que a velocidade angular ω é dada por:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{rpm}{60}$$

A tensão de cisalhamento é encontrada a partir da equação:

$$\tau = \frac{F_t}{A}$$

Em que a força tangencial é encontrada a partir da equação do torque. Tem-se o torque é obtido multiplicando a força tangencial pelo raio do eixo, como mostrado a seguir:

$$T = F_t \cdot r$$

Voltando à Lei de Newton da Viscosidade simplificada, temos que:

$$\mu = \tau \frac{\varepsilon}{V_0} = \frac{F_t}{A} \cdot \frac{\varepsilon}{V_0} = \frac{T}{r \cdot A} \cdot \frac{\varepsilon}{V_0}$$

Portanto, a viscosidade dinâmica do fluido lubrificante é dada por:

$$\mu = \frac{T}{r \cdot A} \cdot \frac{60 \cdot \varepsilon}{2 \cdot \pi \cdot rpm \cdot r}$$

Faça valer a pena

1. Tem-se que os fluidos são caracterizados pelas suas propriedades. Por exemplo, sabe-se que o ar frio é mais denso que o ar quente e que a água é muito menos viscosa que um óleo lubrificante. Portanto, podemos ter a mesma situação prática envolvendo dois fluidos diferentes, o que nos levará a diferentes soluções para o mesmo problema.

Analise as afirmações a seguir:

- I. Massa específica é definida como a quantidade de massa de fluido por unidade de volume.
- II. Peso específico é definido como a força, por unidade de volume, exercida sobre uma massa específica submetida a uma aceleração gravitacional.
- III. A viscosidade cinemática é obtida a partir da relação da viscosidade dinâmica com a massa específica.

É correto o que se afirma em:

a) Apenas I e II.

d) Apenas I.

b) Apenas I e III.

e) I. II e III.

- c) Apenas II e III.
- **2.** Um reservatório graduado contém 500 ml de um líquido que pesa 6 N. Determine o peso específico (γ), a massa específica (ρ) e a densidade relativa (d) desse líquido.

Para os cálculos, adote $g = 9.8 \text{ m/s}^2$.

Com base no texto assinale a alternativa correta

- a) Peso específico = 1200 N/m^3 , massa específica = 122.5 kg/m^3 e densidade relativa = 0.12.
- b) Peso específico = 1200 N/m^3 , massa específica = $122,5 \text{ kg/m}^3 \text{ e}$ densidade relativa = 1.22.
- c) Peso específico = 12000 N/m^3 , massa específica = $122,5 \text{ kg/m}^3 \text{ e}$ densidade relativa = 1,22.
- d) Peso específico = 1200 N/m^3 , massa específica = $1224,5 \text{ kg/m}^3 \text{ e}$ densidade relativa = 1,22.
- e) Peso específico = 12 N/m^3 , massa específica = $1,22 \text{ kg/m}^3$ e densidade relativa = 0.12.
- **3.** Com a finalidade de reduzir o atrito entre duas placas planas paralelas, um óleo com viscosidade dinâmica igual a 0.027 N.s/m² é aplicado entre elas. As placas estão situadas a 1,5 mm de distância uma da outra e a placa superior move-se com velocidade de 7,2 km/h, enquanto a placa inferior está imóvel. Determinar a tensão de cisalhamento aproximada que agirá sobre o óleo.

Com base no texto, assinale a alternativa correta.

- a) 129,6 N/m².
- b) 0,036 N/m².
- c) 0,129 N/m².
- d) 3,6 N/m².
- e) 36 N/m².

Seção 1.2

Estática dos fluidos

Diálogo aberto

Tem-se que a estática dos fluidos, também chamada de hidrostática, é um ramo da mecânica dos fluidos que estuda os fluidos em repouso. Apesar de os problemas envolvendo a estática dos fluidos serem os mais simples de toda a mecânica dos fluidos, tem-se que a pressão no interior de um fluido em repouso tem grande importância em várias situações da realidade prática. Os princípios da estática dos fluidos são utilizados, por exemplo, no cálculo de forças sobre objetos submersos, na análise da estabilidade de embarcações, no projeto de submarinos, na medição de pressão a partir dos instrumentos medidores de pressão e na análise das propriedades da atmosfera e dos oceanos.

Atualmente, a teoria da hidrostática contribui no projeto de sistemas das mais variadas áreas, como no dimensionamento do sistema hidráulico de um freio, na indústria automobilística. Assim, o contexto de aprendizagem utilizado como situação da realidade profissional desta unidade envolve uma empresa fabricante de sistemas e equipamentos hidráulicos e pneumáticos que contratou você como projetista para atuar na liderança responsável pelo projeto e desenvolvimento de novos produtos.

Na situação-problema (SP) desta seção, projetaremos um elevador hidráulico para levantar um automóvel com uma determinada massa, levando em consideração a força aplicada no pistão.

Para isso, devemos conhecer e compreender os conceitos de pressão, o teorema de Stevin e a lei de Pascal, a fim de aplicá-los na solução da situação-problema proposta.

Está preparado para esse novo desafio? Bons estudos!

Não pode faltar

Conceito de pressão

Para iniciarmos o estudo da Estática dos Fluidos, vamos relembrar o conceito de tensão normal e tensão tangencial. Tem-se que, se o fluido está em repouso, não existe movimento relativo entre suas partículas, ou seja, não existe tensão tangencial (ou de cisalhamento) atuando no interior de um fluido em repouso. Portanto, a única tensão presente nesse caso é a tensão normal, também chamada de pressão.

Para definirmos o conceito de pressão, vamos utilizar a definição de decomposição de uma força de superfície em normal e tangencial à área de aplicação da força, vista na Seção 1.1. A partir dessa decomposição, tem-se que a tensão normal é dada pela força normal dividida pela área de aplicação dessa força, que nada mais é do que o conceito de pressão, como mostra a equação a seguir:

$$p = \frac{F_n}{A}$$

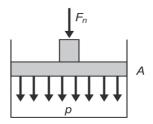


A pressão pode ser expressa por uma tensão normal à área de aplicação da força. Não podemos confundir o conceito de pressão com o conceito de força, sendo, portanto, que a unidade de pressão é N/m^2 , também chamada de Pascal (Pa).

Note, a partir da equação apresentada, que a pressão é proporcional à força normal aplicada e inversamente proporcional à área de aplicação dessa força, ou seja, se dobrarmos a intensidade da força normal aplicada, dobramos a intensidade da pressão. Por outro lado, se dobrarmos a área de aplicação dessa força, a pressão diminui sua intensidade pela metade.

Para exemplificar essa relação, vamos supor um recipiente com um êmbolo na parte superior, como uma seringa com a extremidade inferior fechada, como mostra a Figura 1.4. Tem-se que a área de aplicação da força é igual a área da circunferência do êmbolo.

Figura 1.4 | Desenho esquemático de um experimento para o cálculo da pressão



Fonte: elaborada pelo autor.

Primeiramente, aplicamos uma força de 100 $\it N$ em uma área de 10 $\it cm^2$:

$$p = \frac{F_n}{A} = \frac{100 \text{ N}}{10 \text{ cm}^2} = 10 \frac{N}{\text{cm}^2}$$

Se dobrarmos a intensidade da força normal aplicada, consequentemente, dobraremos a intensidade da pressão:

$$p = \frac{F_n}{A} = \frac{200 \text{ N}}{10 \text{ cm}^2} = 20 \frac{N}{\text{cm}^2}$$

Após essa verificação, vamos supor novamente que uma força de $100\ N$ é aplicada em uma área de $10\ cm^2$. Tem-se que se dobrarmos a área de aplicação dessa força, verificaremos que a pressão diminui sua intensidade pela metade, como queríamos demonstrar:

$$p = \frac{F_n}{A} = \frac{100 \text{ N}}{20 \text{ cm}^2} = 5 \frac{N}{\text{cm}^2}$$

Teorema de Stevin

Caro aluno, a pressão em um fluido em repouso é constante ou pode variar? É intuitivo que a pressão em um fluido em repouso varia com a profundidade. A teoria que veremos a seguir nos mostra como é dada essa variação de pressão.

O teorema de Stevin nos diz que a diferença de pressão entre dois pontos de um fluido estático (ou seja, em repouso) é igual ao produto do peso específico do fluido multiplicado pela diferença de cotas (altura no eixo z) desses dois pontos.

Para conseguirmos formular esse teorema, partimos da equação básica da estática dos fluidos, também conhecida como lei fundamental da hidrostática. Essa equação mostra-nos matematicamente, a partir da segunda Lei de Newton, um conceito bastante intuitivo da experiência do dia a dia, que diz que a pressão em um fluido estático aumenta com a profundidade. Imagine que você esteja fazendo um curso de mergulho. Uma das primeiras lições aprendidas é exatamente esse conceito. Quanto mais distante da superfície do fluido você estiver, maior será a pressão agindo sobre o seu corpo.

A lei fundamental da hidrostática pode ser escrita, como mostra a equação a seguir, aplicada para casos com as seguintes

hipóteses:fluido estático, a força gravitacional é a única força de campo presente e; o eixo z é vertical, com direção para cima.

$$\frac{dp}{dz} = -\rho \cdot g = -\gamma = \text{constante}$$

Pesquise mais

Para entender melhor os conceitos envolvidos e verificar o passo a passo de como chegamos na lei fundamental da hidrostática, deduzindo-a a partir da segunda Lei de Newton, pesquise Fox, Pritchard e McDonald (2013, p. 50-52).

Fonte: FOX, Robert W.; PRITCHARD, Philip J.; McDONALD, Alan T. Introdução à mecânica dos fluidos. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

Integrando a equação apresentada, tem-se que a diferença de pressão entre dois pontos A e B (que são os limites de integração) é dada por:

 $p_A - p_B = -\gamma (z_A - z_B)$

Portanto, a diferença de pressão entre dois pontos de um fluido estático é igual ao produto do peso específico do fluido multiplicado pela diferença de cotas desses dois pontos, como queríamos demonstrar.

Uma forma simples de verificarmos essa relação é compararmos o jato de água, que jorra a partir de furos em posições diferentes em uma garrafa plástica, como mostra a Figura 1.5. Tem-se que: quanto maior for a diferença da cota do jato em relação à superfície do líquido, maior será a pressão do jato. Por consequência, maior será a sua velocidade, como exemplificado na Figura 1.5.

Figura 1.5 | Demonstração da diferença de pressão entre dois pontos de um fluido estático



Fonte: http://efisica.if.usp.br/mecanica/basico/pressao/experimento/>. Acesso em: 25 mar. 2017.

Utilizando a superfície livre do líquido como referência de altura em z, vamos supor que os furos A e B estejam a uma distância de 10 cm e 20 cm, respectivamente, em relação à referência. Como o eixo z tem direção para cima, tem-se que $z_A = -10~cm$ e $z_B = -20~cm$ em relação à referência adotada. Supondo que o peso específico da água seja $10.000~N/m^3$, e que a pressão na superfície seja a pressão atmosférica, ou seja, igual a $101,3~kN/m^2$, tem-se que a pressão no ponto A será:

$$p_A - p_0 = -\gamma (z_A - z_0)$$

$$p_A - 101,3 \ kN \ / \ m^2 = -10 \ kN \ / \ m^3 \cdot (-0,1m - 0m)$$

$$p_A = 201,3 \ kN \ / \ m^2$$

Analogamente, tem-se que a pressão no ponto B será:

$$p_B - p_0 = -\gamma (z_B - z_0)$$

$$p_B - 101,3 \ kN / m^2 = -10 \ kN / m^3 \cdot (-0.2m - 0m)$$

$$p_B = 301,3 \ kN / m^2$$

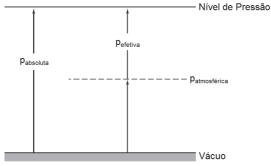
A pressão em B é maior que a pressão em A, como queríamos demonstrar.

Finalizando, temos algumas conclusões importantes do teorema de Stevin:

- A pressão de dois pontos situados na mesma cota (ou seja, altura em z) é a mesma.
- A distância física entre dois pontos, em relação aos eixos x e y, não influencia na diferença de pressão entre eles.
- Para gases, se o peso específico do gás for muito pequeno e a diferença de cotas entre dois pontos não for muito grande, tem-se que a diferença de pressão entre esses dois pontos é desprezível.

Antes de aplicarmos o teorema de Stevin, é interessante conhecermos os níveis de pressão de referência utilizados nos problemas de engenharia. Se o nível de referência utilizado for o vácuo (nível de pressão zero absoluto), temos uma pressão absoluta. Caso o nível de referência utilizado for a pressão atmosférica, temos uma pressão efetiva. A Figura 1.6 ilustra as pressões absoluta e efetiva relativas aos níveis de referência citados.

Figura 1.6 | Pressões absoluta e efetiva relativas aos níveis de referência citados



Fonte: adaptada de Fox, Pritchard e McDonald (2013, p. 52).

Se a pressão efetiva for negativa, ou seja, caso a pressão medida for menor que a pressão atmosférica, chamamos essa pressão de vacuométrica. Se a pressão efetiva for positiva, ou seja, caso a pressão medida for maior que a pressão atmosférica, chamamos essa pressão de manométrica. A pressão efetiva pode ser calculada a partir de:

$$p_{efetiva} = p_{absoluta} - p_{atmosférica}$$

Vale ressaltar que a pressão atmosférica é 101,3 kPa na condição de atmosfera padrão ao nível de mar.

Pesquise mais

Existem várias unidades de pressão utilizadas na literatura e na indústria. Por exemplo, temos o Pascal (Pa) e seus múltiplos, a atmosfera (atm), o bar (bar), o milímetro de coluna de mercúrio (mmHg), a libra por polegada ao quadrado (*Ib I pol*² ou Psi), o metro de coluna de água (mca) etc. Para conhecer melhor as unidades de pressão e os fatores de conversão de unidades, pesquisar sobre o assunto no livro de Brunetti (2008, p. 24-25).

Fonte: BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos fluidos**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

Lei de Pascal

O enunciado dessa lei diz que a pressão aplicada em um ponto de fluido em repouso transmite-se integralmente a todos os pontos do fluido.

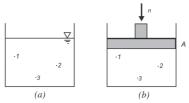
Vamos entender melhor como funciona essa lei? Imagine um recipiente cilíndrico, em que o fluido apresenta uma superfície livre, em contato com a atmosfera, como ilustrado na Figura 1.7 (a).

Suporemos que a pressão nos pontos 1, 2 e 3, mostrados na Figura 1.7 (a), é respectivamente $p_1 = 1 \, N \, / \, cm^2$, $p_2 = 2 \, N \, / \, cm^2$ e $p_3 = 3 \, N \, / \, cm^2$. Se colocarmos um êmbolo na parte superior do recipiente e aplicarmos uma força de 100 N aplicada em uma área de 10 cm^2 , como ilustrado na Figura 1.7 (b), teremos uma pressão de:

$$p = \frac{F_n}{A} = \frac{100 \text{ N}}{10 \text{ cm}^2} = 10 \frac{N}{\text{cm}^2}$$

Aplicando a lei de Pascal, tem-se que essa pressão aplicada em um ponto de fluido em repouso transmite-se integralmente a todos os pontos do fluido, ou seja, teremos a seguinte pressão nos pontos 1, 2 e 3: $p_1 = 11 \, N \, / \, cm^2$, $p_2 = 12 \, N \, / \, cm^2$ e $p_3 = 13 \, N \, / \, cm^2$.

Figura 1.7 | Desenho esquemático de um experimento que ilustra a aplicação da lei de Pascal



Fonte: elaborada pelo autor.

Como podemos utilizar esse enunciado em problemas práticos da realidade profissional de um engenheiro ou tecnólogo?

Exemplificando

Como um elevador hidráulico consegue levantar um carro de 1 tonelada de peso? Como funciona o sistema de transmissão e amplificação de força de um guindaste?

Note que, se a pressão é definida como sendo o quociente da força normal pela área de aplicação da força:

$$p = \frac{F_n}{A}$$

Se a pressão aplicada é distribuída integralmente em todos os pontos do fluido, como diz a lei de Pascal, podemos amplificar ou reduzir a força aplicada, diminuindo ou aumentando a área de aplicação dessa força, respectivamente.

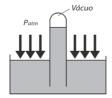
Finalmente, tem-se que a lei de Pascal é largamente utilizada em problemas que envolvem sistemas que transmitem e amplificam uma força, através da pressão aplicada em uma área, como em uma prensa hidráulica para conformação de metais, em um sistema de freio hidráulico, em servomecanismos etc.

Medidores de pressão

Na indústria, máquinas e equipamentos, como bombas e compressores, trabalham com uma determinada pressão de trabalho. Os medidores de pressão são utilizados na indústria com a finalidade de medir a pressão de trabalho, a fim de regulá-la ou limitá-la. Eles são divididos em dois tipos: os que medem a pressão atmosférica e os que medem a pressão manométrica.

O barômetro mede a pressão atmosférica local, também chamada de barométrica. Esse medidor consiste basicamente de um tubo cheio de líquido, que é virado de ponta-cabeça em um recipiente cheio de mercúrio, como ilustra a Figura 1.8.

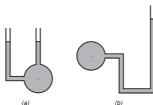
Figura 1.8 | Desenho esquemático de um barômetro



Fonte: elaborada pelo autor.

Existem vários tipos de manômetros, que são instrumentos utilizados para medir pressão manométrica. Por exemplo, temos o Manômetro Tubo de Bourbon, a Coluna Piezométrica (também chamada de Piezômetro), o Manômetro com Tubo em U etc. A Figura 1.9 (a) ilustra o Piezômetro e a Figura 1.9 (b) ilustra um Manômetro com Tubo em U.

Figura 1.9 | Tipos de manômetros



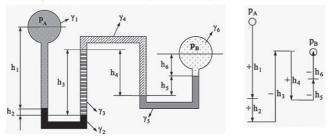
Fonte: elaborada pelo autor.

Partindo para os cálculos, tem-se que a equação manométrica é a expressão que permite o cálculo da pressão em um reservatório ou a diferença de pressão entre dois reservatórios. Nota-se que uma pequena modificação na equação do teorema de Stevin permite a sua utilização para o cálculo da diferença de pressão entre dois pontos separados por uma série de fluidos, como mostra a equação a seguir, em que h é a diferença de altura entre as superfícies que separam os fluidos.

$$\Delta p = \sum_{i} \gamma_{i} \cdot h_{i}$$

Existe uma regra prática para utilização da equação manométrica, a fim de facilitar a sua aplicação. A partir do manômetro ilustrado na Figura 1.10, a regra é: iniciando do lado esquerdo, soma-se à pressão p_A a pressão das colunas descendentes e subtrai-se a pressão das colunas ascendentes.

Figura 1.10 | Regra prática para utilização da equação manométrica



Fonte: Brunetti (2008, p. 29).

Utilizando a regra prática, chegamos na seguinte equação manométrica:

$$p_A + \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 - \gamma_3 h_3 + \gamma_4 h_4 - \gamma_5 h_5 - \gamma_6 h_6 = p_B$$

Vale lembrar que a equação manométrica encontrada, utilizandose a regra prática, vale somente para a configuração de manômetro apresentada na figura, ou seja, a equação manométrica varia de acordo com o tipo de manômetro utilizado.

Empuxo e estabilidade

Tem-se que o empuxo, também chamado de princípio de Arquimedes, pois foi estudado pelo cientista grego Arquimedes no ano 220 a. C., é definido como sendo a força líquida vertical agindo

sobre um corpo imerso em um líquido ou flutuando em sua superfície. Tal força é dada devido à pressão exercida pelo líquido sobre o corpo. Tem-se, portanto, que a força de empuxo do fluido é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo, como mostra a seguinte equação:

$$F_{empuxo} = \rho \cdot g \cdot V$$

Assim, tem-se que o empuxo é uma força vertical com sentido para cima, agindo contrariamente à força peso do corpo.

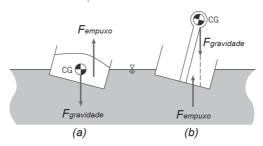


Como o empuxo pode ser utilizado no projeto de peças flutuantes, equipamentos submersíveis ou para tornar os balões dirigíveis?

Note que, no ano de 220 a. C., Arquimedes utilizou essa relação para determinar o teor de ouro na coroa do rei Hiero II. Como isso foi possível?

Finalizando, tem-se que o conjugado formado pela força peso do objeto (devido à gravidade), que atua em seu centro de gravidade, também chamado de CG, e pela força de empuxo, define a estabilidade de uma embarcação flutuando na superfície de um líquido, como mostra a Figura 1.11.

Figura 1.11 | Estabilidade de corpos flutuantes



Fonte: adaptada de Fox, Pritchard e McDonald (2013, p. 74).

A partir da Figura 1.11 (a), nota-se que a linha de ação das forças peso e de empuxo estão deslocadas, produzindo um conjugado que tende a endireitar a embarcação. Já na Figura 1.11 (b), percebe-se que o conjugado produzido pelo deslocamento da linha de ação das forças tende a virar a embarcação, fato não desejável. Portanto, no caso (a), temos um exemplo de uma condição de estabilidade e, no caso (b), temos um exemplo de uma condição de instabilidade.

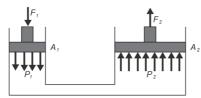
Sem medo de errar

Retomando o contexto de aprendizagem, temos uma empresa fabricante de sistemas e equipamentos hidráulicos e pneumáticos, que contratou você como projetista que atuará na liderança responsável pelo projeto e desenvolvimento de novos produtos.

Na situação-problema (SP) desta seção, projetaremos um elevador hidráulico para levantar um automóvel com uma massa de 1.000 kg.

Para resolvermos essa SP, devemos saber qual é a força aplicada no pistão e qual é a relação de áreas para amplificação da força. A Figura 1.12 ilustra o desenho esquemático desse sistema.

Figura 1.12 | Desenho esquemático do elevador hidráulico



Fonte: elaborada pelo autor.

Como exemplo de solução da SP, consideraremos que a área do pistão de entrada da força seja $A_1 = 10 \ cm^2$, a área do pistão de saída, onde o automóvel será levantado, é $A_2 = 100 \ cm^2$.

A força peso do automóvel, considerando a aceleração da gravidade igual a 9,81 m/s² é:

$$F_2 = m \cdot g = 1.000 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 = 9.810 \text{ N}$$

A pressão transmitida ao êmbolo 2 é dada por:

$$p_2 = \frac{F_2}{A_2} = \frac{9.810 \text{ N}}{100 \text{ cm}^2} = 98.1 \text{ N} / \text{cm}^2$$

De acordo com a Lei de Pascal, a pressão aplicada no êmbolo 1 é transmitida integralmente para o êmbolo 2, ou seja: $p_1 = p_2$.

Podemos utilizar a lei de Pascal para saber qual é a força que deve ser aplicada para levantar o automóvel. Temos que:

$$p_1 = \frac{F_1}{A_1} = p_2 = 98,1 \, N \, / \, cm^2$$

Portanto:

$$F_1 = 98.1 \, N \, / \, cm^2 \cdot A_1 = 98.1 \, N \, / \, cm^2 \cdot 10 \, cm^2 = 981 \, N$$

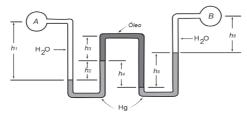
Devemos aplicar uma força maior que 981 N para levantar o automóvel. Essa força é 10 vezes menor que a força peso do automóvel. Assim, podemos elevar cargas grandes aplicando uma força relativamente pequena.

Avançando na prática

Cálculo da diferença de pressão entre dois reservatórios Descrição da situação-problema

Nesta nova situação-problema, calcularemos a diferença de pressão entre dois reservatórios, utilizando o dispositivo mostrado na Figura 1.13.

Figura 1.13 | Manômetro utilizado para medir a diferença de pressão entre dois reservatórios



Fonte: adaptada de Fox, Pritchard e McDonald (2013, p. 58).

Tem-se que água escoa no interior dos tubos A e B, mercúrio está na parte inferior dos dois tubos em U e óleo lubrificante está na parte superior do tubo em U invertido. As alturas estão indicadas em centímetros e os pesos específicos são: $\gamma_{H2O}=10.000~N/m^3$; $\gamma_{Hg}=135.500~N/m^3$ e $\gamma_{Óleo}=8.800~N/m^3$. As alturas são: $h_1=10~cm$, $h_2=3~cm$, $h_3=4~cm$, $h_4=4~cm$, $h_5=5~cm$ e $h_6=8~cm$.

Resolução da situação-problema

Aplicando a regra prática da equação manométrica, temos que:

$$p_A + \gamma_{H2O} \cdot h_1 - \gamma_{Hg} \cdot h_2 + \gamma_{Oleo} \cdot h_4 - \gamma_{Hg} \cdot h_5 - \gamma_{H2O} \cdot h_6 = p_B$$

Portanto, a diferença de pressão entre os pontos A e B é:

$$\begin{split} \rho_A - \rho_B &= -\gamma_{H2O} \cdot h_1 + \gamma_{Hg} \cdot h_2 - \gamma_{Oleo} \cdot h_4 + \gamma_{Hg} \cdot h_5 + \gamma_{H2O} \cdot h_6 \\ \rho_A - \rho_B &= -10.000 \ N \ / \ m^3 \cdot 0,1 \ m + 135.500 \ N \ / \ m^3 \cdot 0,03 \ m - 8.800 \ N \ / \ m^3 \cdot 0,04 \ m + \\ &\quad + 135.500 \ N \ / \ m^3 \cdot 0,05 \ m + 10.000 \ N \ / \ m^3 \cdot 0,08 \ m \\ \rho_A - \rho_B &= 10.288 \ N \ / \ m^2 \end{split}$$

Faça valer a pena

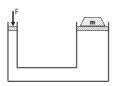
1. No estudo da mecânica dos fluidos é muito importante conhecer os níveis de pressão de referência utilizados nos problemas de engenharia. Esse referencial pode ser o vácuo absoluto ou a pressão atmosférica local. Dependendo de qual for essa referência, a pressão recebe um nome específico.

Analise as informações a seguir:

- I. Se o nível de referência utilizado for o vácuo, temos uma pressão absoluta.
- II. Se o nível de referência utilizado for a pressão atmosférica, temos uma pressão efetiva.
- III. Se a pressão efetiva for negativa, ou seja, caso a pressão medida for menor que a pressão absoluta, chamamos essa pressão de vacuométrica.
- IV. Se a pressão efetiva for positiva, ou seja, caso a pressão medida for maior que a pressão atmosférica, chamamos essa pressão de manométrica.

É correto o que se afirma:

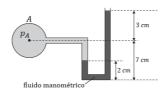
- a) Somente em II e III.
- b) Somente em I e II.
- c) Somente em I, II e IV.
- d) Somente em I, II e III.
- e) Em I, II, III e IV.
- **2.** Uma força F de 850 N é aplicada ao pistão menor de um elevador hidráulico ilustrado na figura a seguir. A área a do pistão menor é de 15 cm² e a área do pistão maior é de 150 cm². O fluido utilizado no elevador hidráulico é água ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$). Que massa m deve ser colocada no pistão maior para manter ambos os pistões no mesmo nível? Para seus cálculos adote $g = 10 \text{ m/s}^2$.



Com base no texto assinale a alternativa correta.

- a) m = 85 kg.
- b) m = 850 kg.
- c) m = 8500 kg.
- d) Não é possível manter ambos os pistões no mesmo nível.
- e) m = 8.5 kg.

3. No manômetro da figura a seguir, o fluido no reservatório A é a água e o fluido manométrico é o mercúrio. Qual é a pressão manométrica pA? Dados: $\gamma_{squa} = 10000 N/m^3$; $\gamma_{mercirio} = 136000 N/m^3$; $\gamma_{atm} = 101,3 Kpa$



Com base no texto assinale a alternativa correta.

- a) $p_A = 12,15 \text{ kPa}$.
- b) $p_A = 8,26 \text{ kPa}.$
- c) $p_{\Delta} = 10,38 \text{ kPa.}$
- d) $p_{\Delta} = 16,29 \, kPa$.
- e) $p_{\Delta} = 14,77 \text{ kPa.}$

Seção 1.3

Cinemática dos fluidos

Diálogo aberto

Caro aluno, a cinemática dos fluidos, também chamada de hidrodinâmica, é um ramo da mecânica dos fluidos que estuda os fluidos em movimento. A hidrodinâmica é dividida em duas grandes áreas de estudo: a hidráulica, tema que é o foco desta seção, que estuda os líquidos em movimento, e a aerodinâmica, que estuda os gases em movimento. Os princípios da cinemática dos fluidos são utilizados, por exemplo, no cálculo das forças de arrasto e de sustentação em aeronaves; no cálculo da vazão de petróleo em um poço ou através de gasodutos; no cálculo da perda de carga em sistemas de bombeamento; na modelagem do escoamento através de um corpo aerodinâmico, como um automóvel etc.

Portanto, tem-se que, para solucionar um problema de dinâmica de fluidos, normalmente temos que calcular algumas variáveis do problema, tais como a velocidade, a vazão, a pressão, a densidade, como sendo uma função do tempo e do espaço.

Atualmente, a teoria da cinemática contribui no projeto de sistemas das mais variadas áreas, como no dimensionamento de uma bomba para um sistema de recalque, na indústria química. Vale ressaltar que a utilização de sistemas hidráulicos e pneumáticos para automação e controle de processos e operações repetitivas é de grande importância tecnológica, sendo, desse modo, utilizados atualmente em toda e qualquer área e setor industrial na indústria moderna.

Assim, o contexto de aprendizagem utilizado como situação da realidade profissional desta unidade envolve uma empresa fabricante de sistemas e equipamentos hidráulicos e pneumáticos, que contratou você como projetista que atuará na liderança responsável pelo projeto e desenvolvimento de novos produtos.

Na situação-problema (SP) desta seção, projetaremos o sistema hidráulico de uma prensa que necessita de uma vazão de fluido, suprida por uma bomba hidráulica, que seja suficiente para o atuador hidráulico executar a sua função de embutimento.

Para isso, devemos conhecer e compreender os conceitos de regime de escoamento, que é definido pelo número de Reynolds; de escoamento unidimensional; de vazão e velocidade média do escoamento e da equação da continuidade para regime permanente, a fim de aplicá-los na solução da situação-problema proposta.

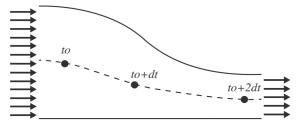
Está preparado para esse novo desafio? Bons estudos!

Não pode faltar

Para iniciarmos o estudo da Cinemática dos fluidos, precisamos saber como analisar o comportamento de um escoamento de um fluido.

Lagrange (1736-1813) inventou um método de análise que acompanha a trajetória de uma única partícula de fluido ao longo do escoamento. Entende-se por trajetória o lugar geométrico dos pontos ocupados por uma única partícula em instantes sucessivos, como mostra a Figura 1.14. Esse método é utilizado guando escolhemos um sistema, que é definido como uma região no espaço com uma quantidade de massa fixa como objeto de estudo. Tem-se que essa quantidade de massa fixa é delimitada por uma fronteira, através da qual não há fluxo de massa, sendo que o volume do sistema pode variar. A desvantagem da utilização desse método é que, dependendo do sistema a ser estudado, a modelagem torna-se matematicamente muito trabalhosa, pois temos que analisar um conjunto muito extenso de equações diferenciais parciais para estudar o escoamento ponto a ponto, considerando todas as partículas de fluido. Um exemplo da utilização dessa abordagem é o acompanhamento das partículas de óleo no oceano, no caso de um vazamento ou derramamento de óleo, que causa impacto ambiental devido à contaminação.

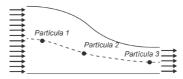
Figura 1.14 | Método de análise lagrangeano



Fonte: elaborada pelo autor.

Euler (1707-1783) inventou um outro método de análise que estuda as propriedades de um escoamento fluido em pontos fixos no espaço em função do tempo, como mostra a Figura 1.15. Esse método é utilizado quando escolhemos um volume de controle, que é uma quantidade de volume, ou região do espaço, através da qual há fluxo de massa como objeto de estudo. Portanto, nesse método, as propriedades do campo de escoamento são descritas como sendo uma função das coordenadas espaciais e do tempo. A maioria dos problemas de mecânica dos fluidos utiliza esse método.

Figura 1.15 | Método de análise euleriano

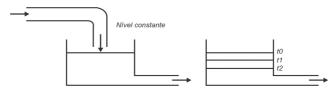


Fonte: elaborada pelo autor.

Neste livro didático, estudaremos o escoamento de um fluido de acordo com a seguinte classificação: quanto à variação no tempo; quanto à variação no espaço; quanto ao movimento de rotação; e quanto à variação da trajetória.

Quanto à classificação do escoamento em relação à variação no tempo, temos dois tipos de escoamento: em regime permanente e em regime variado. Tem-se que, no regime permanente, as propriedades do fluido não variam em relação ao tempo, ao passo que, no regime variado, as propriedades do fluido variam em relação ao tempo. Um exemplo clássico é o estudo de um reservatório, mostrado na Figura 1.16. Tem-se um regime permanente quando a quantidade de fluido que entra no reservatório é a mesma que sai, ou seja, o volume de fluido no reservatório é constante. Por outro lado, se interrompermos a entrada de fluido no reservatório, o volume de fluido no reservatório vai diminuir, fazendo com que o volume de fluido no reservatório varie em relação ao tempo.

Figura1.16 | Regime permanente e regime variado



Fonte: elaborada pelo autor.

A classificação em relação ao movimento de rotação não faz parte do escopo desse livro didático, mas, a título de informação, temse que os escoamentos de interesse em aplicações de engenharia são considerados como sendo escoamentos irrotacionais, ou seja, podemos desprezar o movimento das partículas em relação ao seu próprio centro de massa, desconsiderando-se, portanto, a velocidade angular das partículas em torno do centro de massa.

Veremos a classificação do escoamento com relação à variação no espaço e com relação à variação da trajetória nos tópicos a seguir.

Número de Reynolds: escoamento laminar; transição; turbulento

Osborne Reynolds (1842-1912) foi um matemático e cientista britânico que contribuiu em diversas áreas, como a eletricidade e o magnetismo, além da hidrodinâmica. Em mecânica dos fluidos, ele foi pioneiro no estudo sobre os regimes de escoamento, introduzindo o mais importante número adimensional da mecânica dos fluidos.

Além disso, ele formulou a teoria moderna da lubrificação e também a noção de campos médios flutuantes, importante teoria utilizada até hoje em dinâmica dos fluidos computacional (do inglês computational fluid dynamics - CFD).

Para definir os regimes de escoamento quanto à variação da trajetória, Reynolds utilizou um simples aparato, no ano de 1883, a fim de visualizar o escoamento no interior de uma tubulação transparente. Para isso, como mostra a Figura 1.17, Reynolds utilizou um escoamento de água em uma tubulação com a injeção de uma linha de corante

Figura 1.17 | Desenho esquemático do aparato utilizado no experimento de Reynolds



Fonte: adaptada de Brunetti (2008, p. 68).

Tem-se que, para baixas vazões, o escoamento ocorre através de camadas paralelas, chamadas de lâminas, ou seja, as partículas de fluido seguem linhas de corrente retas e contínuas, bem definidas,

como ilustrado na Figura 1.18. Reynolds nomeou esse regime de escoamento de escoamento laminar. A título de informação, definese linha de corrente como a linha tangente aos vetores de velocidade de diferentes partículas ao mesmo instante.

Figura 1.18 | Ilustração de um regime de escoamento laminar



Fonte: https://analysisofflowinpipes.jimdo.com/contents/reynolds-number>. Acesso em: 10 abr. 2017.

Aumentando-se um pouco a vazão, Reynolds percebeu que, em alguns pontos, o escoamento deixava de seguir uma linha de corrente bem definida, passando a ter uma trajetória irregular, como ilustra a Figura 1.19. Após finalizar o seu estudo, Reynolds chamou esse comportamento de regime de transição, pois ele ora é laminar, ora é turbulento.

Figura 1.19 | Ilustração de um regime de escoamento de transição



Fonte: https://analysisofflowinpipes.jimdo.com/contents/reynolds-number. Acesso em: 10 abr. 2017.

Aumentando-se ainda mais a vazão, notou-se que o escoamento não ocorria mais em lâminas, passando a ter uma trajetória não definida, chamada de desordenada, caótica, como mostra a Figura 1.20. Esse regime de escoamento foi classificado como turbulento.

Figura 1.20 | Ilustração de um regime de escoamento turbulento



Fonte: https://analysisofflowinpipes.jimdo.com/contents/reynolds-number. Acesso em: 10 abr. 2017.

Para definir os limites de transição entre os regimes de escoamento, utilizamos o mais importante número adimensional de toda mecânica dos fluidos: o número de Reynolds, dado por ${\bf Re}$. Para um escoamento interno, dentro de uma tubulação com diâmetro D, o número de Reynolds ${\bf Re}_{\it D}$ é definido como:

$$\mathsf{Re}_D = \frac{\rho \cdot V_m \cdot D}{\mu} = \frac{V_m \cdot D}{V}$$

Pesquise mais

Assimile

O número de Reynolds nada mais é do que uma relação entre as forças de inércia e viscosa. Quanto maior o seu valor, menor a influência da força viscosa no escoamento. Pesquise mais sobre o número de Reynolds no livro *Introdução à mecânica dos fluidos*, p. 35-41.

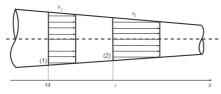
Fonte: FOX, Robert W.; PRITCHARD; Philip J., McDONALD, Alan T. Introdução à mecânica dos fluidos. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

Finalizando, a fim de definir os regimes de escoamento, tem-se o seguinte critério: para valores de ${\rm Re}_D < 2.000$, o escoamento é laminar; para valores de número de Reynolds entre $2.000 < {\rm Re}_D < 2.400$, o escoamento é de transição; e para valores de ${\rm Re}_D > 2.400$, o escoamento é turbulento

Escoamento unidimensional

Esse escoamento, ilustrado na Figura 1.21, é o tipo mais simples dentro da classificação do escoamento quanto à variação no espaço. No escoamento unidimensional, utilizamos somente uma única coordenada para descrever as propriedades do fluido.

Figura 1.21 | Ilustração de um escoamento unidimensional



Fonte: Brunetti (2008, p. 71).

As propriedades variam com relação a uma única coordenada, sendo, portanto, constantes em relação às outras coordenadas, motivo pelo qual esse escoamento é também chamado de escoamento uniforme na seção.

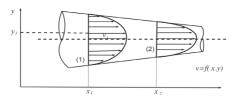
Esse modelo é bastante utilizado em situações em que os valores médios das propriedades do fluido são relevantes para a análise do problema,

como no cálculo do número de Reynolds do escoamento, em que precisamos saber qual é a velocidade média do escoamento.

E se tivéssemos um escoamento para o qual precisássemos de duas ou três coordenadas para descrever as propriedades do fluido?

Por exemplo, se a variação da velocidade do fluido for uma função de duas coordenadas x e y, tem-se que o escoamento é bidimensional, como mostrado na Figura 1.22. Finalmente, se a variação da velocidade do fluido for uma função das três coordenadas x, y e z, tem-se que o escoamento é tridimensional.

Figura 1.22 | Ilustração de um escoamento bidimensional



Fonte: Brunetti (2008, p. 71).

Obviamente, ao aumentarmos o número de dimensões do escoamento, tornamos a modelagem desse escoamento mais complexa. Dependendo do tipo de solução exigida em um problema proposto qualquer, utilizaremos o tipo de escoamento adequado. Por exemplo, para modelarmos o escoamento em torno de um perfil aerodinâmico (um automóvel, uma aeronave etc.) em uma simulação em um túnel de vento, utilizamos computacionalmente um escoamento tridimensional.

Vazão e velocidade média do escoamento

A vazão volumétrica, dada pela letra Q, é definida como sendo o volume de fluido \forall que cruza uma determinada seção do escoamento por unidade de tempo t, como mostra a equação a seguir: $Q = \frac{\forall}{t}$

Uma aplicação prática dessa formulação é o cálculo do tempo de enchimento de um reservatório, com um volume \forall , a partir de uma vazão especificada.

Outra maneira de calcular a vazão volumétrica é trabalharmos com a seguinte equação, em que V é a velocidade média do escoamento e A é a área de seção transversal da tubulação.

$$Q = V_m \cdot A$$

A vazão mássica, dada por Q_m , é expressa pela multiplicação da vazão volumétrica pela massa específica do fluido.

$$Q_m = \rho \cdot Q = \rho \cdot V_m \cdot A$$

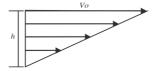
Finalmente, a formulação para o cálculo da velocidade média é:

$$V_m = \frac{1}{A} \int_A V dA$$



Neste exemplo, determinaremos a velocidade média do escoamento, a partir de um diagrama de velocidades linear. A Figura 1.23 ilustra o desenho esquemático do problema proposto.

Figura 1.23 | Desenho esquemático do problema proposto



Fonte: elaborada pelo autor.

Vamos supor que o escoamento seja bidimensional, sendo que a profundidade do escoamento, na direção normal ao plano da figura, seja dada por b. Portanto, vamos supor que a área da seção transversal ao escoamento seja dada por:

$$A = b \cdot h$$

Tem-se que, se o diagrama de velocidades é linear, a função matemática que relaciona a velocidade e o espaço é dada por:

$$V = C_1 \cdot y + C_2$$

Em que C_1 e C_2 são respectivamente os coeficientes angular e linear da reta, que são determinados pelas seguintes condições de contorno: para y=0, temos que V=0 e para y=h, temos que $V=V_0$. Logo, $C_2=0$ e $C_1=\frac{V_0}{h}$. Finalmente:

$$V = \frac{V_0}{h} \cdot y$$

Utilizando a formulação para o cálculo da velocidade média, tem-se que:

$$V_m = \frac{1}{A} \int_A V dA = \frac{1}{b \cdot h} \int_0^h \left(V_0 \cdot \frac{y}{h} \right) \cdot b \cdot dy = \frac{V_0}{h^2} \cdot \frac{y^2}{2} \Big|_0^h = \frac{V_0}{2}$$

Concluindo, temos que esse resultado é bastante intuitivo, visto que se a velocidade varia linearmente de zero a V_0 , a velocidade média é exatamente a metade da velocidade máxima e está localizada em y = h/2.

Equação da continuidade para regime permanente

Esta equação, de extrema importância para a mecânica dos fluidos, nada mais é que a lei de conservação da massa, escrita em termos da vazão mássica.

Considerando as vazões mássicas de entrada e de saída, em um escoamento em regime permanente, ou seja, em que não exista variação das propriedades em relação ao tempo, temos que:

$$Q_{m_{entrada}} = Q_{m_{saida}}$$

Se o fluido for considerado como sendo incompressível, tem-se que a sua massa específica não varia, portanto podemos reescrever a equação da continuidade da seguinte forma:

$$\rho.Q_{entrada} = \rho.Q_{saida}$$

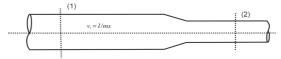
Ou seja:

$$Q_{entrada} = Q_{saida}$$



Neste exemplo, ilustrado na Figura 1.24, vamos supor que água escoa em regime permanente na tubulação com uma contração, ilustrada na figura. Queremos determinar a vazão volumétrica, a vazão mássica e a velocidade média na seção (2).

Figura 1.24 | Desenho esquemático do problema proposto



Fonte: Brunetti (2008, p. 79).

Dados: $V_{m_1} = 1 \, m \, / \, s$, $A_1 = 0,001 \, m^2$, $A_2 = 0,0005 \, m^2$, $\rho_{H2O} = 1.000 \, kg \, / \, m^3$, $g = 9,81 \, m \, / \, s^2$.

Considerando-se o fluido incompressível, tem-se que a vazão volumétrica na seção (2) é calculada como:

$$Q_2 = Q_1 = V_{m_1} \cdot A_1 = 1 \ m \ / \ s \cdot 0,001 \ m^2 = 0,001 \ m^3 \ / \ s$$

A vazão mássica na seção (2) é dada por:

$$Q_{m_2} = Q_{m_1} = \rho_{H2O} \cdot V_{m_1} \cdot A_1 = 1.000 \text{Kg} / m^3 \cdot 1 \, \text{m} / \text{s} \cdot 0,001 \, m^2 = 1,0 \, \text{kg} / \text{s}$$

Finalmente, a velocidade média na seção (2) é:

$$Q_{1} = Q_{2}$$

$$V_{m_{1}} \cdot A_{1} = V_{m_{2}} \cdot A_{2}$$

$$1 \ m / s \cdot 0,001 \ m^{2} = V_{m_{2}} \cdot 0,0005 \ m^{2}$$

$$V_{m_{2}} = 2 \ m / s$$

Para situações em que temos mais de uma entrada e mais de uma saída de fluido, podemos utilizar a formulação geral:

$$\sum_{entrada} Q_m = \sum_{saida} Q_m$$



Reflita

Se tivermos um equipamento com várias entradas e várias saídas, em que a massa específica do fluido em cada uma das entradas seja diferente, a equação da continuidade é válida? Se for válida, como podemos aplicá-la?

Sem medo de errar

Retomando o contexto de aprendizagem, temos uma empresa fabricante de sistemas e equipamentos hidráulicos e pneumáticos, que

contratou você como projetista, que atuará como líder responsável pelo projeto e desenvolvimento de novos produtos.

Na situação-problema (SP) desta seção, projetaremos o sistema hidráulico de uma prensa que necessita de uma vazão de fluido, suprida por uma bomba hidráulica, que seja suficiente para o atuador hidráulico executar a sua função de embutimento. Calcular a vazão e o número de Reynolds do escoamento de fluido, a partir da velocidade média na tubulação que realiza a conexão entre a bomba e o atuador.

Para resolvermos essa SP, devemos saber qual é a velocidade média do escoamento na tubulação. Se o perfil de velocidades for linear, sabemos que:

$$V_m = \frac{V_0}{2}$$

Após calcularmos a velocidade média do escoamento, tem-se que a vazão é dada por:

$$Q = V_m \cdot A$$

O número de Reynolds é calculado por:

$$Re_D = \frac{\rho \cdot V_m \cdot D}{\mu} = \frac{V_m \cdot D}{V}$$

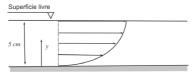
Portanto, para resolvermos a SP, precisamos saber as propriedades do fluido utilizado no sistema hidráulico, a velocidade V_0 e o diâmetro da tubulação que será utilizada para realizar a conexão entre a bomba e o atuador.

Avançando na prática

Cálculo da velocidade média do escoamento Descrição da situação-problema

Nesta nova situação-problema, determinaremos a velocidade média do escoamento a partir de um diagrama de velocidades dado por uma função quadrática: $V = 75 \cdot y - y^2$. A Figura 1.25 ilustra o desenho esquemático do problema proposto.

Figura 1.25 | Desenho esquemático do problema proposto



Fonte: Brunetti (2008, p. 82).

Resolução da situação-problema

Vamos supor que o escoamento é bidimensional, sendo que a profundidade do escoamento, na direção normal ao plano da figura, é dada por b. Portanto, vamos supor que a área da seção transversal ao escoamento é dada por:

$$A = b \cdot h$$

Utilizando a formulação para o cálculo da velocidade média, temse que:

$$V_{m} = \frac{1}{A} \int_{A} V dA = \frac{1}{A} \int_{0}^{h} \left(75 \cdot y - y^{2} \right) \cdot b \cdot dy = \frac{1}{A} \cdot \left(75 \cdot \frac{y^{2}}{2} - \frac{y^{3}}{3} \Big|_{0}^{h} \right) = \frac{75 \cdot h^{2}}{2 \cdot A} - \frac{h^{3}}{3 \cdot A}$$

Faça valer a pena

1. Um líquido de massa específica 1000 kg/m³ e viscosidade dinâmica 1x10-³ N.s/m² escoa com velocidade se 0,1 m/s por uma tubulação de 10 cm de diâmetro.

Sobre esse escoamento, assinale a alternativa correta.

- a) O escoamento é compressível.
- b) O escoamento é laminar.
- c) O escoamento é invíscido.
- d) O escoamento é transicional.
- e) O escoamento é turbulento.
- **2.** Qual é a vazão volumétrica (Q) de um escoamento com velocidade média de 10 m/s através de uma tubulação de diâmetro igual a 10 cm? Assinale a alternativa correta:
- a) $Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$.
- b) $Q = 100 \text{ cm}^3/\text{s}$
- c) Q = 78.5 L/s
- d) $Q = 3.14 \text{ m}^3/\text{s}$
- e) $Q = 0.78 \text{ m}^3/\text{s}$

3. Qual o tempo necessário, em minutos, para o enchimento completo de um reservatório com capacidade de 3000 litros considerando uma vazão de 0,03 m³/s?

Com base no texto assinale a alternativa correta.

- a) 1,67 minutos.
- b) 2,45 minutos.
- c) 3,32 minutos.
- d) 4,78 minutos
- e) 0,89 minutos.

Referências

BRUNETTI, Franco. Mecânica dos fluidos. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

FOX, Robert W.; PRITCHARD; Philip J.; McDONALD, Alan T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

Equação da energia e escoamento interno

Convite ao estudo

Caro aluno, nesta unidade de ensino, estudaremos a equação da conservação da energia e o escoamento interno, a fim de calcularmos a potência e o rendimento de uma máquina hidráulica, qualquer tipo de transformação de energia que possa ocorrer e a perda de carga de um escoamento em uma instalação hidráulica. Tem-se que o projeto de instalações hidráulicas é muito importante em mecânica dos fluidos, pois toda e qualquer área e setor industrial na indústria moderna é composta por um sistema hidráulico.

A competência de fundamento desta disciplina é compreender os conceitos básicos de fluidos e os seus comportamentos quando em movimento, mediante o uso das equações fundamentais, bem como as diferentes formas de transferência de calor e os princípios e as aplicações da termodinâmica, utilizados no contexto das engenharias.

O objetivo de aprendizagem desta unidade é compreender o conceito da equação da conservação da energia, a fim de calcular a perda de carga em um escoamento interno.

O contexto de aprendizagem utilizado como situação da realidade profissional (SR) proposta nesta unidade é focada em uma empresa fabricante de máquinas hidráulicas (bombas e turbinas) que contratou você, aluno, como projetista que atuará como líder responsável pelo projeto e desenvolvimento de sistemas hidráulicos. Para atingir os objetivos desta unidade, você deve estar apto a:

- Determinar a potência e o rendimento de uma bomba utilizada em uma instalação de recalque de água.

- Calcular o comprimento de entrada da camada limite em um conduto fechado.
- Calcular a perda de carga localizada e distribuída de uma instalação de recalque de água.

Para isso, serão tratados nas seções desta unidade os conceitos fundamentais e as definições sobre as energias mecânicas associadas a um fluido; a equação de Bernoulli; a equação da energia com a presença de uma máquina hidráulica; a equação da energia para diversas entradas e saídas para escoamento em regime permanente; a classificação de condutos; o raio e o diâmetro hidráulico; a camada limite para a placa plana e para o conduto forçado; a rugosidade da tubulação; a classificação das perdas de carga; a perda de carga distribuída; o diagrama de Moody e a perda de carga localizada.

Está preparado para esses grandes desafios? Vamos lá!

Seção 2.1

Equação da energia

Diálogo aberto

Caro aluno, a equação da conservação da energia com a equação da conservação da massa (também chamada de equação da continuidade) é uma das equações mais importantes da mecânica dos fluidos. Tem-se que o cálculo das energias mecânicas associadas a um fluido, o cálculo de uma das incógnitas do escoamento a partir da equação de Bernoulli e o cálculo da potência e do rendimento de uma máquina hidráulica possuem grande importância em várias situações da realidade prática. Os princípios da conservação da energia são utilizados, por exemplo, no cálculo da perda de carga, utilizado no projeto de uma instalação hidráulica.

Assim, o contexto de aprendizagem utilizado como situação da realidade profissional desta unidade envolve uma empresa fabricante de máquinas hidráulicas (bombas e turbinas) que contratou você, aluno, como projetista que atuará como líder responsável pelo projeto e desenvolvimento de sistemas hidráulicos.

Na situação-problema (SP) desta seção, você determinará a potência e o rendimento de uma bomba hidráulica utilizada em uma instalação de recalque de água, a partir da equação da energia com a presença de uma máquina.

Para isso, devemos conhecer e compreender os tipos de energia mecânica associados a um fluido; a equação de Bernoulli; a equação da energia com a presença de uma máquina; a potência e o rendimento de uma máquina e a equação da energia para diversas entradas e saídas para escoamento em regime permanente, a fim de aplicá-los na solução da situação-problema proposta.

Está preparado para esse novo desafio? Bons estudos!

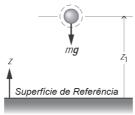
Não pode faltar

Energias mecânicas associadas a um fluido

Tem-se que a energia mecânica, estudada pela mecânica clássica a partir das leis do movimento de Newton, pode ser dividida em: energia potencial, energia cinética e trabalho.

A energia potencial gravitacional é o estado de energia em que um sistema se encontra, devido à sua posição em relação a um campo gravitacional e em relação a uma referência adotada. Essa energia é a medida do potencial de realização de trabalho desse sistema. A partir da Figura 2.1, temos que a energia potencial é dada pela força peso do sistema multiplicada pela altura $\mathbf{Z_1}$ do sistema em relação à superfície de referência, pois o trabalho é calculado como sendo uma força multiplicada por um deslocamento.

Figura 2.1 | Desenho esquemático que apresenta o conceito de energia potencial



Fonte: adaptada de Moran (2014, p. 29)

A equação da energia potencial E_p é representada por:

$$E_p = F_{peso} \cdot z_1 = m \cdot g \cdot z_1$$

A variação de energia potencial entre dois pontos A e B, é dada por:

$$\Delta E_{p} = E_{p_{B}} - E_{p_{A}} = m \cdot g \left(z_{B} - z_{A} \right)$$



Reflita

Para calcularmos a variação de energia potencial entre os dois pontos A e B, interessa-nos saber qual é a posição da superfície de referência? Esse posicionamento altera a resolução do problema proposto?

A energia cinética é uma grandeza escalar que representa o trabalho realizado por uma força quando um corpo está em movimento ao longo de uma trajetória. A Figura 2.2 mostra que a energia cinética depende da massa do corpo e do módulo da velocidade desse corpo.

Figura 2.2 | Desenho esquemático que apresenta o conceito de energia cinética



Fonte: elaborada pelo autor.

A equação da energia cinética E_c é representada por:

$$E_c = \frac{m \cdot V^2}{2}$$

Para o estudo da mecânica dos fluidos, o trabalho W é representado por uma energia de pressão $E_{pressão}$, que corresponde ao potencial de realização de trabalho das forças de pressão que atuam em um escoamento fluido. Tem-se que o trabalho é dado por:

$$W = E_{pressão} = \int_{V} pdV$$

Tem-se que o enunciado da conservação da energia mecânica nos mostra que a energia mecânica total de um escoamento fluido é a soma de todas as energias mecânicas associadas ao fluido.

$$E_{mec\hat{a}nica} = E_p + E_c + E_{press\~ao}$$

$$E_{mec \hat{a}nica} = m \cdot g \cdot z + \frac{m \cdot V^2}{2} + \int_{V} p dV$$



Note que as energias térmicas foram desprezadas, ou seja, o enunciado da conservação da energia mecânica considera somente a energia mecânica total de um escoamento fluido.

Finalizando, tem-se que no Sistema Internacional de Unidades e Medidas (SI), a unidade de energia é o Newton-metro (N.m), denominada de Joule (J).

Equação de Bernoulli

A equação de Bernoulli é a forma mais simplificada da equação da conservação da energia. Portanto, devido ao grande número de hipóteses simplificadoras utilizadas, a equação de Bernoulli dificilmente conduzirá a resultados compatíveis com os problemas

reais de escoamentos fluidos. Apesar disso, é uma das equações mais utilizadas na mecânica dos fluidos, pois é a base conceitual para qualquer estudo mais elaborado, que possa representar com maior exatidão um problema real, a partir da eliminação das hipóteses simplificadoras impostas nessa equação.

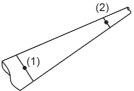
As hipóteses simplificadoras da equação de Bernoulli são:

- Escoamento em regime permanente, ou seja, as propriedades são constantes em relação ao tempo.
- Propriedades uniformes na seção, ou seja, não variam ponto a ponto na área da seção.
- Fluido ideal, ou seja, o escoamento ocorre sem perdas por atrito com a parede da tubulação.
- Fluido incompressível, ou seja, não há variação de massa específica.
 - Energia térmica desprezível, ou seja, não há trocas de calor.
 - Não há máquinas hidráulicas instaladas no trecho em estudo.

A partir da Figura 2.3, a equação de Bernoulli nos mostra que a energia mecânica das seções (1) e (2) se conserva, ou seja:

$$E_{mec\hat{a}nica_1} = E_{mec\hat{a}nica_2}$$

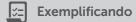
Figura 2.3 | Desenho esquemático que apresenta o conceito da equação de Bernoulli



Fonte: elaborada pelo autor.

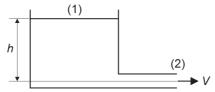
Reescrevendo a igualdade encontrada pela conservação de energia, $E_{mec\hat{a}nica_1} = E_{mec\hat{a}nica_2}$, utilizando todas as energias mecânicas associadas ao fluido, tem-se a forma mais utilizada da equação de Bernoulli:

$$g \cdot z_1 + \frac{{V_1^2}}{2} + \frac{p_1}{\rho} = g \cdot z_2 + \frac{{V_2^2}}{2} + \frac{p_2}{\rho} = \text{constante}$$



Uma aplicação clássica da equação da conservação da energia mecânica é o cálculo da velocidade do jato que sai de um orifício em um tanque de grandes dimensões, ilustrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 | Desenho esquemático do problema proposto



Fonte: elaborada pelo autor.

Considerando que o fluido é ideal; que a altura h do nível do reservatório seja constante e que a pressão nos pontos (1) e (2) é a pressão atmosférica, tem-se que:

 $g \cdot z_1 + \frac{V_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = g \cdot z_2 + \frac{V_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho}$

Temos que $z_1 = h$; $V_1 = 0$ (nível do reservatório é constante); $z_2 = 0$; $V_2 = V$ e $p_1 = p_2$, portanto:

$$g\cdot h=\frac{V^2}{2}$$

Finalmente, a velocidade do jato é dada por:

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Dividindo a equação de Bernoulli por ${\it g}$, podemos também apresentá-la na seguinte forma:

$$Z_1 + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\gamma} = Z_2 + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\gamma}$$

Em que os termos expressam um tipo de energia de uma partícula de peso unitário, ou seja, energia por unidade de peso. Essa definição dá origem ao termo "carga", portanto, temos uma carga potencial, uma carga cinética e uma carga de pressão.

Utilizando H como sendo a energia total por unidade de peso, podemos reescrever a equação de Bernoulli como:

$$H_1 = H_2$$

Pesquise mais

Para entender melhor a dedução da equação de Bernoulli, sugerimos a leitura do livro de Brunetti (2008, p. 87-89), que mostra passo a passo quais foram os cálculos e as considerações para chegarmos na equação apresentada nesta seção.

Fonte: BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos fluidos**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

Equação da energia com a presença de uma máquina; potência de máquina e rendimento

A equação da energia pode ser reescrita retirando-se uma das hipóteses simplificadoras, que diz que "não há máquinas hidráulicas instaladas no trecho em estudo". Tem-se que uma máquina é um equipamento que fornece ou retira energia do fluido, na forma de trabalho. Apesar da validade da hipótese simplificadora que considera que o fluido é incompressível, ou seja, que não há variação de massa específica do fluido, sabe-se que uma máquina que fornece energia ao fluido é uma bomba hidráulica e uma máquina que retira energia do fluido é uma turbina.

Nossa análise vai ser focada na equação de Bernoulli, utilizando a energia total por unidade de peso: $H_1 = H_2$.

Se a máquina for uma bomba hidráulica, tem-se que o fluido receberá uma quantidade de energia, fazendo com que $H_2 > H_1$. A fim de reestabelecer a igualdade, podemos inserir na equação o termo de energia que foi adicionado pela bomba hidráulica, dado por H_B :

$$H_1 + H_B = H_2$$

O termo $H_{\rm B}$ é chamado de altura manométrica da bomba hidráulica, ou, simplesmente, carga da bomba.

Por outro lado, se a máquina for uma turbina hidráulica, tem-se que a turbina retira do fluido uma quantidade de energia, fazendo com que $H_2 < H_1$. Novamente, a fim de reestabelecer a igualdade, inserimos na equação o termo de energia que foi retirado pela turbina, dado por H_7 :

 $H_1 - H_T = H_2$

O termo H_T é chamado de altura manométrica da turbina hidráulica, ou, simplesmente, carga da turbina.

Podemos escrever a equação da energia com a presença de uma máquina de maneira genérica, utilizando o termo $H_{\rm M}$ como sendo a altura manométrica da máquina:

$$H_1 + H_M = H_2$$

Utilizando todas as energias mecânicas associadas ao fluido, podemos reescrever a equação da energia com a presença de uma máguina na forma:

$$z_1 + \frac{{V_1}^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\gamma} + H_M = z_2 + \frac{{V_2}^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\gamma}$$

A potência pode ser dada por uma energia mecânica por unidade de tempo. A potência de uma máquina pode ser escrita na seguinte maneira:

$$Pot_M = \gamma \cdot Q \cdot H_M$$

Para uma bomba hidráulica, tem-se que, devido às perdas na transmissão de potência, nem toda a potência da máquina é transferida para o fluido. Surge, portanto, o conceito de rendimento de uma máquina η , que, para bombas hidráulicas, é dado por:

$$\eta_B = \frac{Pot}{Pot_B}$$

Em que Pot é a potência recebida pelo fluido e Pot_B é a potência da bomba hidráulica.

Analogamente, para turbinas hidráulicas, tem-se que:

$$\eta_T = \frac{Pot_T}{Pot}$$

Em que Pot é a potência retirada do fluido e Pot_T é a potência da turbina hidráulica.

No Sistema Internacional de Unidades e Medidas (SI), a unidade de potência é o Joule por segundo (J/s), que equivale ao Watt, representado pela letra W.

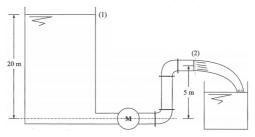
Exemplificando

Um exemplo de aplicação da equação de conservação da energia com a presença de uma máquina, da potência e do rendimento de uma máquina é dado pelo exercício a seguir:

A Figura 2.5 ilustra um tanque de grandes dimensões que abastece

o tanque menor a uma vazão volumétrica de 10 L/s. Supondo que o fluido é ideal, tem-se que a máquina instalada no sistema entre os pontos (1) e (2) é uma bomba hidráulica ou uma turbina hidráulica? Qual é a potência dessa máquina, se o seu rendimento for de 75%? Considerar regime permanente e $\gamma_{H2O} = 10^4~N/m^3$; $A_{tubos} = 10~cm^2$ e $g = 9.81~m/s^2$.

Figura 2.5 | Desenho esquemático do problema proposto



Fonte: adaptada de Brunetti (2008, p. 94).

Aplicando a equação de conservação da energia com a presença de uma máquina, tem-se que:

$$z_1 + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\gamma} + H_M = z_2 + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\gamma}$$

Da Figura 2.5, tem-se que $z_1 = 20 \, m$; $V_1 = 0 \, m \, l \, s$; $p_1 = p_2 = p_{atm} \, e \, z_2 = 5 \, m$.

Podemos calcular a velocidade no ponto (2) a partir da equação da vazão volumétrica:

$$V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{10 \cdot 10^{-3} \ m^3 \ / \ s}{10 \cdot 10^{-4} \ m^2} = 10 \ m \ / \ s$$

Portanto, temos que altura manométrica da máquina é:

$$H_M = 5 m + \frac{(10 m/s)^2}{2 \cdot 9.81 m/s} - 20 m = -9.9 m$$

Analisando o resultado encontrado, nota-se que o valor da altura manométrica da máquina é negativo, o que significa que a máquina retirou energia do fluido. Assim, a máquina instalada é uma turbina, ou seja:

$$H_M = -H_T$$

Portanto, $H_T = 9.9 m$.

A potência fornecida do fluido para a turbina é dada por:

$$Pot = \gamma_{H2O} \cdot Q \cdot H_T = 10^4 \ N / m^3 \cdot 10 \cdot 10^{-3} m^3 / s \cdot 9,9 \ m = 990 \ W$$

A potência da turbina, considerando-se o rendimento de 75% é calculada por:

$$Pot_{T} = \eta_{T} \cdot Pot = 0,75 \cdot 990 \ W = 742,5 \ W$$

Temos que, além da retirada da hipótese simplificadora que diz que "não há máquinas hidráulicas instaladas no trecho em estudo", retirar a hipótese de que o fluido é ideal. Nesse caso, estaremos trabalhando com fluidos reais, ou seja, o escoamento ocorre com perdas por atrito com a parede da tubulação, também chamado de perda de carga. Esse tema será o foco das próximas seções desta Unidade de Ensino

Equação da energia para diversas entradas e saídas para escoamento em regime permanente

Da mesma maneira que fizemos para a equação da conservação da massa, podemos considerar mais de uma entrada e mais de uma saída de energia para o sistema em estudo, ou seja:

$$\sum_{\text{entrada}} E_{\text{mecânica}} = \sum_{\text{saida}} E_{\text{mecânica}}$$

Em que todas as hipóteses simplificadoras utilizadas na conceituação da equação de Bernoulli permanecem mantidas.

Reescrevendo a equação da energia para diversas entradas e saídas para escoamento em regime permanente, utilizando todas as energias mecânicas associadas ao fluido, temos:

$$\sum_{\text{entrada}} z + \frac{V^2}{2 \cdot g} + \frac{p}{\gamma} = \sum_{\text{saida}} z + \frac{V^2}{2 \cdot g} + \frac{p}{\gamma}$$

Finalizando, a potência fornecida ou retirada do fluido por uma máquina instalada no sistema pode ser calculada por:

$$\sum_{entrada} Pot = \sum_{saida} Pot$$

Ou seja:

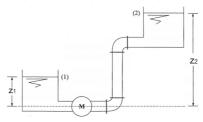
$$\sum_{entrada} \gamma \cdot Q \cdot H = \sum_{saida} \gamma \cdot Q \cdot H$$

Sem medo de errar

Retomando o contexto de aprendizagem, temos uma empresa fabricante de máquinas hidráulicas (bombas e turbinas) que contratou você, aluno, como projetista que atuará como líder responsável pelo projeto e desenvolvimento de sistemas hidráulicos.

A proposta dessa SP é que você determine a potência e o rendimento da bomba hidráulica utilizada na instalação de recalque de água, ilustrada na Figura 2.6.

Figura 2.6 | Desenho esquemático do problema proposto



Fonte: adaptada de Brunetti (2008, p. 94).

Aplicando a equação de conservação da energia com a presença de uma máguina, tem-se que:

$$z_1 + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\gamma} + H_M = z_2 + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\gamma}$$

Da Figura 2.6, tem-se que $V_1 = V_2 = 0 \ m/s$; $P_1 = P_2 = p_{atm}$. Considerando-se que $z_2 - z_1 = h$, em que h representa diferença de altura entre os níveis dos reservatórios, tem-se que a altura manométrica da máquina é:

$$H_M = Z_2 - Z_1 = h$$

Analisando o resultado encontrado, nota-se que o valor da altura manométrica da máquina é positivo, o que significa que a máquina forneceu energia ao fluido. Assim, a máquina instalada é uma bomba hidráulica, como sugerido nessa SP.

A potência fornecida pela bomba hidráulica para o fluido dada por:

$$Pot = \gamma_{H2O} \cdot Q \cdot H_B$$

A potência da bomba hidráulica, considerando-se o rendimento de 75% é calculada por:

$$Pot_B = \frac{Pot}{\eta_B} = \frac{\gamma_{H2O} \cdot Q \cdot H_B}{\eta_B}$$

Avançando na prática

Cálculo da potência de um jato

Descrição da situação-problema

Calcular a potência do jato de um fluido que é descarregado no ambiente por um bocal. A partir da Figura 2.7, temos que V_j é a velocidade do jato; A_j é a área de seção transversa na saída do bocal e γ é o peso específico do fluido.

Figura 2.7 | Desenho esquemático do problema proposto



Fonte: adaptada de Brunetti (2008, p. 92).

Resolução da situação-problema

A energia total do jato por unidade de peso é dada por:

$$H_j = z_j + \frac{{V_j}^2}{2 \cdot g} + \frac{p_j}{\gamma}$$

Em que $p_j = p_{atm} = 0$ e podemos considerar que $z_j = 0$, ou seja, que a superfície de referência está alinhada exatamente na linha de centro do bocal. Portanto:

$$H_j = \frac{V_j^2}{2 \cdot g}$$

Finalmente, a potência do jato é calculada por:

$$Pot_{j} = \gamma_{j} \cdot Q_{j} \cdot H_{j} = \gamma_{j} \cdot Q_{j} \cdot \frac{V_{j}^{2}}{2 \cdot q}$$

Temos que a vazão volumétrica é dada por: $Q = V \cdot A$. Portanto:

$$Pot_{j} = \gamma_{j} \cdot A_{j} \cdot \frac{V_{j}^{3}}{2 \cdot g}$$

A potência do jato é uma função da velocidade do jato, das características geométricas e do fluido utilizado.

Faça valer a pena

1. Por um duto de seção circular escoa água ($\gamma = 10.000N/m^3$). Em um ponto localizado a 10 m acima do nível do solo, a pressão dentro do duto é 250 kPa e a velocidade é 5m/s. Num ponto a jusante, no nível do solo, a velocidade é 20m/s.

Determine a pressão na seção a jusante desprezando os efeitos de atrito. Para os cálculos utilize $q = 10m/s^2$.

Com base no texto assinale a alternativa correta.

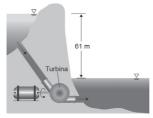
- a) 162,5 kPa.
- b) 78,2 kPa.
- c) 215,8 kPa.
- d) 316,3 kPa.
- e) 250,0 kPa.
- **2.** Um reservatório de grandes dimensões é drenado por uma tubulação com 10 cm de diâmetro, conforme mostra a figura a seguir. Considerando o escoamento idela, calcule a vazão aproximada no dreno quando h = 2m.



Fonte: elaborada pelo autor.

Com base no texto assinale a alternativa correta

- a) $0.02 \, m^3 / s$
- b) $0.03 \, m^3 / s$
- c) 0,04 m³ / s
- d) $0.05 \, m^3 / s$
- e) $0.06 \, m^3 / s$
- **3.** Na taxa máxima de geração de eletricidade, uma pequena central hidrelétrica apresenta uma vazão de 14,1 m³/s, para uma diferença de cota de 61 m. A eficiência da turbina é de 87%. Qual é a potência da turbina? Considerar regime permanente e $\gamma_{H2O} = 10^4~N/m^3$; $A_{tubos} = 10~cm^2~e$ e $g = 9,81~m/s^2$.



Fonte: adaptada de Çengel e Cimbala (2015, p. 195).

Com base no texto assinale a alternativa correta que representa a potência aproximada da turbina.

- a) 7,5 MW.
- b) 8,6 MW.
- c) 9,7 MW.
- d) 132 kW.
- e) 981 kW.

Seção 2.2

Escoamento permanente de um fluido incompressível em conduto fechado

Diálogo aberto

Caro aluno, o escoamento permanente de um fluido incompressível em um conduto fechado é um dos temas mais estudados na área de mecânica dos fluidos. Tem-se que esse tipo de escoamento é utilizado em toda e qualquer área e setor industrial na indústria moderna. Portanto, tem grande importância em várias situações da realidade prática. A classificação de condutos, o conceito do raio e do diâmetro hidráulico, o conceito da camada limite para uma placa plana e para um conduto fechado e o conceito da rugosidade são utilizados no cálculo da perda de carga, utilizado no projeto de uma instalação hidráulica.

Assim, o contexto de aprendizagem utilizado como situação da realidade profissional desta unidade envolve uma empresa fabricante de máquinas hidráulicas (bombas e turbinas) que contratou você, aluno, como projetista que atuará como líder responsável pelo projeto e desenvolvimento de sistemas hidráulicos.

Na situação-problema (SP) desta seção, você determinará o comprimento de entrada da camada limite em um conduto fechado, utilizado na instalação de recalque de água proposta.

Para isso, devemos conhecer e compreender a classificação de condutos, o conceito do raio e do diâmetro hidráulico, o conceito da camada limite para uma placa plana e para um conduto fechado e o conceito de rugosidade do conduto, a fim de aplicá-los na solução da situação-problema proposta.

Está preparado para esse novo desafio? Bons estudos!

Não pode faltar

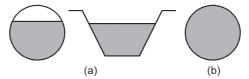
Visando calcular a perda de carga que ocorre em um sistema hidráulico, estudaremos nesta seção os conceitos envolvidos no escoamento permanente de um fluido incompressível em um conduto fechado. Tem-se que a perda de carga é uma dissipação de

energia, devida principalmente ao atrito que ocorre entre o fluido e a parede interna do conduto. Para calculá-la, devemos conhecer os parâmetros dimensionais e físicos do problema proposto.

Classificação de condutos

Os condutos, também chamados de tubos ou dutos, são estruturas utilizadas para realizar o transporte de fluidos. Basicamente, os condutos são classificados em relação ao tipo de escoamento que ocorre em seu interior. O escoamento pode ser forçado ou livre. O escoamento livre ocorre quando o fluido escoa em um canal aberto, ou quando apresenta uma superfície livre, para o caso de um escoamento em um canal fechado, chamado de conduto fechado, como mostra a Figura 2.8(a). O escoamento forçado ocorre quando o fluido escoa em um conduto fechado, sendo que ele não apresenta nenhuma superfície livre, ou seja, o fluido está em contato com toda a parede interna do conduto, preenchendo-o completamente, como mostra a Figura 2.8(b).

Figura 2.8 | Desenho esquemático de escoamento livre e forçado



Fonte: elaborada pelo autor.

Raio e diâmetro hidráulico

Com o intuito de empregarmos as relações empíricas que estudaremos na Seção 2.3 para condutos não circulares, surge a definição de diâmetro hidráulico, que será inserido no lugar do diâmetro da tubulação nas fórmulas que serão utilizadas futuramente.

O raio hidráulico r_h é definido como sendo uma relação entre a área \boldsymbol{A} da seção transversal do conduto e o perímetro molhado \boldsymbol{P} , que consiste no comprimento de parede em contato com o escoamento, como mostra a equação a seguir:

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

O diâmetro hidráulico D_h é definido como:

$$D_h = 4 \cdot r_h = \frac{4 \cdot A}{P}$$

Em que, para um conduto circular, a área da seção transversal do conduto é dada por:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

E o perímetro molhado \boldsymbol{P} é calculado pela equação:

$$P = \pi \cdot D$$

Portanto, o diâmetro hidráulico para um conduto circular será:

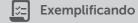
$$D_h = \frac{4 \cdot A}{P} = \frac{4 \cdot \pi \cdot D^2}{4 \cdot \pi \cdot D} = D$$

A Tabela 2.1 mostra a área, o perímetro molhado P, o raio hidráulico r_h e o diâmetro hidráulico D_h das geometrias de condutos mais utilizadas.

Tabela 2.1 | Área, perímetro molhado, raio hidráulico e diâmetro hidráulico de diversas geometrias

Geometria	А	Р	r _h	D_h
Circular (de diâmetro D)	$\frac{\pi \cdot D^2}{4}$	$\pi\cdot D$	<u>D</u>	D
Quadrada (de lado a)	a ²	4 · a	<u>a</u> 4	а
Retangular (de lados a e b)	a · b	2(a + b)	$\frac{a \cdot b}{2(a+b)}$	$\frac{2 \cdot a \cdot b}{(a+b)}$
Triangular (de lado a)	$\frac{a^2\sqrt{3}}{4}$	3 · a	$\frac{a\sqrt{3}}{12}$	$\frac{a\sqrt{3}}{3}$

Fonte: elaborada pelo autor.



Qual é a área, o perímetro molhado, o raio hidráulico e o diâmetro hidráulico de um conduto fechado retangular de área de seção transversal de lados $a = 30 \ cm$ e $b = 15 \ cm$?

A área é calculada por:

$$A = a \cdot b = 30 \cdot 15 = 450 \text{ cm}^2$$

O perímetro molhado é dado por:

$$P = 2(a + b) = 2(30 + 15) = 90$$
 cm

O raio hidráulico é calculado pela expressão:

$$r_h = \frac{a \cdot b}{2(a+b)} = \frac{30 \cdot 15}{2(30+15)} = 5 \text{ cm}$$

O diâmetro hidráulico é dado pela formulação:

$$D_h = \frac{2 \cdot a \cdot b}{(a+b)} = \frac{2 \cdot 30 \cdot 15}{(30+15)} = 20 \text{ cm}$$

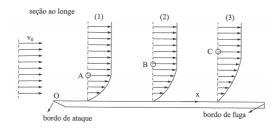
Camada limite: placa plana e conduto forçado

O conceito de camada limite é muito importante na mecânica dos fluidos, principalmente no estudo da aerodinâmica de corpos carenados (também chamados de aerodinâmicos) ou rombudos (geralmente esféricos), a fim de calcularmos as forças de arrasto e a sua sustentação.

Nesta seção, estaremos focados na camada limite em um conduto fechado. Para isso, introduziremos primeiramente o conceito de camada limite para uma placa plana.

A Figura 2.9 mostra um escoamento fluido em regime permanente, com velocidade V_0 , incidindo sobre o bordo de ataque de uma placa plana delgada, que é inserida paralelamente ao escoamento.

Figura 2.9 | Desenho esquemático de um escoamento sobre uma placa plana

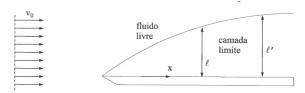


Fonte: Brunetti (2008, p. 165).

Devido ao princípio de aderência, também chamado de condição de não deslizamento, tem-se que a partícula de fluido em contato com a placa adquire velocidade nula. Seguindo o escoamento em relação ao eixo \mathbf{X} , percebe-se que o gradiente de velocidade $d\mathbf{V} \, l \, d\mathbf{y}$ diminui, devido ao crescimento da região em \mathbf{y} na qual a velocidade varia. Essa dedução fica evidente ao verificarmos a distância dos pontos A, B e C em relação à placa. Tem-se que, quanto mais longe do bordo de ataque, maior será a região na qual temos um gradiente de velocidade. Sabe-se que o gradiente de velocidade cria uma espécie de atrito entre as diversas camadas do fluido, originando as tensões de cisalhamento internas no fluido. Isso significa que nessa região em que temos um gradiente de velocidade, os efeitos viscosos são importantes. Essa região é chamada de camada limite, como ilustra a Figura 2.10.

Fora da camada limite, a velocidade do escoamento é igual a V_0 , ou seja, é como se o escoamento não sofresse a influência da presença da placa. Além disso, o efeito da viscosidade fora da camada limite é desprezível e o escoamento é chamado de invíscido ou não viscoso.

Figura 2.10 | Desenho esquemático da camada limite sobre uma placa plana



Fonte: Brunetti (2008, p. 165).

A espessura da camada limite é uma função do número de Reynolds do escoamento, ou seja $I = f(Re_x)$, sendo que o número de Reynolds para a placa plana é dado por:

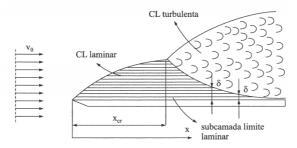
$$Re_{x} = \frac{\rho \cdot V_{0} \cdot x}{\mu} = \frac{V_{0} \cdot x}{v}$$

Verifica-se que para $\mathrm{Re}_x < 5 \cdot 10^5$, o regime do escoamento dentro da camada limite é laminar. Quando ultrapassamos esse valor, o escoamento passa a ser turbulento. Portanto, tem-se que, para o escoamento de um determinado fluido, com uma dada velocidade V_0 , o ponto em X em que ocorre a transição do regime laminar para o turbulento, dado por X_{cr} , é calculado por:

$$x_{cr} = 5 \cdot 10^5 \frac{\mu}{\rho \cdot V_0}$$

Nesse ponto, temos um crescimento repentino na espessura da camada limite, sendo que uma pequena região junto à placa, chamada de subcamada limite laminar, mantém baixa velocidade e regime de escoamento laminar, como mostra a Figura 2.11.

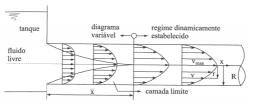
Figura 2.11 | Desenho esquemático do surgimento da camada limite turbulenta



Fonte: Brunetti (2008, p. 166).

Para um conduto fechado, como o ilustrado na Figura 2.12, tem-se que o fluido entra no conduto com um perfil de velocidade uniforme, analogamente ao experimento da placa plana. A partir da entrada do conduto fechado, devido ao princípio da aderência, temos o surgimento de uma camada limite, que cresce em relação a x.

Figura 2.12 | Desenho esquemático da camada limite em um conduto fechado



Fonte: Brunetti (2008, p. 167).

O comprimento de entrada \overline{X} é a distância a partir da entrada do conduto fechado até o ponto onde temos um escoamento plenamente desenvolvido, ou seja, quando as camadas limite se fundem, na linha de centro do conduto, tornando o escoamento inteiramente viscoso. Nesse ponto, o núcleo invíscido desaparece, momento em que o perfil de velocidade não varia mais em relação a x, ou seja, o escoamento se torna desenvolvido, ou seja, dinamicamente estabelecido.

Qual é a relevância do comprimento de entrada no estudo do escoamento em um conduto fechado? Podemos aplicar as equações e as teorias que serão desenvolvidas ao longo desta seção e da próxima, com base em um escoamento plenamente desenvolvido, desconsiderando-se o comprimento de entrada?

Tem-se que, para escoamento laminar, o comprimento de entrada $\overline{\textbf{\textit{X}}}$ é dado por:

$$\frac{\overline{x}}{D}$$
 0,06 · $\frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$

Para escoamento turbulento, as camadas limite crescem mais rapidamente. Portanto, o comprimento de entrada $\overline{\mathbf{x}}$ é calculado por:

$$\frac{\overline{x}}{D}$$
 4,4 $\cdot \left(\frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}\right)^{\frac{1}{6}}$

Rugosidade

A rugosidade **e** é uma medida da aspereza da parede interna do conduto. Independentemente do processo de fabricação do conduto, ele terá uma rugosidade em sua parede interna, que influenciará no valor da perda de carga do escoamento, dependendo do regime do escoamento em questão. Consideraremos nesta seção que a rugosidade é uniforme, ou seja, apresenta uma distribuição uniforme, tanto em relação à sua altura quanto em relação à sua distribuição. A Tabela 2.2 mostra a rugosidade para condutos utilizados em engenharia. A unidade de medida da rugosidade é o milímetro (mm).

Tabela 2.2 | Rugosidade para condutos utilizados em engenharia

Material do conduto	Rugosidade e (mm)	
Aço rebitado	0,9 a 9	
Concreto	0,3 a 3	
Ferro fundido	0,26	
Ferro galvanizado	0,15	
Ferro fundido asfaltado	0,12	
Aço comercial ou ferro forjado	0,046	
Aço Trefilado	0,0015	

Fonte: elaborada pelo autor.

Um conceito bastante utilizado para o cálculo da perda de carga em um escoamento em conduto fechado é a rugosidade relativa, que é dada em função do diâmetro hidráulico do conduto. Dependendo do autor, temos a rugosidade relativa como sendo a rugosidade dividida pelo diâmetro hidráulico, ou o inverso, o diâmetro hidráulico dividido pela rugosidade.

Assimile

Tem-se que a rugosidade dificulta o deslizamento das moléculas de fluido e, por consequência, o escoamento do fluido. Portanto, quanto mais rugosa for a parede da tubulação, maior será a perda de carga.

Fator de atrito

Para calculamos a perda de carga de um escoamento interno, temos primeiramente que entender que a perda de carga representa uma conversão de energia mecânica em energia térmica, ou seja, uma energia potencial, cinética ou de pressão que é perdida ao longo do escoamento, devido ao efeito do atrito.

Portanto, é importante conhecermos e compreendermos o fator de atrito de Darcy \boldsymbol{f} , a fim de calcularmos a perda de carga. Tem-se que o fator de atrito de Darcy \boldsymbol{f} é uma função do número de Reynolds e da rugosidade relativa da parede interna do conduto.

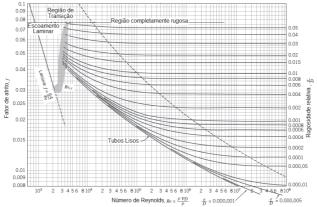
O diagrama de Moody, mostrado na Figura 2.13, é resultado de medidas experimentais, para uma grande faixa de número de Reynolds e uma grande faixa de rugosidade relativa, para condutos circulares.

Outra maneira de calcular o fator de atrito é por meio de correlações. Para escoamento laminar, o fator de atrito é função somente do número de Reynolds, como mostra a equação a seguir:

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

Figura 2.13 | Diagrama de Moody, utilizado para o cálculo do fator de atrito de

Darcy



Fonte: Fox, Pritchard e McDonald (2013, p. 314).

Para escoamento turbulento, temos diversas expressões matemáticas para o cálculo do fator de atrito, criadas a partir de ajustes de dados experimentais. A expressão mais usual é a de Colebrook, uma equação implícita em f, sendo, portanto, resolvida através de iterações.

 $\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{e/D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re}_{D} \cdot \sqrt{f}} \right)$

Para chutarmos um bom valor inicial para f, podemos usar o diagrama de Moody, no qual vemos que, para escoamento turbulento, f < 0,1. Uma alternativa é usarmos a equação de Haaland, que dispensa a necessidade de iterações:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \cdot \log \left[\left(\frac{e/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re_D} \right]$$

Para escoamento turbulento em conduto liso, podemos calcular o fator de atrito a partir da correlação de Blasius, válida para $Re \le 10^5$:

$$f = \frac{0.316}{\text{Re}_D^{0.25}}$$

Pesquise mais

Para aprofundar o seu conhecimento sobre o fator de atrito, as diversas formas e os conceitos envolvidos para calculá-lo, pesquise sobre o

assunto em Fox, Pritchard e McDonald (2013, p. 312-316).

Fonte: FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; McDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC. 2013.

Sem medo de errar

Retomando o contexto de aprendizagem, temos uma empresa fabricante de máquinas hidráulicas (bombas e turbinas) que contratou você, aluno, como projetista que atuará como líder responsável pelo projeto e desenvolvimento de sistemas hidráulicos.

A proposta dessa SP é que você determine o comprimento de entrada da camada limite em um conduto fechado, utilizado para suprir uma determinada vazão requerida na instalação de recalque de água proposta. O intuito dessa SP é mostrar que, dependendo da magnitude do comprimento de entrada, não é recomendado aplicarmos as equações e as teorias que serão desenvolvidas ao longo desta seção e da próxima, que são baseadas em um escoamento plenamente desenvolvido.

Consideraremos um conduto fechado com 13 mm de diâmetro e 20 m de comprimento, que fornece água a uma vazão de 0,3155 // s. Dados da água: $v=10^{-6}\ m^2$ / s.

Primeiramente, calculamos o número de Reynolds, a fim de decidir qual formulação utilizaremos no cálculo do comprimento de entrada $\overline{\mathbf{X}}$. Então:

$$Re_D = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \frac{V \cdot D}{v}$$

Sendo que a vazão volumétrica é dada por:

$$Q = V \cdot A$$

Portanto:

$$Re_D = \frac{(Q/A) \cdot D}{v} = \frac{0.3155 \cdot 10^{-3} \ m^3 / s}{0.0001327 \ m^2} \cdot \frac{0.013 \ m}{10^{-6} \ m^2 / s} = 30.900,54$$

Analisando o número de Reynolds, tem-se que o escoamento é turbulento. Portanto, o comprimento de entrada $\overline{\textbf{\textit{X}}}$ é dado por:

$$\frac{\bar{x}}{D}$$
 4,4 $\cdot \left(\frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}\right)^{\frac{1}{6}}$

Finalmente:

$$\overline{x}$$
 4,4 · D · $\left(\frac{V \cdot D}{v}\right)^{\frac{1}{6}}$ = 4,4 · 0,013 $m \cdot \left(\frac{2,38 \text{ m/s} \cdot 0,013 \text{ m}}{10^{-6} \text{ m}^2 \text{ / s}}\right)^{\frac{1}{6}}$ = 0,3204 m

O comprimento de entrada é aproximadamente 25 vezes maior que o diâmetro da tubulação.

Avançando na prática

Cálculo do fator de atrito

Descrição da situação-problema

Calcular o fator de atrito de um escoamento de água que ocorre em um conduto fechado com um determinado diâmetro $m{D}$. O escoamento tem velocidade $m{V}$ e o conduto é de ferro fundido asfaltado.

Resolução da situação-problema

Para calcularmos o fator de atrito, precisamos calcular o número de Reynolds e a rugosidade relativa do conduto, pois o fator de atrito de Darcy é uma função dessas variáveis.

O número de Reynolds do escoamento é dado por:

$$Re_D = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$$

A rugosidade relativa pode ser expressa por e/D, sendo que a rugosidade é encontrada na Tabela 2.2.

Utilizando os valores calculados de Re_D e da rugosidade relativa no diagrama de Moody, encontramos o valor do fator de atrito.

Como exercício, sugerimos que você, aluno, calcule o fator de atrito a partir das correlações apresentadas nesta seção.

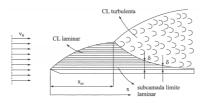
Faça valer a pena

1. Água escoa com velocidade de 4 m/s através de um conduto fechado retangular de área de seção transversal de lados a = 10 cm e b = 300 mm. Calcule número de Reynolds para esse escoamento. Dados da água: $v = 10^{-6} \ m^2 \ / \ s$.

Com base no texto assinale a alternativa correta.

- a) $Re = 4,0.10^5$.
- b) $Re = 12 \cdot 10^5$.
- c) $Re = 6.0 \cdot 10^5$.
- d) $Re = 1.2 \cdot 10^5$.
- e) $Re = 0.3 \cdot 10^5$.
- **2.** Em mecânica dos fluidos, a camada limite é a camada de fluido nas imediações de uma superfície delimitadora, fazendo-se sentir os efeitos difusivos e a dissipação da energia mecânica.

Considere o escoamento de ar sobre uma placa plana. Sabendo que o ar possui uma temperatura de 20 °C e velocidade de 10 m/s, calcule o a distância $x_{cr'}$ em que ocorre a transição do regime laminar para o turbulento, conforme mostra a figura. (Dados do ar: $\rho = 1,21 \, kg \, / \, m^3$ e $\mu = 1,81 \times 10^{-5} \, N \cdot s \, / \, m^2$)



Fonte: Brunetti (2008, p. 166).

Com base no texto assinale a alternativa correta.

- a) $X_{cr} = 0.50 \ m.$
- b) $X_{cr} = 0.75 m$.
- c) $X_{cr} = 0.15 m.$
- d) $X_{cr} = 0.03 m$.
- e) $X_{cr} = 1.26 \ m.$
- **3.** A perda de carga representa uma conversão de energia mecânica em energia térmica, ou seja, uma energia potencial, cinética ou de pressão que é perdida ao longo do escoamento, devido ao efeito do atrito.

Considere que água escoa com velocidade de 1 m/s através de um conduto circular de diâmetro 0,1 m. Qual o fator de atrito aproximado desse escoamento? O contudo pode ser considerado como liso.

Dados da água: $v = 10^{-6} m^2 / s$.

Com base no texto assinale a alternativa correta.

- a) 0,012.
- b) 0,018.
- c) 0,021.
- d) 0,03.
- e) 0,01.

Seção 2.3

Perda de carga em um escoamento interno

Diálogo aberto

Caro aluno, o cálculo da perda de carga de um escoamento é de suma importância no projeto de uma instalação hidráulica. Temse que o dimensionamento dos componentes do sistema hidráulico somente é possível a partir do cálculo da perda de carga. Imagine o dimensionamento de uma bomba hidráulica sem o conhecimento de todas as perdas de carga envolvidas no escoamento através da instalação hidráulica proposta. Será que esta bomba hidráulica suprirá as necessidades de projeto? O sistema trabalhará de maneira adequada? Obviamente que não! Portanto, o tema desta seção tem grande importância em várias situações da realidade prática.

Assim, o contexto de aprendizagem utilizado como situação da realidade profissional desta unidade envolve uma empresa fabricante de máquinas hidráulicas (bombas e turbinas) que contratou você, aluno, como projetista que atuará como líder responsável pelo projeto e desenvolvimento de sistemas hidráulicos.

Na situação-problema (SP) desta seção, você determinará a perda de carga localizada e distribuída da instalação de recalque de água proposta. Para isso, devemos conhecer e compreender esses dois tipos de perda de carga, e devemos saber como calculá-los, a partir das teorias que serão vistas nesta seção, aplicando-as na solução da situação-problema proposta.

Ao final desta seção, esperamos que você tenha conhecimentos técnicos e científicos suficientes para aplicar os conceitos estudados nesta seção na resolução da SP proposta.

Está preparado para esse novo desafio? Bons estudos!

Não pode faltar

Classificação das perdas de carga

A perda de carga que ocorre em um escoamento interno é definida como sendo a energia perdida pelo fluido ao vencer as resistências impostas pelo próprio escoamento em si, devida às atrações moleculares do próprio fluido e também às resistências impostas pelos dispositivos na qual o escoamento atravessa (tubulações, válvulas, curvas etc.).

Portanto, a perda de carga representa uma conversão de energia mecânica em energia térmica, ou seja, uma energia potencial, cinética ou de pressão que é perdida ao longo do escoamento, devido ao efeito do atrito. Tem-se que a perda de carga h_p é dividida em dois tipos: a perda de carga distribuída h_d e a perda de carga localizada h_l .

Retirando a hipótese de que o fluido é ideal na equação da conservação da energia, a fim de trabalharmos com fluidos reais, ou seja, considerando que o escoamento ocorra com perdas por atrito com a parede da tubulação, podemos reescrever a equação de Bernoulli da seguinte forma, utilizando H como sendo a energia total do escoamento por unidade de peso entre duas seções 1 e 2 quaisquer no escoamento:

 $H_1 = H_2 + h_{p1,2}$

Conclui-se que, devido ao atrito, ou fluido se aquece ou existe troca de calor entre o fluido e o meio. Esse aumento da energia térmica só pode acarretar em uma diminuição de pressão, pois o escoamento é incompressível, ou seja, $Q_1 = Q_2$. Portanto, temos que a energia total do escoamento diminui, ou seja, existe uma perda de carga devido ao atrito. A queda de pressão de um escoamento laminar em um trecho de comprimento L de um conduto de seção e vazão constantes é calculada analiticamente por:

$$\Delta p = \frac{128 \cdot \mu \cdot L \cdot Q}{\pi \cdot D_h^4}$$



Finalizando, tem-se que a perda de carga total do escoamento é dada pelo somatório de todas as perdas de carga distribuídas e localizadas que ocorrem no sistema hidráulico em estudo:

$$h_{p1,2} = \sum h_d + \sum h_l$$

Perda de carga distribuída

É o tipo de perda de carga que ocorre no escoamento ao longo de tubos retos, de seção constante, devido ao atrito do fluido com a parede interna do conduto, entre as próprias partículas de fluido e as perturbações no escoamento. A perda de carga distribuída é dada por:

$$h_d = f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

Em que temos fatores geométricos e fatores do escoamento.

Para escoamento laminar, tem-se que o fator de atrito de Darcy é dado por:

 $f_{\text{laminar}} = \frac{64}{\text{Re}_D}$

A partir do diagrama de Moody, tem-se que f é uma função somente do número de Reynolds, sendo independente da rugosidade do conduto. Portanto, tem-se que a relação entre f e Re_{D} é linear e inversamente proporcional, como mostrado na formulação. Mostraremos detalhadamente a seguir como é realizado o cálculo do fator de atrito de Darcy a partir do diagrama de Moody.

Existem vários exemplos de aplicação do conceito da perda de carga distribuída. Podemos utilizar essa formulação em problemas em que se procura o próprio valor da perda de carga, em problemas em que se procura a vazão ou em problemas em que se procura o dimensionamento do diâmetro do conduto.

Pesquise mais

Pesquise mais sobre a formulação e as considerações para resolução dos problemas típicos citados em Brunetti (2008, p. 176-181), que apresenta um diagrama modificado, chamado de diagrama de Moody-Rouse, que oportuniza o cálculo da vazão do escoamento. O cálculo do diâmetro do conduto é realizado por tentativas, como mostra o exemplo da página 180.

Fonte: BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos fluidos**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

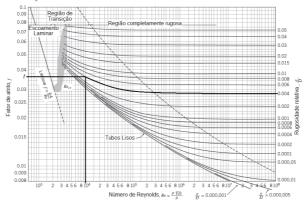
Diagrama de Moody

Nesta seção, mostraremos mais detalhadamente como o diagrama de Moody é utilizado no cálculo do fator de atrito de Darcy. Para isso, utilizaremos alguns valores numéricos para exemplificar a utilização do diagrama.



Vamos supor que o valor do número de Reynolds seja 10^4 e que a rugosidade relativa e/D seja igual a 0,004. A partir da Figura 2.14, temos que, utilizando a curva de rugosidade relativa de 0,004, seguimos essa curva de rugosidade relativa constante até o encontro dela com o valor de Re_D do exemplo proposto. Neste ponto de interseção da curva de rugosidade relativa com Re_D = 10^4 , conseguimos encontrar o valor do fator de atrito de Darcy, fazendo a projeção desse ponto de interseção com o eixo do fator de atrito. Encontramos, portanto, o valor de f igual a 0,036.

Figura 2.14 | Exemplo de utilização do diagrama de Moody para o cálculo do fator de atrito de Darcy



Fonte: adaptada de Fox, Pritchard e McDonald (2013, p. 314).

Perda de carga localizada

A perda de carga localizada ocorre em locais ou singularidades em que o escoamento sofre perturbações bruscas. Essa perda de carga é devido aos efeitos de atrito e do gradiente adverso de pressão que ocorre quando o fluido atravessa as singularidades inseridas no sistema. São consideradas singulares: entradas e saídas de tubulações; expansões e contrações graduais e bruscas; curvas; cotovelos; tês; válvulas abertas ou parcialmente abertas etc.



Para sistemas que possuem longos trechos de condutos retos de seção constante, as perdas de carga localizadas são relevantes? Elas são

maiores, são da mesma ordem de grandeza, ou são menores que a perda de carga distribuída?

Uma forma de calcular a perda de carga localizada é por meio da seguinte formulação, em que \pmb{K} é o coeficiente de forma:

$$h_{l} = K \cdot \frac{V^{2}}{2 \cdot g}$$

Tem-se que o coeficiente de forma é encontrado a partir de tabelas, gráficos etc. geralmente construídos a partir de dados experimentais levantados para cada tipo de singularidade.

Outra forma de se calcular a perda de carga localizada é por meio da teoria do comprimento equivalente. O conceito do comprimento equivalente nos fornece a perda de carga localizada, na qual ocorre uma singularidade dada a partir de um comprimento equivalente de um trecho de conduto reto de seção constante com o mesmo valor da perda de carga que ocorre na singularidade. Valores de comprimento equivalente L_{eq} são encontrados em catálogos de fabricantes. Portanto, temos que:

$$h_{l} = f \cdot \frac{L_{eq}}{D_{h}} \cdot \frac{V^{2}}{2 \cdot g}$$

Pesquise mais

Pesquise na internet sobre o comprimento equivalente de cada uma das singularidades citadas nesta seção. Fox, Pritchard e McDonald (2013) apresentam na página 321 uma tabela de comprimentos equivalentes para vários tipos de válvulas e acessórios (cotovelos, curvas e tês).

Fonte: FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; McDONALD, A. T. Introdução à mecânica dos fluidos. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

Voltando ao coeficiente de forma, mostraremos como encontrar seu valor para cada tipo de singularidade que pode ser inserida em um sistema hidráulico. Para a entrada de tubulações, temos que o valor de \boldsymbol{K} é encontrado, por exemplo, pela Tabela 2.3, que apresenta os seguintes tipos de entrada: reentrante, borda viva e arredondada.

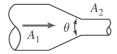
Tabela 2.3 | Coeficiente de forma para vários tipos de entradas de tubulação

Tipo de en-trada	Desenho esquemático	Coeficiente de Forma K		
Reentrante	→ 	0,78		
Borda Viva	→ 	0,5		
Arredondada	→ <u> </u>	$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		

Fonte: adaptada de Fox, Pritchard e McDonald (2013, p. 317).

A Figura 2.15 ilustra uma contração gradual, que é uma singularidade bastante utilizada em sistemas hidráulicos.

Figura 2.15 | Desenho esquemático de uma contração gradual



Fonte: Adaptada de Fox, Pritchard e McDonald (2013, p. 318).

O valor do coeficiente de forma para contrações graduais é encontrado a partir da Tabela 2.4, que apresenta os valores de \boldsymbol{K} em função do ângulo da contração gradual e da relação de áreas dos condutos

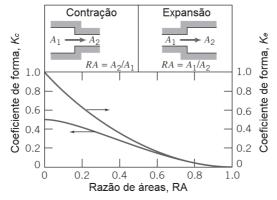
Tabela 2.4 | Coeficiente de forma para contrações graduais

A ₂ / A ₁	Ângulo θ, dado em graus							
A ₂ / A ₁	10	15 a 40	50 a 60	90	120	150	180	
0,50	0,05	0,05	0,06	0,12	0,18	0,24	0,26	
0,25	0,05	0,04	0,07	0,17	0,27	0,35	0,41	
0,10	0,05	0,05	0,08	0,19	0,29	0,37	0,43	

Fonte: Adaptada de Fox, Pritchard e McDonald (2013, p. 318).

A Figura 2.16 apresenta o cálculo do valor do coeficiente de forma para contrações bruscas $K_{\rm c}$ e para expansões bruscas $K_{\rm e}$.

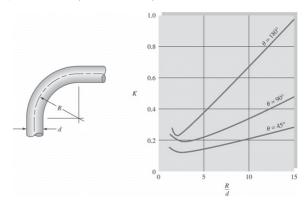
Figura 2.16 | Cálculo de K para contrações e expansões bruscas



Fonte: adaptada de Fox, Pritchard e McDonald (2013, p. 318).

Uma curva de parede lisa de 90 graus é mostrada na Figura 2.17. A curva ilustrada tem raio de curvatura R e diâmetro d constante. Temos também curvas com 45 graus e 180 graus. A Figura 2.17 também apresenta um gráfico para o cálculo do valor do coeficiente de forma para curvas de parede lisa com 45 graus, 90 graus e 180 graus em função de $\it R/d$.

Figura 2.17 | Cálculo de K para curvas de parede lisa



Fonte: adaptada de Fox, Pritchard e McDonald (2013, p. 318).

O valor do coeficiente de forma para diversos tipos de cotovelos e tês é encontrado a partir da Tabela 2.5, que apresenta os valores de \boldsymbol{K} para diversos valores de diâmetro nominal, com dois tipos de conexão (rosqueada e flangeada).

Tabela 2.5 | Coeficiente de forma para cotovelos e tês

Diâmetro nominal, pol.									
	Rosqueada				Flangeada				
	1/2	1	2	4	1	2	4	8	20
Cotovelos									
45° normal	0,39	0,32	0,30	0,29					
45° raio longo	0,21	0,20	0,19	0,16	0,14				
90° normal	2,0	1,5	0,95	0,64	0,50	0,39	0,30	0,26	0,21
90° raio longo	1,0	0,72	0,41	0,23	0,40	0,30	0,19	0,15	0,10
180° normal	2,0	1,5	0,95	0,64	0,41	0,35	0,30	0,25	0,20
Tês									
Escoamento direto	0,90	0,90	0,90	0,90	0,24	0,19	0,14	0,10	0,07
Escoamento no ramal	2,4	1,8	1,4	1,1	1,0	0,80	1,64	0,58	0,41

Fonte: adaptada de White (2011, p. 368).

A Tabela 2.6 apresenta o cálculo do valor do coeficiente de forma para vários tipos de válvulas (globo, gaveta, retenção basculante, em ângulo) totalmente abertas, para diversos valores de diâmetro nominal, com dois tipos de conexão (rosqueada e flangeada).

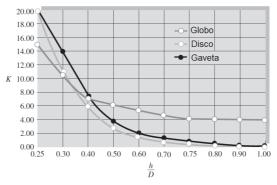
Tabela 2.6 | Coeficiente de forma para vários tipos de válvulas totalmente abertas

Diâmetro nominal, pol.									
	Rosqueada				Flangeada				
	1/2	1	2	4	1	2	4	8	20
Globo	14	8,2	6,5	5,7	13	8,5	6,0	5,8	5,5
Gaveta	0,3	0,24	0,16	0,11	0,8	0,35	0,16	0,07	0,03
Retenção basculante	5,1	2,9	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Em ângulo	9,0	4,7	2,0	1,0	4,5	2,4	2,0	2,0	2,0

Fonte: adaptada de White (2011, p. 368).

O coeficiente de forma para válvulas parcialmente abertas é calculado a partir de gráficos como o ilustrado na Figura 2.18, em que h/D é a fração de abertura da válvula. O gráfico apresentado na figura é utilizado para o cálculo do coeficiente de forma para válvulas parcialmente abertas dos tipos: globo, disco e gaveta.

Figura 2.18 | Cálculo de K para válvulas parcialmente abertas



Fonte: adaptada de White (2011, p. 370).

Sem medo de errar

Retomando o contexto de aprendizagem, temos uma empresa fabricante de máquinas hidráulicas (bombas e turbinas) que contratou você, aluno, como projetista que atuará como líder responsável pelo projeto e desenvolvimento de sistemas hidráulicos.

A proposta dessa SP é que você determine a perda de carga localizada e distribuída da instalação de recalque de água proposta. O intuito dessa SP é mostrar que o dimensionamento dos componentes do sistema hidráulico depende desse cálculo.

Primeiramente, calculamos a velocidade média do escoamento, a partir da vazão requerida pelo sistema em estudo e da área de seção transversal do conduto.

$$Q = V \cdot A$$

A partir da velocidade média do escoamento e das características do conduto e do fluido, calculamos o número de Reynolds do escoamento.

$$\mathsf{Re}_D = \frac{\rho \cdot V \cdot D_h}{\mu} = \frac{V \cdot D_h}{v}$$

Sabendo-se qual é a rugosidade do conduto utilizado na instalação, calculamos a rugosidade relativa e / D_h .

Com os valores de ${\bf Re}_{\it D}$ e da rugosidade relativa em mãos, calculamos o fator de atrito de Darcy utilizando os dados de entrada no Diagrama de Moody.

Finalmente, após calcularmos o fator de atrito de Darcy, calculamos a perda de carga distribuída:

$$h_d = f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

A perda de carga localizada pode ser calculada tanto pela formulação a seguir quanto pela teoria do comprimento equivalente.

$$h_I = K \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

Independentemente da forma de calcular, precisamos saber quais e quantas singularidade foram inseridas no sistema hidráulico proposto.

A perda de carga total do escoamento é dada por:

$$h_p = \sum h_d + \sum h_l$$

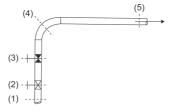
Avançando na prática

Utilização da teoria do comprimento equivalente no cálculo da perda de carga localizada

Descrição da situação-problema

Calcular a perda de carga localizada do sistema mostrado na Figura 2.19, utilizando a teoria do comprimento equivalente. Considerar o conduto com diâmetro de 5 cm e comprimento entre as seções 1 e 5 igual a 50 m; o fator de atrito é igual a 0,025; a velocidade média do escoamento igual a 2 m/s e a aceleração da gravidade igual a 9,81 m/s². Vamos supor que o comprimento equivalente da válvula de gaveta, inserida no ponto 2, seja igual a 0,335 m; o comprimento equivalente da válvula globo, inserida no ponto 3, seja igual a 17,61 m; e o comprimento equivalente do cotovelo, inserido no ponto 4, seja igual a 3 m.

Figura 2.19 | Desenho esquemático do exercício proposto



Fonte: Brunetti (2008, p. 186).

Resolução da situação-problema

Tem-se que perda de carga total do escoamento através do sistema hidráulico proposto é dada por:

$$h_{p1,5} = \sum h_d + \sum h_l$$

Utilizando a teoria do comprimento equivalente, temos que:

$$h_{p1,5} = f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} + \sum f \cdot \frac{L_{eq}}{D_h} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

Portanto:

$$h_{p1,5} = f \cdot \frac{(L + L_{eq})}{D_h} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

Em que o comprimento equivalente total de todas as singularidades é dado por:

$$L_{eq} = 0.335 \text{ m} + 17.61 \text{ m} + 3 \text{ m} = 20.945 \text{ m}$$

Finalmente, a perda de carga total do escoamento será:

$$h_{p1,5} = 0.025 \cdot \frac{(50 \text{ m} + 20.945 \text{ m})}{0.05 \text{ m}} \cdot \frac{(2 \text{ m/s})^2}{2.9.81 \text{ m/s}^2} = 7.23 \text{ m}$$

Faça valer a pena

1. A perda de carga localizada ocorre em locais ou singularidades em que o escoamento sofre perturbações bruscas. Essa perda de carga é devido aos efeitos de atrito e do gradiente adverso de pressão que ocorre quando o fluido atravessa as singularidades inseridas no sistema.

Qual a perda de carga localizada em uma entrada de borda viva (K = 0.5) cuja velocidade do escoamento é de 4m / s^2 ?

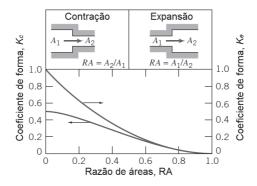
Com base no texto, assinale a alternativa correta:

a) 0,1 m. d) 0,4 m. b) 0,2 m. e) 0,5 m.

c) 0,3 m.

2. Tem-se que o coeficiente de forma é encontrado a partir de quadros, gráficos etc. geralmente construídos a partir de dados experimentais levantados para cada tipo de singularidade.

Qual a perda de carga localizada em uma contração brusca de razão 0,25, cuja velocidade do escoamento é de 5 m / $\rm s^2$?



Fonte: adaptada de Fox, Pritchard e McDonald (2013, p. 318).

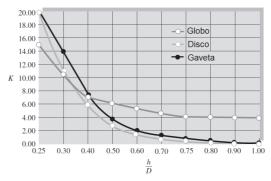
Com base no texto, assinale a alternativa correta:

a) 0,1 m. d) 0,4 m. b) 0,2 m. e) 0,5 m.

c) 0.3 m.

3. O coeficiente de forma para válvulas parcialmente abertas é calculado a partir de gráficos como o ilustrado na figura a seguir, em que h / D é a fração de abertura da válvula. O gráfico apresentado na figura é utilizado para o cálculo do coeficiente de forma para válvulas parcialmente abertas dos tipos: globo, disco e gaveta.

Qual a perda de carga localizada em uma válvula de gaveta, 30% aberta, cuja velocidade do escoamento é de 5 m / $\rm s^2$?



Fonte: adaptada de White (2011, p. 370).

Com base no texto, assinale a alternativa correta:

- a) 1,78 m.
- b) 0,90 m.
- c) 5,10 m.
- d) 1,20 m.
- e) 22,3 m.

Referências

BRUNETTI, F. Mecânica dos fluidos. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J., McDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howad N.; BOETTNER, Daisie D.; BAILEY, Margaret B. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

WHITE, F. M. Mecânica dos fluidos. 6. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2011.

Sistemas de captação e bombeamento

Convite ao estudo

Caro aluno, nesta unidade de ensino, estudaremos os conceitos da hidráulica, que estão envolvidos no dimensionamento de um canal, ou seja, um conduto aberto. A partir da definição do conceito de borda livre de canais e conceitos de geometria do canal, tem-se que o movimento da água obedece algumas leis da mecânica dos fluídos, respeitando cada tipo de seção transversal, bem como sofrendo alterações conforme a rugosidade da borda do canal. Veremos também a importância da inclinação do canal, ou seja, sua declividade, e, a partir disso, analisaremos conceitos de vazão. A indicação da utilização do canal hidráulico e suas vantagens e desvantagens fecham o estudo desta unidade.

A competência de fundamento desta disciplina é conhecer e ser capaz de aplicar os conceitos e os fundamentos da hidráulica, a fim de planejar, projetar, executar e realizar a gestão de sistemas hidráulicos, a fim de compreender sistemas de captação e bombeamento de maneira global.

O resultado de aprendizagem desta unidade é compreender o dimensionamento de uma instalação hidráulica de bombeamento e dimensionamento de canais abertos.

O contexto de aprendizagem utilizado como situação da realidade profissional (SR) proposta é focado nas necessidades de um departamento de drenagem urbana, que contratou-o como projetista, para idealizar e dimensionar um canal hidráulico de borda livre a fim de suprir a instalação de bombeamento de um sistema de abastecimento de uma cidade ou região. Para atingir os objetivos desta unidade, você deve estar apto a:

- Determinar a melhor seção transversal para cada tipo de utilização do canal, analisando questões quanto à inclinação e rugosidade das bordas, velocidade e vazão necessária.
- Calcular a profundidade crítica, velocidade crítica e declividade crítica de um canal, a fim de se prever regimes torrenciais no escoamento do canal.
- Projetar canais de acordo com o tipo de uso que se fará deste e prever desvantagens para cada tipo de uso, tipo de seção e tipo de revestimento de borda, bem como para cada tipo de regime de escoamento (fluvial ou torrencial) a que o canal será submetido

Para isso, serão tratados nas seções desta unidade: os conceitos fundamentais de canais, o conceito de borda livre, os conceitos de canais quanto à sua geometria, declividade e velocidade, as indicações de canais e as vantagens e as desvantagens de canais.

Está preparado para esses grandes desafios? Vamos lá!

Seção 3.1

Introdução à instalação de bombeamento

Diálogo aberto

O homem tem necessidade de água com qualidade adequada e em quantidade suficiente para todas as suas necessidades, não só para proteção de sua saúde, como também para o seu desenvolvimento econômico. Assim, a importância do abastecimento de água deve ser encarada sob os aspectos sanitário e econômico.

Um sistema de abastecimento de água deve conduzir água de boa qualidade ao usuário. Para tanto, deve-se ter em mente que, para um bom funcionamento, o sistema deverá ser constituído por captação (feita em rios, riachos, lagos, reservatórios de barragens), adução (composta por poço de sucção, casa de bombas e canalização de adução), tratamento nas ETA, reservação de água em reservatórios e, por fim, distribuição da água para o usuário final. O desafio do sistema de captação está em encontrar água de boa qualidade, a uma distância pequena e fluindo a uma vazão necessária para esse fim.

São chamados canais hidráulicos aqueles condutos que sofrem atuação somente da pressão atmosférica e é o tipo de condução mais utilizado no sistema de captação de água.

Para o aproveitamento de riachos de pequena largura que correm sobre leitos de terra e que apresentam, durante épocas de estio, lâmina d'água de altura reduzida, utiliza-se o canal de derivação. A finalidade desse canal é uniformizar o leito em uma determinada extensão do curso d'água, por meio de um revestimento de alvenaria de pedra ou concreto, utilizando, dessa forma, um recurso para elevar o nível d'água.

Na situação-problema desta seção, você será o responsável técnico do Departamento de Águas de uma pequena cidade e verificará a proposta de uma empresa para a execução de um sistema de captação projetado para utilizar o riacho mais próximo da cidade como canal de derivação do sistema de captação. Para tanto, considere as informações a seguir: sabe-se que a menor vazão média anual do córrego é de 1,5 m³/s. O abastecimento está previsto para atender, no horizonte do projeto, 24 mil habitantes, com demanda

diária de 0,216 m³/dia por habitante. A declividade do riacho é de 0,0005 m/m e sua seção aproxima-se à seção trapezoidal com fundo de terra e taludes empedrados. Você, como responsável técnico, é solicitado para verificar a proposta de projeto de canal de captação com 2 metros de largura de base e seção quadrada revestida em concreto. Na proposta, é prevista também uma obra de aumento da declividade do canal para 0,004 m/m. Portanto, você deverá definir as características do canal embasado nos conceitos abordados nesta seção e, apoiado em seu bom senso, averiguar o projeto-proposta da empresa envolvida no projeto e execução do sistema de abastecimento.

Devemos conhecer e compreender os conceitos de canais, o conceito de borda livre, as indicações de canais e as vantagens e desvantagens da construção de canais, a fim de aplicá-los na solução da situação-problema proposta.

Preparado para começar? Vamos lá!

Não pode faltar

Um conduto fechado tem como principal característica a seção plena, ou seja, o conduto não apresenta nenhuma superfície ou borda livre. Já um conduto aberto apresenta como principal característica a pressão atmosférica atuando sobre a superfície do escoamento em uma seção aberta (livre). A esses tipos de condutos damos o nome de canais.

Assim como o conduto fechado, cada tipo de seção tem características geométricas importantes que se diferenciam entre si. A Tabela 3.1 apresenta características dos canais com bordas livres mais utilizados.

Tabela $3.1\,|$ Tipos de seções de canais de borda livre usuais e suas características geométricas

Seção	Borda livre	Área molhada	Perímetro molhado	Raio hidráulico	
	b	b·h	b + 2h	$\frac{b \cdot h}{b + 2 \cdot h}$	
h h	В	$h \cdot (b + m \cdot h)$	$b + 2 \cdot h \cdot \sqrt{1 + m^2}$	$\frac{h\cdot(b+m\cdot h)}{b+2\cdot h\cdot \sqrt{1+m^2}}$	
D h	$B = D \cdot \frac{\text{sen}\theta}{\theta}$	$D^2 \cdot \frac{(\theta - \operatorname{sen}\theta)}{8}$	$\frac{\theta \cdot D}{2}$	$D \cdot \frac{(1 - \frac{\operatorname{sen}\theta}{\theta})}{4}$	
B = D ↑ h h = D/2	D = 2h	$\frac{\pi \cdot D^2}{8}$	$\frac{\pi \cdot D}{2}$	$\frac{D}{4} = \frac{h}{2}$	
Observações para seção circular	h = D · —	$-\frac{\cos\theta}{2}$)	$ heta=2 ext{arcc}$	D	

Fonte: adaptada de Porto (2006) e Azevedo Netto e Alvarez (1982).

A borda livre (*free board*) corresponde a uma folga que deve ser deixada além da cota do nível máximo operacional no conduto, para evitar, dentro de certo risco, extravasamentos devido à ação de ondas de vento ou de embarcações, ressalto hidráulico, perdas localizadas e flutuações de vazões. A folga mínima é cm e, normalmente, adota-se uma folga de 20% a 30% da profundidade do canal.

Conhecidas as características geométricas dos canais abertos, aprender o conceito de velocidade da água no interior deles se torna necessário para o estudo do canal.

A Lei de Chézy é indicada para os escoamentos turbulentos rugosos em canais, em que C é o coeficiente de resistência ou coeficiente de rugosidade de Chézy: $V = C\sqrt{R_h \cdot I_o}$

V " U

Utilizando a equação da vazão volumétrica, a lei de Chézi torna-se: $Q = C \cdot A \sqrt{R_h \cdot I_0}$

O coeficiente de Chézy é proporcional à rugosidade relativa da seção, em que ${\it n}$ é o coeficiente de rugosidade de Manning.

$$C = \frac{R_h^{1/6}}{n}$$

O coeficiente de rugosidade de Manning é determinado experimentalmente e alguns de seus valores podem ser encontrados já em tabelas, como a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 | Coeficientes de rugosidade da formula de Manning

Natureza das paredes do canal	n
Condutos de barro, de drenagem	0,013
Tubos de ferro galvanizado	0,013
Canais com revestimento de concreto	0,014
Calhas metálicas lisas (semicirculares)	0,012
Canais de terra, retilíneos e uniformes	0,020
Canais com fundo de terra e taludes empedrados	0,030

Fonte: adaptada de Porto (2006).

Existem também métodos para estimação do coeficiente, nos quais se destacam a determinação direta, estimativa a partir da granulometria e estimativa através de incrementação.

Pesquise mais

Coeficientes de Manning e de Chézy para diferentes casos podem ser encontrados na literatura, destacando-se:

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC USP, 2006, p. 272-274.

Se substituirmos $C = \frac{R_h^{1/6}}{n}$ em $Q = C \cdot A \sqrt{R_h \cdot I_0}$, teremos:

$$Q = \frac{R_h^{1/6}}{n} \cdot A \sqrt{R_h \cdot I_0}$$

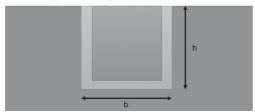
Sintetizando, chega-se a:

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

Conhecida como a fórmula de Manning.

Para ajudar a esclarecer este conteúdo, calcularemos a vazão de um canal utilizando as equações de Chézy: retangular de concreto medindo 2,0 m de largura, com altura da lâmina d'água de 1,0 m (Figura 3.1) e declividade de fundo 0,0005 m/m.

Figura 3.1 | Canal retangular de largura b e altura h



Fonte: elaborada pela autora

Para calcularmos a vazão do canal, precisamos conhecer as características da seção. Calculamos, então, primeiramente, a área molhada da seção por meio da fórmula da área retangular:

$$A = b \cdot h$$

Tratando-se de uma seção retangular de base igual a 2 metros e altura igual a 1 metro, teremos:

$$A = 2 \cdot 1 = 2 m^2$$

É necessário o cálculo do perímetro molhado (${\it P}$), somando-se a altura duas vezes mais a base da seção:

$$P = h + b + h$$

Sabendo-se que a altura da seção é 1 metro e a base 2 metros, teremos:

$$P = 1 + 2 + 1 = 4 m$$

Calculamos, também, o raio hidráulico, que é a razão entre a área (\pmb{A}) e perímetro (\pmb{P}) da seção:

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{2}{4} = 0.5 \ m$$

Determinadas as características da seção (A, P e R_h), podemos determinar o coeficiente de Chézy (C) por meio da equação:

$$C = \frac{R_h^{1/6}}{n}$$

Onde

$$C = \frac{0.5^{1/6}}{0.014} = 63,63$$

Observe que o coeficiente de Chézy é adimensional. Conhecido o coeficiente de Chézy, é possível então determinar a vazão do canal:

$$Q = C \cdot A \sqrt{R_h \cdot I_0} = 63,63 \cdot 2\sqrt{0,5 \cdot 0,0005} = 2,01 \frac{m^3}{s}$$

Utilizando a fórmula da vazão volumétrica:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{2,01}{2} = 1,01 \frac{m}{s}$$

Calculadas a vazão e a velocidade do canal, é possível sabermos várias características desse canal, como seu tipo de escoamento, sua empregabilidade, a adequação de seu revestimento, entre outros.

A rugosidade de um canal altera a velocidade dele que, por sua vez, altera o seu tipo de escoamento. Um teste simples pode ser feito para descobrir se o escoamento é hidraulicamente rugoso.

Figura 3.2 | Fluxograma do teste do tipo de escoamento

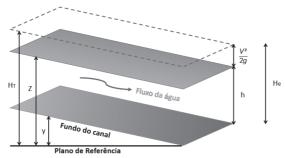


Fonte: elaborada pela autora

Considerando-se que o escoamento seja permanente em um trecho do canal, é necessário que a quantidade de escoamento que entra e a que sai desse trecho se mantenha constante. Se pensarmos em um canal longo, de seção constante e com pequena declividade, a água que escoa ao longo desse canal tende a balancear a força que move o líquido e a resistência oferecida pelo atrito gerado pela parede

do canal. Na Figura 3.3, observamos um fluxo de água (escoamento), fluindo ao longo da declividade do fundo do canal, que é dado pela distância y em relação ao plano de referência. A altura Z será a soma da altura y do fundo mais a altura h do fluxo, porém, o fluxo tem a carga cinética de escoamento $(V^2/2g)$ somados à altura da lâmina d'água, formando, então, a altura H_e , que somada à altura do fundo do canal torna-se H_T (altura total).

Figura 3.3 | Linhas de carga presentes no escoamento de um canal



Fonte: adaptada de Azevedo Netto e Alvarez (1982, p. 334).

Não havendo novas entradas nem saídas de líquido, a vazão será sempre a mesma e o movimento será permanente. Se a profundidade e a velocidade se mantiverem constantes e a rugosidade de suas paredes também permanecer constante, o movimento será uniforme, podendo-se, então, escrever a carga total como:

$$H_T = y + h + \frac{V^2}{2g}$$

Se passarmos a considerar o plano de referência como sendo o próprio fundo do canal, teremos:

$$H_e = h + \frac{V^2}{2g}$$

Em que H_e é a carga específica resultante da soma da altura da lâmina d'água h com a carga cinética do escoamento $\frac{V^2}{2g}$.



Canais uniformes e de escoamento uniformes não existem na natureza, até mesmo condutos artificiais de concreto (canais cuia secão transversal

não se altera), longos e de pequena declividade apenas se aproximam do movimento uniforme. Sempre haverá alterações na velocidade, vazão, altura e carga em um escoamento ao longo de seu percurso.

Conceitos de canais

É necessário destacar alguns conceitos importantes para o dimensionamento e a construção de canais. São eles:

Profundidade crítica (h_{mc}): quando em um escoamento com carga específica estabelecida ocorre a maior vazão possível para a altura h, ela estará em seu valor máximo, ou seja, temos a altura crítica (h_{mc}). Sabendo-se que a carga específica de um escoamento é dada por: $H_e = h + \frac{V^2}{2a}$

Utilizando a equação da vazão volumétrica e reorganizando a equação de tal forma que a vazão fique em evidência, tem-se:

$$Q = A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_e - h)}$$

Considerando-se uma profundidade média crítica dada por:

$$h_{mc} = \frac{A}{B}$$

Sendo A a área da seção e B a largura da borda livre do canal. Por outro lado, se utilizarmos a de carga crítica e substituir a relação acima, teremos: $h_{mc} = \frac{2}{3} \cdot H_{e}$

Se o escoamento ocorre acima da profundidade crítica, o escoamento é subcrítico ou fluvial. Se o escoamento ocorre abaixo dela, o escoamento é supercrítico ou torrencial.

A fim de se calcular a vazão crítica para o canal, temos a fórmula:

$$Q_c = A_c \sqrt{g \cdot h_{mc}}$$

Declividade crítica (I_c): lembrando a equação da vazão de canais de Chézy e utilizando-a em condições críticas:

$$Q = C \cdot A_c \sqrt{R_h \cdot I_c}$$

E igualando à equação de vazão para altura média crítica:

$$Q_c = A_c \sqrt{g \cdot h_{mc}}$$

Finalmente, teremos a equação da declividade crítica:

$$I_c = \frac{g \cdot h_{mc}}{C^2 \cdot R_h}$$

Sempre que a declividade de um canal ultrapassar a declividade crítica (I_c), a profundidade desse canal será inferior à profundidade crítica e o movimento da água será torrencial.

Pesquise mais

No vídeo do YouTube intitulado *Estudo de fluxo de um canal aberto de pequena seção* (traduzido do francês), podemos observar um canal hidráulico tendo seu regime de escoamento alterado de fluvial para torrencial pelo aumento na declividade e pela redução da seção transversal.

Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=Byl3PW6vzP8. Acesso em: 7 ago. 2017.

Velocidade crítica (V_c **)**: a partir da equação da vazão com a altura média crítica, podemos chegar à equação da velocidade média crítica por meio da equação da continuidade:

$$V_c = \sqrt{g \cdot h_{mc}}$$

Para escoamentos trabalhando em regime torrencial, é essencial prever meios para dissipar a energia existente em escoamentos torrenciais. A água, acima da velocidade crítica, provoca um desgaste rápido das estruturas por meio da abrasão, erosão e impacto.

Indicação de canais

Os canais podem ser classificados em:

Naturais: se caracterizam por terem seção variável, rugosidade alta e variável, pois normalmente transportam muito sedimento e, à medida que a velocidade do escoamento diminui, o sedimento se deposita, modificando, assim, a seção do canal. Pode-se citar como exemplo principal de canais naturais os rios.

Artificiais: que têm seção transversal definida e geralmente constante, rugosidade padronizada ao longo do curso d'água e escoamento em regime permanente. Podem ser revestidos ou não.



Os canais são definidos como estruturas hidráulicas de condução, destinados a transportar água de uma fonte (rios, lagos, tanques ou reservatórios) com cota geralmente mais elevada, até o local onde ela será utilizada.

Há dois tipos de uso dos canais:

Abastecimento: os canais de abastecimento são indicados para o transporte e a entrega de água potável para consumo humano, usos municipais, abastecimento de reservatório de usina hidroelétrica e irrigação agrícola.

Navegação: os canais de navegação são usados para transporte de mercadorias e pessoas. Esses podem ser divididos em duas subcategorias: canais laterais, que acompanham o vale dos rios, mas sem aproveitamento econômico para a navegação; canais de partilha, que ligam bacias hidrográficas diferentes e canais marítimos, que são vias aquáticas de tráfego de cidades, como o Grande Canal de Veneza, na Itália.

Canais: vantagens e desvantagens

Durante a vida útil do canal, é evidente as vantagens desse tipo de construção e seu auxílio nas atividades humanas, como abastecimento de água nas cidades, irrigação agrícola, transporte de carga e pessoas pelo leito do canal, controle de vazão e cheia de usinas hidroelétricas e reservatórios, entre outros. No entanto, há também desvantagens na construção de um canal, muitos deles ligados a patologias desse tipo de obra. Estão listadas a seguir as principais desvantagens que ocorrem ao longo da vida útil do canal:

Perdas por infiltração: as perdas devido à infiltração são inevitáveis, tanto em canais revestidos quanto nos canais sem revestimento. Um canal revestido de concreto apresenta infiltração da ordem de $0,0213m^3 / m^2$ por dia, enquanto um canal sem revestimento apresenta infiltração menor do que $0,15m^3 / m^2$ por dia.



O canal pode manter seu fundo natural sempre?

As perdas de água para abastecimento e irrigação, por exemplo, são prejuízos econômicos e ambientais.

Perdas por evaporação: a evaporação está presente em canais artificiais e naturais, revestidos ou não, não importando o tipo de fundo que o canal tem. A evaporação é calculada conhecendo-se a evaporação da região onde o canal está, em milímetros, multiplicado pela área superficial de água do canal a ela exposta.

Transbordamento: a principal causa do transbordamento em canais é a vazão incomum, ultrapassando a capacidade do canal, causada por chuvas torrenciais. O surgimento de obstáculos, como o assoreamento de rochas e blocos, o crescimento de vegetação, o acúmulo de lixos também são causadores de transbordamento, pois reduzem a seção transversal do canal, dificultando a passagem de água.

Assoreamento: fenômeno causado pelo acúmulo de sedimentos carregados pela água, causando diminuição da capacidade de transporte do canal e, em alguns casos, bloqueio do fluxo e transbordamento

Erosão: trata-se da deterioração dos lados e fundo do canal por ação das altas velocidades de escoamento das águas. Em geral, a região logo após a jusante das barragens é mais susceptível à erosão, visto que a velocidade da água e a turbulência gerada pela turbina são extremamente corrosivas às bordas e ao fundo do canal.

Concluímos esta seção com o intuito de aguçar a curiosidade sobre o dimensionamento de canais. Procurou-se, ao longo dos parágrafos, ressaltar a importância de conceitos sobre canais, em que esses conceitos influenciam no projeto de um sistema hidráulico e possíveis problemas ou soluções geradas por esse sistema de canalização. Conceitos de escoamentos críticos também são introduzidos aqui, a fim de trazer a preocupação acerca de desvantagens comuns nos canais que devem ser previstos pelo projetista. Encontramos aqui, portanto, uma preparação para o dimensionamento do sistema hidráulico completo, que utiliza condutos forçados, canais abertos e fechados e sistema de bombeamento.

Sem medo de errar

Retomando o contexto de aprendizagem, temos como realidade profissional as necessidades de um departamento de drenagem urbana, que contratou-o como projetista, para idealizar e dimensionar um canal hidráulico de borda livre a fim de suprir a instalação de bombeamento de um sistema de abastecimento de uma cidade ou região.

Nessa situação-problema, é proposto que você verifique o projeto de captação de água por canal de derivação em um riacho, cujas características são conhecidas: vazão média anual é de 1,5 m³/s, inclinação do talude de 0,5:1, declividade do riacho igual a 0,0005 m/m e que possui leito com fundo de terra e taludes empedrados. O sistema de captação pretende atender 24 mil habitantes, com demanda diária de 0,216 m³/dia por habitante. O canal de derivação de projeto tem seção quadrada feita em concreto com largura de base igual a 2 metros e declividade igual a 0,004 m/m.

Primeiramente, deve-se calcular as características do riacho por meio das equações do canal trapezoidal, em que a altura h é desconhecida:

$$A = h \cdot (b + m \cdot h) = h \cdot (2 + 0.5 \cdot h)$$

$$P = b + 2 \cdot h \cdot \sqrt{1 + m^2} = 2 + 2 \cdot h \cdot \sqrt{1 + 0.5^2} = 2 + 2.23h$$

$$R_h = \frac{h \cdot (b + m \cdot h)}{b + 2 \cdot h \cdot \sqrt{1 + m^2}} = \frac{h \cdot (2 + 0.5 \cdot h)}{2 + 2.23h}$$

Utilizando-se a fórmula de Manning para encontrarmos a altura h, teremos:

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

$$\frac{0,030 \cdot 1,5}{\sqrt{0,0005}} = h \cdot (2 + 0,5 \cdot h) \cdot \left[\frac{h \cdot (2 + 0,5 \cdot h)}{2 + 2,23h} \right]^{2/3}$$

$$h = 1,18 \ m$$

Após a canalização do riacho, ele passa a ter coeficiente de Manning n=0,014, pois terá revestimento em concreto, passa a ter seção quadrada cuja base será 2 metros e a altura é desconhecida. Para encontrarmos a altura desse novo escoamento, calculamos primeiramente as características geométricas da seção do canal:

$$A = b \cdot h = 2 \cdot h$$

 $P = h + b + h = 2h + 2 = 2 \cdot (h + 1)$

Pode-se utilizar a fórmula de Manning para calcular a altura da lâmina d'água:

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

$$\frac{0,014 \cdot 1,5}{\sqrt{0,004}} = 2 \cdot h \cdot \left[\frac{2 \cdot h}{2(h+1)} \right]^{2/3}$$

$$h = 0.39 \ m$$

A partir dessas novas características geométricas do canal, podese calcular o coeficiente de Chézy, a fim de verificarmos a nova velocidade do canal.

$$C = \frac{R_h^{1/6}}{n} = \frac{\left[\frac{2 \cdot 0.39}{2(0.39 + 1)}\right]^{1/6}}{0.014} = \frac{0.28}{0.014} = 37.8$$

Calculando-se então a velocidade do canal, teremos:

$$V = C\sqrt{R_h \cdot I_0} = 37.8\sqrt{0.28 \cdot 0.004} = 1.26 \text{ m/s}$$

Lembrando que a vazão necessária para o abastecimento da cidade é de 216 m³/dia por habitante e sabendo-se que a cidade tem 24 mil habitantes, temos que a vazão necessária diária será:

$$Q_{necess\'{a}ria} = \left(24000 \ hab\right) \cdot \left(0,216 \frac{m^3}{dia}\right) = 384 \ \frac{m^3}{dia}$$

Transformando-se a vazão de metros cúbicos por dia para metros cúbicos por segundo:

$$Q_{necess\'{a}r\'{i}a} = 384 \frac{m^3}{dia} \cdot \left(\frac{1 \ dia}{24 \ horas}\right) = 16 \frac{m^3}{hora} \cdot \left(\frac{1 \ hora}{60 \ min}\right) \cdot \left(\frac{1 \ min}{60 \ seg}\right) = 0,0044 \ \frac{m^3}{s}$$

Calculamos agora a vazão do canal de captação, que podemos chamar também de vazão disponível. Lembrando que o canal tem nova seção de 0,29 m de altura da lâmina d'água e 2 m de largura da base:

$$Q_{disponivel} = V \cdot A = 1,26 \cdot (2 \cdot h) = 1,26 \cdot (2 \cdot 0,29) = 0,73$$
 $\frac{m^3}{s}$

Se $Q_{disponível} > Q_{necessária}$ o canal atende à demanda da cidade.

É importante, agora, verificarmos se o canal está em situação crítica. Para tal, verificamos a declividade crítica por meio da equação de energia, considerando o fundo do canal como referência:

$$H_e = h + \frac{V^2}{2g} = 0.39 + \frac{1.26^2}{2 \cdot 9.8} = 0.47 \text{ m}$$

A altura crítica é dada por 2/3 da altura da linha de energia do canal:

$$h_c = \frac{2}{3} \cdot H_e = \frac{2}{3} \cdot 0,47 = 0,314 \ m$$

Por meio da altura crítica e da equação da declividade crítica, calculamos a declividade crítica do canal como sendo:

$$I_c = \frac{g \cdot h_c}{C^2 \cdot R_b} = \frac{9.8 \cdot (0.314)}{37.8^2 \cdot 0.28} = 0.0077 \ m / m$$

A declividade crítica (I_c) é maior do que a declividade do canal (I0), então o canal está em regime torrencial.

Avançando na prática

Canal de abastecimento para agropecuária Descrição da situação-problema

Considere agora um canal de irrigação agrícola ligado a um riacho que fica longe da zona rural, com vazão mínima de 2,0 m³/s. A água captada será utilizada para abastecer a criação de gado da região, cerca de 10 mil cabeças de gado, sendo que cada uma consome 32 litros por dia. Levando em conta a vazão necessária e tendo visto a vazão disponível, verifique se um projeto de um canal de seção circular com diâmetro de 0,5 metros e um revestimento em aço galvanizado possibilita esse abastecimento. A inclinação do terreno do córrego até a zona rural é 0,0003. Você deve, também, verificar o tipo de escoamento, fluvial ou torrencial, a fim de evitar problemas futuros no canal.

Resolução da situação-problema

Você deve calcular a vazão necessária:

$$Q_{necess\'{a}ria} = 10000 \cdot 0,032 \frac{m^3}{dia}$$

Deixar todas as equações relativas à seção transversal em função de \pmb{h} :

$$\theta = 2\arccos(1 - \frac{2h}{D})$$

$$R_h = \frac{\theta \cdot D}{2}$$

$$A = D^2 \cdot \frac{(\theta - \sec \theta)}{8}$$

Substituir as três equações acima na Fórmula de Manning, sendo $Q_{necessária} = Q$ e h a incógnita:

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

Encontrado o valor de ${\it h}$, verificar características de escoamento crítico:

$$H_e = h + \frac{V^2}{2g}$$

$$h_{mc} = \frac{2}{3} \cdot H_e$$

$$V_c = \sqrt{g \cdot h_{mc}}$$

$$I_c = \frac{g \cdot h_c}{C^2 \cdot R_c}$$

Verificar o tipo de escoamento:

 $I_c \leq I_0 \rightarrow$ Escoamento torrencial

 $I_c \ge I_0 \rightarrow \text{Escoamento fluvial}$

Faça valer a pena

1. Uma rede coletora de esgotamento sanitário é construída em condutos de borda livre com diâmetro de 200 mm, inclinação 0,006 m / m, coeficiente de rugosidade de Manning n = 0,013 e altura da lâmina d'água igual a 0,75D.

Qual a vazão que essa rede de esgoto é capaz de transportar nessas condições?

- a) $0.02315 \, m^3/s$
- b) 0.01181 m²/s
- c 0.03341 m²/s
- d 0.05926 m³/s
- e) 0.0002 m²/s
- **2.** No intuito de reduzir a escassez hídrica na região do semiárido brasileiro, foi lançado o projeto de Integração do Rio São Francisco com bacias hidrográficas do Nordeste através de canais de pequena inclinação e longa extensão.

A obra prevê a construção de mais de 700 quilômetros de canais de concreto ao longo do território de quatro estados para o desvio das águas do rio. Ao longo do caminho, o projeto prevê a construção de nove estações elevatórias de bombeamento de água.

Os canais de revestimento de concreto têm maior eficácia para evitar algumas das principais desvantagens de canais de fundo natural para abastecimento e irrigação. Quais são essas desvantagens?

- a) Perdas por infiltração e erosão das bordas.
- b) Perdas por vazão irregular.
- c) Perdas por velocidade alta.
- d) Perdas por obstrução na tubulação.
- e) Perdas por tombamento.
- **3.** As seções circulares e semicirculares são as que apresentam menor perímetro molhado e o maior raio hidráulico por unidade de área do canal, por isso são seções econômicas ideais. A adoção da seção circular em grandes condutos está condicionada a questões estruturais e aos processos de execução. Já a seção semicircular, bastante vantajosa para condutos abertos, frequentemente não é utilizada por questões estruturais, dificuldades de execução ou pela dificuldade de se revestir canais escavados semicirculares.

Canais de seção circular são indicados para quais tipos de utilização?

- a) Galerias de drenagem fluviais e esgotamento sanitário.
- b) Transposição de rios, ligação entre reservatórios de grande extensão.

- c) Canais navegáveis.
- d) Melhor utilizado em calhas de madeira com grandes proporções.
- e) Escavados em terra com fundo natural.

Seção 3.2

Dimensionamento de uma instalação de bombeamento

Diálogo aberto

Um sistema de abastecimento de água deve conduzir água de boa qualidade ao usuário (consumidor). Para tanto, deve-se ter em mente que, para um bom funcionamento, o sistema deverá ser constituído das seguintes partes: captação, adução, tratamento, reservação e distribuição. Na etapa de captação e adução, são previstas instalações de bombeamento para tomada d'água e adução do fluido a ser tratado e distribuído para uma população ou irrigação de área rural.

Dessa maneira, a captação é o conjunto de dispositivos construídos próximos de um manancial, para a tomada de água por sistema de bombeamento, e que será destinada ao sistema de abastecimento também utilizando bombeamento para tal, o que demonstra a importância do dimensionamento desse tipo de sistema para a hidráulica.

Na situação-problema (SP) desta seção, você será responsável pelo departamento de abastecimento urbano e necessita dimensionar o sistema de bombeamento do canal Anjinhos, maior canal da cidade de Oliveiras, responsável por abastecer a região urbana e rural da cidade que está em franca expansão. Por esse motivo, o sistema de bombeamento antigo não mais suporta bombear o escoamento à vazão necessária. Você, como responsável técnico, determinará a potência de uma bomba ou de uma associação de bombas em série a ser utilizada para suprir a nova vazão de projeto de 2 mil L/s.

O canal Anjinhos é artificial, construído em concreto com seção quadrada. A perda de carga no percurso total da tubulação de sucção e recalque é de 25 metros. A diferença de cota entre o canal e o sistema de distribuição, destino final da vazão recalcada pelo sistema de bombeamento da captação, é de 200 metros. Sabe-se que a velocidade de escoamento do canal é de 5 m/s e que a carga total na entrada da tubulação é de 220 m. A bomba escolhida, ou conjunto de bombas, deve recalcar a vazão de 2000 L/s. Pede-se que, no projeto, não sejam usadas tubulações superiores a 0,5 m de diâmetro.

Para isso, deve-se conhecer e compreender os conceitos fundamentais de máquinas hidráulicas, os tipos de bombas hidráulicas, os componentes necessários para o seu funcionamento, os conceitos de altura manométrica de bombas hidráulicas, compreender as curvas características de bombas e os fundamentos de associação de bombas.

Está preparado para esse desafio? Bons estudos!

Não pode faltar

Classificação e tipos de bombas hidráulicas

Uma bomba é uma máquina hidráulica capaz de elevar a pressão de um fluido, ou seja, a função das bombas é transformar a energia mecânica (motor de acionamento) em energia hidráulica (transmissão de pressão através do fluxo), a fim de produzir um fluxo capaz de transmitir pressão.

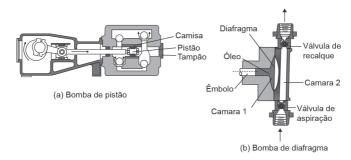
Todas as bombas hidráulicas funcionam segundo o princípio de deslocamento. Por exemplo, nas bombas centrífugas, o aumento de pressão do fluido vem da força centrífuga imprimida por um rotor. Dessa forma, as bombas são denominadas de acordo com a forma do deslocamento do fluido sob pressão (Figura 3.4). Bombas de deslocamento positivo aumentam a pressão do fluido através de pressão ou força exercida, enquanto as bombas cinéticas o fazem por energia cinética ou de movimento.

Figura 3.4 | Fluxograma dos tipos de bombas êmbolo de diafragma Bombas de Deslocamento Positivo ou Direto engrenagens Bombas Hidráulicas de lóbulos Bombas Cinéticas de palhetas

Fonte: elaborada pelo autor.

Bombas alternativas: nessas bombas, o fluido recebe a ação das forças diretamente de um pistão ou êmbolo ou de uma membrana flexível (diafragma). Elas podem ser acionadas por vapor, por motores elétricos ou por motores de combustão interna. São chamadas de bombas de deslocamento positivo, pois exercem forças na direção do próprio movimento do fluido. A Figura 3.5 mostra dois tipos de bombas alternativas.

Figura 3.5 | Bombas alternativas



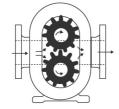
Fonte: Henn (2006, p. 47-8).

Bombas de pistão (Figura 3.5a) são adequadas para fluidos isentos de partículas sólidas, portanto, são indicadas para abastecimendo de propriedades rurais, enquanto as de diafragma (Figura 3.5b) são interessantes para bombeamento de fluidos com alta concentração de sólidos, como dosadoras e para bombeamento de fluidos tóxicos e corrosivos, pois elimina o contato do fluido com os vedantes.

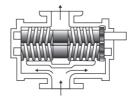
Bombas rotativas: nessas bombas, o fluido recebe a ação de forças provenientes de uma ou mais peças dotadas de movimento de rotação, que, comunicando energia de pressão, provocam seu escoamento. A ação das forças se faz segundo a direção que é a do próprio movimento de escoamento do fluido. A descarga e a pressão do fluido bombeado sofrem pequenas variações quando a rotação é constante.

Existe uma grande variedade de bombas rotativas que encontram aplicação não apenas no bombeamento convencional, mas, principalmente, no sistema de lubrificação, de controle e de transmissão hidráulica e nos sistemas automáticos. Exemplos estão mostrados na Figura 3.6.

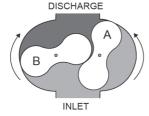
Figura 3.6 | Bombas rotativas



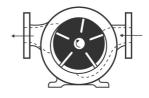
(a) Bomba rotativa de engrenagens



(b) Bomba rotativa de parafusos



(c) Bomba rotativa de lóbulos



(d) Bomba rotativa de palhetas

Fonte: Henn (2006, p. 47-8).

Bombas de engrenagem são indicadas para o combate a incêndio e abastecimento doméstico. Bombas de parafuso são indicadas para o transporte de fluidos de viscosidade elevada, não abrasivos, enquanto as bombas rotativas de lóbulos são apropriadas para o bombeamento de fluidos viscosos e produtos com sólidos em suspensão. Já as bombas de palhetas podem ser utilizadas para o bombeamento de suco de frutas, solventes e outros fluidos puros, isentos de partículas abrasivas e não muito viscosos. São muito empregados em sistemas de controle e transmissão hidráulica e, na aviação, no transporte de combustível e de óleo lubrificante.

Bombas centrífugas: o aumento de pressão, nesse tipo de bomba, resulta do recurso à força centrífuga imprimida ao fluido por uma roda ou rotor que se move dentro de um corpo ou caixa, que orienta o fluido desde sua entrada até a saída. Quanto ao formato do rotor, existem três classes de bombas centrífugas:

Bombas de escoamento radial: nessas bombas, a pressão é desenvolvida principalmente pela ação da força centrífuga. O fluido entra axialmente pelo centro e sai radialmente pela sua periferia. Esse tipo de bomba é indicado principalmente para grandes cargas.

Bombas de escoamento axial: nessas bombas, a pressão é desenvolvida pela ação de sucção das pás sobre o fluido. A vazão entra axialmente e sai quase na mesma direção, ou seja, no mesmo sentido. São indicadas para cargas baixas.

Bombas de escoamento misto: parte da pressão é desenvolvida pela força centrífuga e a outra pela ação da sucção das pás sobre o fluido. O fluido que entra axialmente sai numa direção média entre axial e radial. São indicadas para cargas médias.

Componentes das bombas hidráulicas

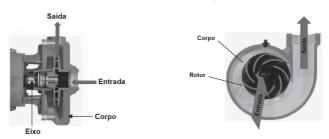
Existem três partes fundamentais em uma bomba:

Corpo (Figura 3.7b): também pode ser chamado de carcaça, em forma de voluta, é desenhada para manter as velocidades iguais em volta do rotor e reduzir a velocidade na saída do fluído.

Rotor (impelidor): composto por um disco provido de pás (palhetas) que impulsionam o fluido através da voluta e é fixado no eixo da bomba (Figura 3.7b). Este pode ser do tipo: aberto, indicado para fluidos sem partículas em suspensão; semiaberto, incorpora uma parede no rotor para prevenir que matéria estranha se aloje no rotor e interfira na operação; fechado, tem como vantagem o fato de bombear fluidos com sólidos em centrífuga e como desvantagem, o desgaste e a cavitação.

Eixo de acionamento (Figura 3.7a): que transmite a força motriz ao qual está acoplado ao rotor, causando o seu movimento rotativo.

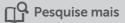
Figura 3.7 | Componentes de uma bomba centrífuga



(a) Bomba centrífuga vista em corte transversal

(b) Bomba centrífuga vista em corte longitudinal

Fonte: http://www.schneider.ind.br/produtos/>. Acesso em: 26 jul. 2017.



Para saber mais sobre o fenômeno de cavitação em bombas hidráulicas, leia o capítulo 5.9 do livro: PORTO, R. M. **Hidráulica Básica** 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006. p. 222.

Altura manométrica de instalação de bombas hidráulicas

Podemos definir a altura manométrica de um fluido pela equação da energia, considerando-se como ponto 1 o ponto inicial (de sucção da bomba) e ponto 2 o ponto final (de recalque da bomba):

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} - H_M = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H$$

Em que o termo $\frac{p_1}{\gamma}$ é a carga de pressão, em metros de coluna d'água (mca), dada pela pressão inicial (num ponto definido como 1) dividida pelo peso específico do fluido; \mathbf{z}_1 a carga potencial, em metros, é a cota do reservatório no ponto inicial; $\frac{V_1^2}{2g}$ a carga cinética, em mca, dada pela velocidade do fluido ao quadrado por duas vezes a gravidade local; H_{M} a carga manométrica da bomba; e ΔH a perda de carga, em mca.

Uma bomba pode estar funcionando como uma turbina caso ela esteja retirando energia do escoamento. Essa diferença se nota pelo sinal resultante da altura manométrica. Quando positivo, a máquina hidráulica está trabalhando como bomba, se negativo, está trabalhando como turbina

As bombas são especificadas por sua potência (cv), sendo a potência um fluxo de trabalho, ou seja, trabalho por unidade de tempo. $P = \gamma \cdot Q \cdot H_m = 1 \text{ cv}$

 $P = \frac{\gamma \cdot \mathbf{Q} \cdot H_m}{75} = [cv]$

Em que P é a potência da bomba; γ é o peso específico do fluído; \mathbf{Q} é a vazão; e $\mathbf{H}\mathbf{m}$ é a altura manométrica.

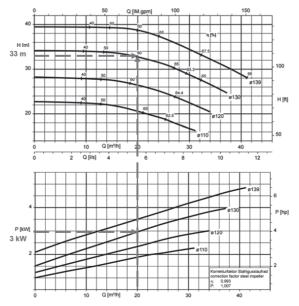
Curvas características e associação de bombas: série e paralelo

As relações entre as mais importantes variáveis do dimensionamento de bombas, que são a vazão Q, a altura manométrica \pmb{Hm} , a potência P, e o rendimento $\pmb{\eta}$, são apontados por curvas características das bombas.



Para melhor entendermos o conceito, suponhamos que precisaremos bombear uma vazão de $20m^3/h$, e que, para um diâmetro de canalização de 130 mm de diâmetro, precisaremos de uma potência de 3 kW e teremos uma altura (Hm) de 33 metros.

Figura 3.8 | Escolha de uma bomba para recalcar uma vazão Q, a uma altura manométrica H



 $\label{lem:power_recursion} Fonte: $$\operatorname{http://www.ksb.com.br/php/produtos/download.php?arquivo=curvas_60hz_2731_451_07_pb.pdfftipo=curvas_Acesso em: 20 jul. 2017.$

As curvas características de uma bomba (Figura 3.10) são obtidas experimentalmente, sendo que para cada vazão bombeada são medidas a vazão e a altura de elevação e o torque no eixo da máquina.

Traçando-se a curva característica da canalização, é possível encontrar um ponto de equilíbrio (Figura 3.9) entre as duas curvas, que define a melhor condição hidráulica para o bombeamento.

Figura 3.9 | Curva característica da bomba e da canalização, cruzando-se no ponto de equilíbrio



Fonte: elaborada pela autora.

O ponto de equilíbrio deve corresponder ao ponto de ótimo rendimento da bomba e ao custo mínimo da tubulação.



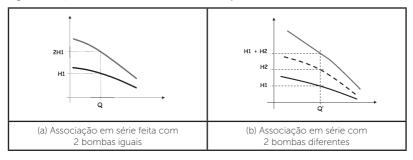
O valor de equilíbrio é comumente obtido graficamente e é chamado de ponto de equilíbrio, ponto de operação ou mesmo ponto de funcionamento. Por quê?

Muitas vezes não encontramos o conjunto motobomba que eleva na altura manométrica a vazão desejada. Nesses casos, é preciso que se associe duas ou mais bombas em série ou paralelo.

Associação em série

Quando duas ou mais bombas operam em série, a vazão é a mesma para todas elas e somam-se as alturas manométricas delas. A Figura 3.10 mostra como ocorre essa soma, para bombas iguais ou diferentes.

Figura 3.10 | Curvas características da associação de bombas em série

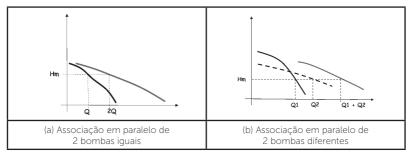


Fonte: elaborada pela autora

Associação em paralelo

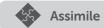
Quando duas ou mais bombas operam em paralelo, somam-se as vazões para uma mesma altura manométrica. A Figura 3.11 mostra como ocorre a soma das alturas manométricas entre duas bombas iguais e entre duas bombas diferentes.

Figura 3.11 | Curvas características da associação de bombas em paralelo



Fonte: elaborada pela autora.

A situação em que ocorre a associação de bombas iguais permite uma curva final do sistema mais estável, facilitando a manutenção dessas.



A associação em série é feita quando se tem grande desnível geométrico a ser vencido. Já a associação em paralelo é feita quando se necessita de aumento de vazão no sistema.

Concluímos esta seção sabendo que o dimensionamento de uma instalação de bombeamento depende do tipo de bomba escolhida (rotativas, alternativas, centrífugas e todas as suas subcategorias), da sua potência, de quantas bombas serão utilizadas em conjunto e da altura manométrica a ser recalcada pela bomba. Aprendemos que a melhor bomba ou conjunto de bombas a ser escolhido é aquele que tem o ponto de maior rendimento e maior economia.

Sem medo de errar

Retomando o contexto de aprendizagem, estamos trabalhando para solucionar o problema da cidade de Oliveiras, cujo sistema de bombeamento instalado no canal Anjinhos, principal canal da cidade, não mais suporta a vazão requerida para abastecê-la. Nessa SP, determinaremos a potência da bomba ou do conjunto de bombas necessário para cumprir esse objetivo.

O canal apresenta revestimento em concreto e tem seção quadrada. A perda de carga no percurso total da tubulação de sucção e recalque é de 25 metros. A diferença de cota entre o canal e o sistema de distribuição é de 200 metros. Sabe-se que a velocidade de escoamento do canal é de 5 m/s e que a carga total na entrada da tubulação é de 220 m. A bomba escolhida, ou conjunto de bombas, deve recalcar a vazão de 200 L/s.

Para calcularmos a altura manométrica a ser vencida pela bomba, devemos utilizar a equação:

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

Consideramos a superfície do canal como sendo a cota de referência, dessa forma:

$$z_1 = 0m$$
$$z_2 = 200m$$

Sabemos que a carga de entrada da tubulação de captação é de 220 m, a pressão no ponto inicial (p_1) é de 220 m e que a perda total na tubulação de sucção e recalque é de 25 m, com velocidade do canal igual a 5 m/s, teremos:

$$220 + 0 + 0 - H_M = 0 + 200 + \frac{5^2}{2 \cdot 9.8} + 25$$

$$H_M = -6.27m$$

A altura manométrica calculada para o sistema tem sinal negativo, portanto, a máquina hidráulica a ser instalada trabalhará como bomba hidráulica, recalcando a uma altura de 6,27 m a vazão requerida.

Para calcularmos a potência necessária para o sistema, pede-se que se utilize tubulações de até 0,5 m de diâmetro, se utilizarmos o diâmetro da seção da tubulação de sucção da bomba como sendo 0,5 m, e sabendo-se que a vazão é de 0,2 m³/s, teremos:

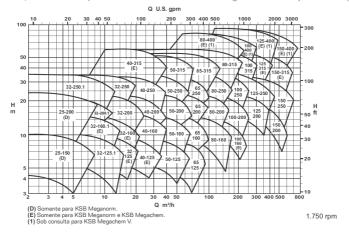
$$P = \gamma \cdot Q \cdot H_m = 9800 \cdot 0, 2 \cdot 6, 27 = 12 \ 289, 2W = 12, 3kW$$

Dessa forma, deve-se consultar os catálogos comerciais de bombas disponíveis e escolher uma que atenda essas especificações.

Devemos recorrer ao gráfico de quadrilhas para encontrar a bomba de maneira mais rápida. O gráfico de quadrilhas pertence ao catálogo de bombas comerciais e utiliza a vazão em m³/h, transformando-se então as unidades, temos:

$$Q = 0.2 \frac{m^3}{\text{seg}} \cdot \frac{60 \,\text{min}}{1 \text{hora}} \cdot \frac{60 \,\text{seg}}{1 \text{min}} = 720 \frac{m^3}{h}$$

Figura 3.12 | Gráfico de quadrilhas de bombas centrífugas com rotação 1750 rpm



Consultando o gráfico, percebemos que não há nenhuma bomba que atenda a vazão de 720 m³/h. A melhor solução para o caso é fazer a associação de bombas em paralelo, dessa forma, teremos:

$$Q_{paralelo} = Q_{bomba1} + Q_{bomba2} = 720 m^3$$
 / h

Portanto, se $Q_{bomba1} = Q_{bomba2} = \frac{720}{2} = 360 m^3 / h$, porém, como não há solução compatível com as duas bombas, uma solução possível seria seis bombas associadas em paralelo, em que teríamos $Q_{bomba} = \frac{720}{6} = 120 \ m^3 / h$ para essa vazão e altura manométrica Hm igual a 6,27 m, as seis bombas escolhidas seriam idênticas e pertencentes ao grupo de bombas com diâmetro dos rotores de 80 mm a 160 mm e rotação de 1750 rpm.

Avançando na prática

Abastecimento de bebedouros de uma criação de bovinos Descrição da situação-problema

Nesta nova situação-problema, temos um canal de abastecimento de uma criação de bovinos, cujo consumo de água é de 141 L/s e o diâmetro da tubulação de sucção é de 500 mm. Devemos calcular a potência da bomba necessária para vencer uma altura manométrica (já somadas as perdas de carga da tubulação) de 64 m entre o canal e os bebedouros dos animais.

Resolução da situação-problema

Para solucionarmos a nova situação-problema, primeiramente precisaremos utilizar a fórmula da potência da bomba hidráulica.

$$P = \gamma \cdot Q \cdot H_m$$

O peso específico da água é 9800 kg/m³, a vazão é igual a 141 L/s escoando numa seção de diâmetro igual a 500 mm, a altura manométrica de recalque igual a 64 m. Portanto, teremos:

$$P = 9800 \cdot 0,141 \cdot (\frac{\pi \cdot 0,5^2}{4}) \cdot 64$$
$$P = 1736W = 17.36kW$$

Utilizando associação de bombas, teremos a potência de cada bomba, considerando duas bombas idênticas em série, a altura manométrica a ser vencida poderá ser dividida em 2 partes iguais para cada bomba, visto que a associação de bombas promoverá a soma das duas alturas manométricas:

$$H_{m1} + H_{m2} = 64m$$

Portanto, a potência necessária de cada bomba associada será:

$$P = 9800 \cdot 0,141 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 0,5^2}{4}\right) \cdot 32$$
$$P = 2763.6W = 2.76kW$$

A potência das bombas utilizadas associadas em série necessária para o sistema de abastecimento da criação de bovinos será de 2,76 kW.

Faça valer a pena

1. A carcaça de uma centrífuga é o componente responsável pela contenção do fluido bombeado e pela conversão de energia cinética do fluido em energia de pressão. No entanto, em casos de bombas de grande porte que funcionam com vazão acima da vazão de projeto, sabe-se que a ação do empuxo radial, ou seja, a pressão da água sobre a parede da voluta, é tão alta que tende a desestabilizar o sistema, podendo até gerar a ruptura da voluta.

Em bombas de grande porte que funcionam com vazão acima da vazão de projeto, como artifício para atenuar o empuxo radial, deve-se:

- a) utilizar de carcaça em voluta simples, porém, aumentar a vazão.
- b) aumentar o tamanho das palhetas do rotor, a fim de aumentar a pressão interna.
- c) inserir lóbulos no rotor, para fazer com que o rotor funcione de maneira mais lenta.
- d) utilizar carcaça em dupla voluta, dividindo o escoamento em dois para melhor distribuição dos esforços internos.
- e) utilizar outra bomba associada com menor potência e sentido inverso do escoamento, a fim de reduzir a energia do escoamento.
- **2.** A altura manométrica representa a altura que a bomba terá de vencer para transportar a vazão Q de um reservatório inferior (rio, canal, riacho, represa, entre outros) para um reservatório superior (estação de tratamento de água, canal, caixa d´água, entre outros). Para isso, é necessária uma potência, que é dada por:

 $P = \gamma \cdot Q \cdot H_m$

Uma bomba de potência 15 kW retira água de um reservatório a uma vazão de $0.5 \, m^3/s$. Desprezando-se as perdas de carga devido ao atrito da canalização, qual a altura (Hm) da bomba nessas condições?

- a) Hm = 4,07 m.
- b) Hm = 3,06 m.
- c) Hm = 13,24 m.
- d) Hm = 2.6 m.
- e) Hm = 7,32 m.
- **3.** Em bombas de deslocamento positivo, os elementos móveis deslocam uma quantidade de fluido que é fixada pelas dimensões e pela geometria do interior da bomba, contra uma pressão que é determinada pelas alturas de recalque e de sucção e, ainda, pelas perdas devidas ao atrito no sistema de tubulação.

Pertencem à categoria de bombas de deslocamento positivo, as bombas:

- a) Centrífuga diagonal e axial.
- b) Rotativa de engrenagens e rotativa de palhetas.
- c) Centrífuga radial e alternativa de pistão.
- d) Alternativa de diafragma e centrífuga mista.
- e) Alternativa de pistão e centrífuga radial.

Seção 3.3

Dimensionamento de canais

Diálogo aberto

Os sistemas que compõem o setor de hidráulica e saneamento compreendem diversas modalidades, tal como tratamento e abastecimento de água, sistema de coleta e tratamento de esgoto sanitário doméstico e sistema de drenagem de águas pluviais. O sistema de drenagem é o conjunto de obras destinadas ao controle das águas excessivas ou para controle da velocidade do escoamento superficial, por meio da coleta e condução aos fundos de vale. O sistema de drenagem é composto pelas micro e macrodrenagem. O sistema de microdrenagem capta as águas excessivas, levando-as para os fundos de vale, composto por captação, galerias (canais de seção circular) e poços de visita. Já o sistema de macrodrenagem é o sistema de cursos de águas naturais ou artificiais que captam as águas provenientes dos sistemas de galerias pluviais.

O controle da velocidade do escoamento superficial em sarjetas, bem como do escoamento nas galerias, é de extrema importância, pois velocidades acima da crítica causam problemas no sistema, como o ressalto hidráulico, que pode levar o canal à ruptura. As galerias de drenagem devem ser retilíneas e construídas em concreto, com declividade mínima de 0,01 m/m, apresentando diâmetro mínimo de 300 mm, de tal forma que lhes permitam um escoamento com vazão de 0,150 m³/s.

Assim, o contexto de aprendizagem, utilizado como situação da realidade profissional desta unidade, envolve o Departamento de Águas e Esgoto de uma grande cidade, que contratou-o como projetista, que atuará como líder responsável pelo projeto e ampliação dos canais de drenagem e esgoto da cidade.

Na situação-problema (SP) desta seção, você recebeu uma proposta de substituir o canal de drenagem preexistente, de seção quadrada a céu aberto, por um novo, com seção circular e enterrado, mantendo-se a declividade. A modificação da seção transversal de um rio ou canal poderia provocar um aumento da velocidade de escoamento, gerar um ressalto hidráulico, remansos e, por

conseguinte, gerar inundações? Cabe a você, responsável, verificar e analisar o projeto.

Para resolvermos a SP proposta, devemos conhecer e compreender os conceitos de declividade de canais, de dimensionamento de canais, de seções de mínimo perímetro molhado e de projeto de canais, a fim de aplicá-los na solução da situação-problema proposta.

Está preparado para esse novo desafio? Bons estudos!

Não pode faltar

Declividade de canais

A declividade longitudinal de um canal é um elemento geométrico de extrema importância para o dimensionamento de canais, pois alterará seu regime de escoamento. A declividade tem valor limite no qual o escoamento do canal se divide entre fluvial e torrencial. Veremos agora quais outros fatores relacionados à declividade influenciam no escoamento.

A declividade de fundo (I_o) é a própria declividade longitudinal do canal, a declividade da linha d'água (I_a) é a declividade da superfície da água e a declividade da linha de energia (I_f) é a variação da energia da corrente no sentido do escoamento.

Para determinar o tipo de escoamento, deve-se comparar a declividade do canal com a declividade crítica, de tal forma que, se a declividade do canal ultrapassar o valor da declividade crítica, o escoamento será torrencial. Além desta, existem outras formas de determinar e classificar o tipo de escoamento, uma delas é por meio do número de Froude.

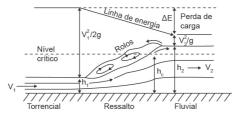
$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}}$$

Tem-se que, se Fr < 1, o escoamento é fluvial, se Fr > 1, o escoamento é torrencial e se Fr = 1, o escoamento encontra-se em seu ponto crítico.

A Figura 3.13 exemplifica um escoamento que muda de regime fluvial (com velocidade V_1) com profundidade da linha d'água inicial (h_1) menor do que a crítica (h_c), para um regime torrencial. Quando ocorre essa mudança, a profundidade do canal passa a ser maior (h_2) e ocorre uma sobre-elevação brusca da superfície

líquida, chamada de ressalto hidráulico. O ressalto promove perda de energia, demonstrada no declive da linha de energia, fazendo com que o escoamento reduza a velocidade. Os trechos de velocidade reduzida são chamados de remanso ou remonte.

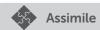
Figura 3.13 | Ressalto hidráulico



Fonte: Porto (2006, p. 335).

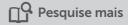
O aumento da profundidade da linha d'água causado pelo ressalto pode ser calculado por:

$$h_2 = -\frac{h_1}{2} + \sqrt{\frac{2 \cdot V_1^2 \cdot h_1}{g} + \frac{h_1^2}{4}}$$



Os ressaltos hidráulicos são provocados por uma singularidade, ou seja, uma perturbação que se propaga ao longo de um trecho do canal.

São exemplos de singularidades possíveis: passagem de um reservatório para um canal; passagem de um canal para um reservatório; sobre-elevação do fundo, causado por um obstáculo; estreitamentos localizados: estreitamento do canal num trecho curto (pilares de ponte, por exemplo, reduzem a seção do canal apenas na região onde está construída a ponte); estreitamento extenso (diminuição da seção ao longo de um trecho extenso) e mudanças bruscas de declividade (diminuição ou aumento da declividade ou ligação de um canal de declividade maior com um de menor declividade) etc.



Leia mais sobre ressalto e remanso no capítulo 27 do livro AZEVEDO NETTO, J. M.; ALVAREZ, G. A. **Manual de hidráulica**. 7. ed. São Paulo:

E. Blucher, 1982. No capítulo 6 do livro LENCASTRE, A. C. **Manual de hidráulica geral**. São Paulo: E. Blucher, 1972. 411 p., veja os tipos de ressaltos hidráulicos possíveis e suas linhas de energia. Assista à formação do ressalto hidráulico causado por obstáculo no vídeo *Hydraulic jump over a Weir*. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=cRnlsqSTX7Q. Acesso em: 7 ago. 2017.

Dimensionamento de canais

As condições de contorno que limitam o dimensionamento de canais são: a natureza do terreno; a presença de avenidas e outras obras urbanas que limitam o comprimento e a largura do canal; a limitação de profundidade por questões de escavação ou encanamentos preexistentes; a profundidade do lençol freático e o revestimento compatível com a velocidade média esperada.

Retomando a fórmula de Manning, a fórmula básica para o dimensionamento de canais em regime uniforme é:

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

Podemos observar que o lado direito da equação é de caráter geométrico. Determinada a forma geométrica, existirá mais de uma combinação entre os elementos da seção, como a largura e a profundidade da linha d'água, que satisfazem a equação. Então, podese separar a equação em:

 $L = \frac{n \cdot Q}{\sqrt{I_o}}$

Sendo L a variável que representa o lado esquerdo da equação, e

$$R = \alpha \cdot \beta^{2/3}$$

Sendo R a variável que representa o lado direito da equação, com α representando a área da seção do canal e β representando o raio hidráulico. De tal forma que:

 $\lambda = \left(\frac{L}{R}\right)^{3/8}$

Sendo que λ é uma dimensão característica da seção em que todas as dimensões da seção são dadas em função dessa dimensão característica. Podemos então reescrever e nomear as parcelas L e R como:

$$M = L^{\frac{3}{8}}$$

Sendo M o coeficiente dinâmico e K o coeficiente de forma:

$$K = R^{\frac{3}{8}}$$

De tal forma que:

$$\lambda = \frac{M}{K}$$

Para seções trapezoidais, teremos $\lambda = h$

$$\lambda = h = \frac{M}{K_1}$$

Em que \boldsymbol{h} é a altura da linha d'água e \boldsymbol{M} é o coeficiente dinâmico, dado pela fórmula:

 $M = \left(\frac{n \cdot Q}{\sqrt{I_0}}\right)^{\frac{3}{8}}$

E K_1 é o coeficiente de forma, dado pela Tabela 3.3 a seguir, em que n é o coeficiente de rugosidade de Manning.

Tabela 3.3 | Valores do coeficiente de forma K_1 para dimensionamento de canais quadrados, retangulares, e trapezoidais

$\frac{b}{h}$	m = 0,0	m = 0,5	<i>m</i> = 1, 0	<i>m</i> = 1,5	<i>m</i> = 2,0	<i>m</i> = 3,0	<i>m</i> = 4,0
1	0,760	0,961	1,103	1,210	1,299	1,446	1,568
2	1,091	1,236	1,340	1,422	1,491	1,446	1,568

Fonte: adaptada de Porto (2006, p. 268-9).

Para seções circulares, teremos:

$$\lambda = D = \frac{M}{K_2}$$

Em que D é o diâmetro do canal e M é o coeficiente dinâmico, dado por:

 $M = \left(\frac{n \cdot Q}{\sqrt{I_0}}\right)^{\frac{3}{8}}$

E K_2 é o coeficiente de forma, dado pela Tabela 3.4 a seguir.

Tabela 3.4 | Valores do coeficiente de forma ${\it K}_{\rm 2}$ para dimensionamento de canais circulares

$\frac{h}{D}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
K ₂	0,498	0,556	0,608	0,640	0,661

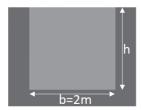
Fonte: adaptada de Porto (2006, p. 253).

Dessa forma, podemos dimensionar o canal de uma maneira facilitada, utilizando as tabelas de coeficiente de forma.



Para ajudar a esclarecer este conteúdo, vamos determinar a largura da base de uma galeria de águas pluviais de seção quadrada, de terra (n=0,020), altura h igual a 2 m, declividade de fundo $I_0=0,004m$ I m, na qual escoa uma vazão Q=33,38 m^3 I s em regime permanente e uniforme.

Figura 3.14 | Galeria de água pluvial com seção quadrada em terra



Fonte: elaborada pela autora.

Podemos encontrar o valor do coeficiente dinâmico M utilizando sua fórmula:

$$M = \left(\frac{n \cdot Q}{\sqrt{I_0}}\right)^{\frac{3}{8}} = \left(\frac{0,020 \cdot 33,38}{\sqrt{0,004}}\right)^{\frac{3}{8}} = 2,42$$

Agora podemos calcular o coeficiente de forma:

$$\lambda = h = \frac{M}{K_1} = \frac{2,42}{K_1}$$
$$2 = \frac{2,42}{K_1}$$
$$K_1 = 1,210$$

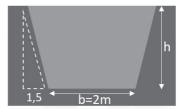
Deve-se buscar na tabela de coeficientes de forma para canais quadrados, retangulares e trapezoidais (Tabela 3.3) uma solução com valor de K_1 mais próximo de 1,120 que não gere dificuldades maiores na execução, ou seja, mais próximo da seção anterior. Verificamos então que m=1,5 é uma solução apropriada.

$$\frac{b}{h} = 1$$

Para tal solução, teremos:

$$b = h = 2m$$

Figura 3.15 | Características da seção transversal e inclinação do talude finais após dimensionamento



Fonte: elaborada pela autora

Dessa forma, dimensionamos o canal a partir de poucas informações existentes e melhoramos sua seção transversal por meio da troca de seção quadrada para trapezoidal.

Seções de mínimo perímetro molhado

Para o dimensionamento de um canal, devemos definir a forma geométrica da seção, suas dimensões, seu revestimento e a declividade para escoar uma determinada vazão. No entanto, existe uma infinidade de seções com dimensões que atendem à fórmula de Manning, gerando várias opções de dimensionamento.

Relembrando a fórmula de Manning, pode-se analisar que, para uma declividade de fundo e rugosidade fixadas, a vazão será máxima quando o raio hidráulico estiver no seu maior valor possível, o que ocorre quando o perímetro molhado for o mínimo possível.

Portanto, a seção de mínimo perímetro molhado pode ser chamada também de seção ótima, por ser a seção mais eficiente e com menor custo, visto que a superfície de revestimento será mínima.

Estão relacionadas, na Tabela 3.5 a seguir, três formas geométricas e suas seções ótimas. Deve-se notar que a seção circular obtém sua máxima vazão e sua máxima velocidade em seções de alturas diferentes. Nos projetos usuais, o limite da altura da lâmina d'água é fixado em h=0,75D.

Tabela 3.5 | Formas geométricas e suas seções ótimas

	Área (A)	Perímetro molhado (P)	Observações		
	2∙h²	3·h	b = 2 · h		
h b m	$(x+m)\cdot h^2$	$(x+2\cdot\sqrt{1+m^2})\cdot h$	$x=2\cdot(\sqrt{1+m^2}-m)$		
D 1	$ heta=257^\circ$ para seções de máxima velocidade, com $ heta=0,81D$				
h	$ heta=302,5^\circ$ para seções de máxima vazão, com $ heta=0,94D$				

Fonte: elaborada pela autora.

Na prática, entretanto, nem sempre é possível projetar uma seção de mínimo perímetro molhado, pois a seção pode resultar numa profundidade de valor muito alto, aumentando o custo de escavação, por exemplo.



A seção circular tem sua máxima vazão quando sua seção é plena? Podemos considerar seções plenas em canais de borda livre?

Projeto de canais

Nem sempre as seções de máxima vazão e máxima velocidade podem ser adotadas no projeto de um canal. Outros fatores podem ser intransigíveis para o projeto da seção, como a natureza das paredes do canal. Se o revestimento da parede do canal não suportar a inclinação do talude durante a ação da água, ele se desfará, ou seja, erodirá. A Tabela 3.6, a seguir, apresenta as inclinações usuais para taludes de canais

Tabela 3.6 | Taludes usuais para canais trapezoidais

Natureza das paredes do canal	Inclinação do talude (1:m)		
Saibro ou terra porosa	1:2		
Cascalho roliço	1:1,75		
Terra compacta e sem revestimento	1:1,5		
Terra muito compacta ou paredes rochosas	1:1,25		
Rochas estratificadas ou alvenaria de pedra bruta	1:0,5		
Rochas compactas, alvenaria acabada ou concreto	1:0		

Fonte: Azevedo Netto e Alvarez (1982, p. 447).

Assim como velocidades acima da velocidade crítica são prejudiciais para as paredes do canal, velocidades muito pequenas também são prejudiciais, pois favorecem a deposição de lama, lodo, materiais em suspensão e permitem o crescimento de plantas aquáticas. Os seguintes valores, apresentados na Tabela 3.7 são aconselháveis:

Tabela 3.7 | Velocidades médias aconselháveis para cada tipo de material de paredes e fundo de canais

Material das paredes do canal	Velocidade média (m/s)		
Areia grossa	0,46 a 0,61		
Terreno argiloso compacto	0,91 a 1,14		
Cascalho grosso, pedregulho, piçarra	1,52 a 1,83		
Alvenaria	2,44 a 3,05		
Rochas compactas	3,05 a 4,00		
Concreto	4,00 a 6,00		

Fonte: Porto (2006, p. 278).

Dependendo do tipo de indicação de uso do canal, a declividade deste deve seguir inclinações usuais ou adequadas a esse tipo de uso. A Tabela 3.8 apresenta as faixas de declividade aconselhadas ou usuais.

Tabela 3.8 | Declividades aconselhadas para projeto de cada tipo de canal

Tipo de canal	Declividade (m/m)		
Canais de navegação	Até 0,00025		
Canais de irrigação pequenos	0,0004 a 0,0005		
Canais de irrigação grandes	0,0006 a 0,0008		
Aquedutos de água potável	0,00015 a 0,0001		

Fonte: Porto (2006, p. 278).

Para canais com perímetros molhados de diferentes rugosidades, deve-se usar na fórmula de Manning uma rugosidade equivalente total, dada pelas expressões apresentadas na Tabela 3.9 a seguir, em que $n_{\rm e}$ é a rugosidade equivalente, P o perímetro molhado total da seção e N o número de subseções.

Tabela 3.9 | Considerações a serem feitas no projeto de canal de múltiplas seções e a equação da rugosidade equivalente utilizada

Considerações de projeto	Equação da rugosidade equivalente total (n_e)		
Assumindo-se que cada uma das subáreas tem a mesma velocidade média e que a soma delas será igual à velocidade média da seção total.	$n_e = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} (P_i n_i^{3/2})}{P}\right]^{2/3}$		
Assumindo-se que a força total de resistência ao escoamento devido ao efeito de cisalhamento no perímetro P, é igual à soma das forças de resistência em cada subárea de perímetro.	$n_{e} = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} (P_{i} n_{i}^{2})}{P}\right]^{1/2}$		

Fonte: adaptada de Porto (2006, p. p. 276-7).

Seções duplas, ou compostas, de leito múltiplo (Figura 3.16), ou canais que apresentam seções transversais muito irregulares, têm melhores resultados em seu dimensionamento quando se subdivide a seção com linhas verticais imaginárias e, para cada subseção, utilizase a fórmula de Manning para o cálculo da vazão parcial. A vazão total da seção será o somatório das vazões parciais, sendo que as linhas verticais imaginárias não devem ser computadas no cálculo do perímetro molhado.

Figura 3.16 | Seção composta com perímetros de rugosidade diferentes



Fonte: elaborada pela autora.

Na prática, o projeto e a construção de um canal estão condicionados por uma série de restrições de natureza variada, como: as condições topográficas, geotécnicas, construtivas, de influência do sistema viário, existência de obras de arte (viadutos e pontes, principalmente), entre outros.

Sem medo de errar

Retomando a situação-problema, temos um canal de concreto de seção quadrada, já construído na cidade, com base igual a 4 m, altura das paredes de 0,9 m, declividade 0,0005 m/m e vazão estimada em dias de chuva igual a 5 m³/s. Um projeto para modificação do canal foi proposto, passando a ser um canal de seção circular e enterrado, para a mesma vazão estimada dos dias de cheia e mantendo-se a declividade. Você, projetista responsável, deve verificar a proposta de projeto, a fim de prever o risco de ressaltos e remansos por conta da redução da seção transversal. Deve-se atentar à velocidade do escoamento do canal ao longo dessa verificação.

Primeiramente, calculamos a seção de mínimo perímetro molhado para o canal já existente.

Características da seção de mínimo perímetro molhado:

$$A = 2 \cdot h^2$$

$$P = 3 \cdot h$$

$$Rh = \frac{2 \cdot h^2}{3 \cdot h}$$

Fórmula de Manning para dimensionamento de canais:

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

$$\frac{0,014 \cdot 5}{\sqrt{0,0005}} = 2h^2 \cdot \left(\frac{2h^2}{3h}\right)^{2/3}$$

$$h = 1.3m$$

A altura necessária para esse canal ter a seção ótima, ou seja, a maior vazão pela menor seção, é de 1,3 m. No entanto, o canal tem apenas 0,9 cm de altura das paredes laterais, confirmando a necessidade da construção de um novo canal.

Outra verificação importante é sobre o escoamento do canal que sofre com o regime torrencial durante as cheias. Então:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} = \frac{\frac{Q}{A}}{\sqrt{g \cdot h}} = \frac{\frac{5}{1,3 \cdot 2}}{\sqrt{9,8 \cdot 1,3}} = 0,53$$

Quando Fr < 1, o escoamento é considerado fluvial. Portanto, a partir do número de Fr verificado pela seção, o escoamento é dado pelo regime fluvial. Mesmo assim, o canal necessita de ajustes de altura.

A proposta de projeto determina seção circular e enterrada. Para tanto, utilizamos as equações para canais circulares. Através do coeficiente de forma, podemos dimensionar o canal novo mais facilmente.

$$D = \frac{M}{K_2}$$

$$M = \left(\frac{n \cdot Q}{\sqrt{L}}\right)^{\frac{3}{8}} = \left(\frac{0,014 \cdot 5}{\sqrt{0.0005}}\right)^{\frac{3}{8}} = 1,53$$

Considerando $K_2 = 0,608$ e consultando a Tabela 3.4 (coeficientes de forma para canais circulares), teremos:

$$D = \frac{M}{K_2} = \frac{0,608}{1,53} = 0,397m \cong 0,400m$$

Portanto, podemos utilizar um diâmetro de 400 mm para esse canal. Consultando a Tabela 3.5 de seções ótimas, teremos para seções de máxima vazão:

$$h = 0.94D = 0.94 \cdot 0.400 = 0.376m$$

Verificando o número de Froude para essa seção:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} = \frac{\frac{Q}{A}}{\frac{A}{\sqrt{g \cdot h}}} = \frac{\frac{5}{\pi \cdot 0,400^2}}{\frac{4}{\sqrt{9,8 \cdot 0,376}}} = 20,73$$

Quando Fr > 1, o escoamento é considerado torrencial. Portanto, a partir do número de Fr verificado pela seção, o escoamento é dado pelo regime torrencial.

Analisando a proposta de modificação do canal, verificamos que, para termos um regime não torrencial, devemos dimensionar a seção com diâmetro acima de 0,4 m, para que este não sofra com escoamentos torrenciais, prejudicando seu escoamento. Medidas preventivas de redução da velocidade são aconselhadas, como uma redução da declividade.

Já o canal preexistente tem problemas com a profundidade da linha d'água, sendo que esta ultrapassa a altura das paredes de borda, gerando inundações, porém, não sofre com escoamento torrencial. Logo, uma solução interessante seria reformar o antigo canal, mantendo as outras características e aumentando a altura de suas bordas.

Avançando na prática

Canal de drenagem urbana

Descrição da situação-problema

Imagine, agora, que você tem em mãos um projeto de drenagem urbana, cujo dimensionamento da galeria de drenagem de seção circular prevê ressalto hidráulico (Fr > 1). Calcule a altura final (h_2) e redimensione o canal, para que o ressalto não mais ocorra. Dados: a altura da lâmina d'água é h=0.94D, a vazão é de 4 m^3 / s, o diâmetro é 0,400 m e a declividade é 0,0005 m/m.

Resolução da situação-problema

Primeiramente, devemos verificar o número de Froude, a fim de confirmar se o regime é torrencial:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} = \frac{\frac{Q}{A}}{\sqrt{g \cdot h}} = \frac{\frac{4}{\pi \cdot 0,400^2}}{\sqrt{9,8 \cdot (0,94 \cdot 0,400)}} = 16,58$$

Como Fr > 1, o escoamento é torrencial.

$$h_2 = -\frac{h_1}{2} + \sqrt{\frac{2 \cdot V_1^2 \cdot h_1}{g} + \frac{h_1^2}{4}} = -\frac{(0.94 \cdot 0.400)}{2} + \sqrt{\frac{2 \cdot \left(\frac{4}{\pi \cdot 0.400^2}\right)^2 \cdot (0.94 \cdot 0.400)}{9.8} + \frac{(0.94 \cdot 0.400)^2}{4}} = h_2 = 8,63m$$

Para que o canal fique protegido de inundações causadas pelo aumento da profundidade do canal devido ao ressalto, esse deveria ter altura de paredes de borda maior do que 8,63 m.

Verificaremos, então, qual o diâmetro da seção do canal que evitaria regime torrencial neste.

$$\frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} = \frac{\frac{Q}{A}}{\sqrt{g \cdot h}} = \frac{\frac{4}{\pi \cdot D^2}}{\sqrt{9, 8 \cdot (0, 94 \cdot D)}} < 1$$

$$D > 1.23m$$

Então, considerando o diâmetro de 1,23 m como um canal de diâmetro comercial de 1,5 e utilizando a fórmula de Froude, chegamos à conclusão de que esse canal terá regime fluvial.

Concluindo, para um canal de seção circular com diâmetro de 1,5 m, declividade de 0,0005 m/m, vazão de cheia igual a 4 m^3 / s, não teremos ressalto hidráulico.

Faça valer a pena

1. Um ressalto hidráulico caracteriza-se por uma transição de escoamento em regime torrencial (rápido) para escoamento em regime fluvial (lento). Essa mudança de regime conduz a uma perda considerada de energia gerada pela região de turbulência. É possível medir por fórmulas matemáticas a altura do ressalto e onde este ocorrerá.

Em um canal de seção retangular, com 3 m de largura e com $10m^3/s$ de vazão, temos a formação de um ressalto hidráulico. Conhecendo-se a profundidade a montante ($h_1 = 0.90m$), determine a altura do ressalto ($h_2 - h_1$). Assinale a resposta correta.

- a) 0,47 m.
- b) 1,20 m.
- c) 3,45 m.
- d) 1,70 m.
- e) 0,90 m.

2. Canais em aço semicirculares ou circulares são pouco utilizados como galerias pluviais em vias públicas. No entanto, são vastamente utilizados como calhas, em instalações prediais de águas pluviais.

Determine a profundidade da lâmina d'água em uma galeria de águas pluviais feita com calha metálica (n=0,012) circular de diâmetro igual a 0,5 m, declividade do fundo lo = 0.0005m / m e vazão Q=0.046 m^3/s . Assinale a resposta correta.

- a) 0.10 m.
- b) 0.70 m.
- c) 0.25 m.
- d) 0.15 m.
- e) 0.20 m.
- 3. A irrigação tem importante papel na agropecuária, pois garante a atividade agrícola, a sustentabilidade econômica e minimiza o risco tecnológico representado pela escassez de água.

Dimensione um canal de irrigação em terra com fundo de pedra e talude empedrado (n=0.030), para transportar uma vazão de 1,5 m^3 / s, com declividade de fundo $l_a = 0,0005m / m$, sabendo-se que a inclinação do talude obrigatoriamente deve ser 3,5:1. Para o dimensionamento, admita que o canal terá seção ótima, ou seja, será uma seção de mínimo período molhado. Assinale a resposta correta.

- a) h = 1.2m e b = 0.21m.
- b) h = 0.75m e b = 2.8m.
- c) h = 2.75m e b = 5.32m.
- d) h = 0.75m e b = 0.21m.
- e) h = 0.90m e b = 0.50m.

Referências

AZEVEDO NETTO, J. M., ALVAREZ, G. A. **Manual de hidráulica**. 7. ed. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda, 1982.

HENN, É. A. L. **Máquinas de fluído**. 2. ed. Santa Maria: Ed. da UFSM, 2006.

LENCASTRE, A. C. Manual de hidráulica geral. São Paulo: E. Blucher, 1972. 411 p.

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

Hidrometria e barragens

Convite ao estudo

Caro aluno, nesta unidade de ensino, estudaremos os conceitos de condutividade hidráulica do solo que estão envolvidos no estudo geotécnico, que abrange o estudo de mecânica dos solos e de mecânica das rochas. A primeira equação utilizada para quantificar o movimento da água no solo foi introduzida por Henry Darcy, que estudou a quantidade de água que passa por um meio poroso saturado, determinando a condutividade hidráulica. Atualmente, a condutividade hidráulica do solo saturado descreve a funcionalidade de seu sistema poroso, podendo-se dizer que a condutividade hidráulica depende da estrutura do solo e não de sua textura. A permeabilidade influencia a taxa de recalque de um solo saturado quando sob carga. No caso de barragens de terra, o dimensionamento está condicionado à permeabilidade dos solos usados. A estabilidade dos taludes e estruturas de retenção podem ser severamente afetadas pela permeabilidade dos solos envolvidos. Filtros construídos com solos são dimensionados com base na permeabilidade.

O estudo do movimento da água no solo é, também, de extrema importância para a geotecnia. O caminho que a água faz ao longo de um maciço terroso é estudado por meio do desenho de redes de fluxo. As redes de fluxo permitem determinar facilmente uma vazão percolada mediante um maciço terroso, permitindo, assim, calcular a pressão da água nos poros (pressão neutra) e, por conseguinte, a tensão efetiva em cada ponto do maciço. Por meio deste, portanto, é possível avaliar o risco de ocorrência de acidentes, como a ruptura por liquefação, a ruptura por piping (erosão interna) e a ruptura por levantamento hidráulico, tipos comuns de rupturas de barragens.

A competência técnica dessa unidade é conhecer e ser

capaz de aplicar conceitos de fundamentos de hidráulica, a fim de planejar, projetar, executar e realizar a gestão de barragens de terra e taludes no que diz respeito ao movimento da água em maciços de terra em geral. Quando não obedecidas as etapas, o maciço da barragem pode vir a romper, causando danos ambientais e danos para a população.

O contexto de aprendizagem utilizado como situação da realidade profissional (SR) proposta nesta unidade é focado nas necessidades de uma construtora de barragens de terra para reservatórios de usina hidrelétricas e reservatórios de água para abastecimento rural e criação de peixes.

Para atingir os objetivos desta unidade, você deve estar apto a: reconhecer o coeficiente de permeabilidade de um solo e sua interferência na taxa de recalque de um solo saturado quando sob carga; calcular as tensões no solo com efeito de percolação de água; determinar o tipo de fluxo de água no maciço, as linhas de fluxo da percolação da água e o gradiente hidráulico desse movimento e conhecer os tipos de barragens de solo existentes e o melhor uso para cada um no que diz respeito à sua permeabilidade e risco de ruptura por água no solo.

Para isso, serão tratadas nas seções desta unidade: conceitos fundamentais de permeabilidade e percolação, tensões no solo submetido à percolação, fenômeno de areia movediça, *piping* e capilaridade, filtros de proteção para evitar tais fenômenos, equação geral do fluxo da água no solo, tipos de barragens e tipos de rede de fluxo.

Está preparado para o desafio? Mãos à obra!

Seção 4.1

Estudo da água nos solos

Diálogo aberto

A permeabilidade é fundamental para avaliar a percolação subterrânea, sendo, portanto, essencial para resolver problemas referentes ao bombeamento de água subterrânea, aplicados, por exemplo, em fundações de edificações. É essencial também para analisar a estabilidade de muros de arrimo, barragens de terra, taludes, entre outras estruturas sujeitas à força de percolação, que modifica o comportamento do solo, reduzindo sua capacidade de resistir às cargas aplicadas sobre ele. Um dos exemplos atuais da importância do assunto foi a ruptura da barragem de terra de Fundão, em Minas Gerais, que sofreu o rompimento devido ao nível d'água acumulada na barragem, que causou saturação completa do solo da barragem e a sua liquefação.

No contexto de aprendizagem desta seção, o setor de energia elétrica do estado contratou uma empresa especializada em barragens de terra para construir a barragem que comporá o reservatório da usina hidrelétrica a ser construída, chamada UHE Cachos.

Na situação-problema desta seção, você é o responsável técnico da empresa especializada em barragens, que analisará o solo que comporá a barragem de terra da Usina Hidrelétrica de Cachos, que prevê uma barragem de terra em sua construção. Como responsável técnico, você pede a um laboratório de solos que faça o ensaio de permeabilidade para o solo que ele encontrou mais próximo do local onde a barragem de terra será construída. O laboratório envia um relatório com o resultado do ensaio de permeabilidade e, a partir deste, você deverá analisar as informações importantes para a construção da barragem de terra com esse determinado tipo de solo examinado.

Para tal, você deve conhecer e compreender a Lei de Darcy, a Lei de Bernoulli, saber como foi determinado o coeficiente de permeabilidade da SP e por que o tipo de ensaio foi escolhido, quais fatores influenciam na permeabilidade do solo e compreender o fluxo através do solo.

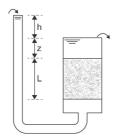
Bons estudos!

Não pode faltar

Lei de Darcy

Denomina-se permeabilidade a propriedade dos solos que indica a maior ou a menor facilidade que os solos oferecem à passagem da água através dos seus vazios. Observe na Figura 4.1 um permeâmetro, que é um instrumento utilizado para medição da permeabilidade de uma faixa de altura L de algum material, por exemplo, areia.

Figura 4.1 | Permeâmetro



Fonte: Pinto (2002, p. 131).

Darcy, em 1850, verificou que a altura da lâmina d'água h, a área transversal do permeâmetro \boldsymbol{A} e o comprimento L da região de areia influenciavam na vazão do permeâmetro.



Assista ao ensaio de permeabilidade em argilas, que é importante para a construção de aterros e barragens de terra. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=xW78H97cbpM e https://www.youtube.com/watch?v=-mdweJo8sC8>. Acesso em: 29 ago. 2017.

A vazão é dada pela equação:

$$Q = k \cdot \frac{h}{L} \cdot A$$

Sendo k uma constante que varia para cada solo e que recebe o nome de coeficiente de permeabilidade. A relação h por L é chamada de gradiente hidráulico, expresso pela letra \boldsymbol{i} , portanto:

$$Q = k \cdot i \cdot A$$

Sabendo que vazão é uma relação de velocidade da água pela área em que esta passa, podemos escrever:

$$V = k \cdot i$$

O coeficiente de permeabilidade k, da fórmula apresentada anteriormente, indica a velocidade de percolação da água quando o gradiente é unitário.

Lei de Bernoulli

Sempre que há diferença de cargas totais entre dois elementos de um solo praticamente saturado, há um fluxo de água do ponto de maior carga para o de menor carga. A carga total disponível é dada pela Lei de Bernoulli, que corresponde à soma das cargas piezométricas, cinéticas e altimétricas:

$$h_{total} = \frac{P}{\gamma_w} + \frac{U^2}{2g} + z$$

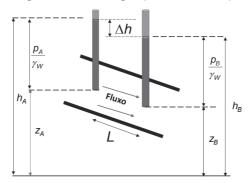
Em que h é a carga hidráulica total, P a pressão, γ_w o peso específico da água, $\frac{P}{\gamma_w}$ a carga piezométrica, U a velocidade do fluxo, g a aceleração da gravidade, $\frac{U^2}{2g}$ a carga cinética e z a carga altimétrica.

Como a velocidade de percolação da água no solo é muito pequena, é valido admitir que a carga cinética $\frac{U^2}{2g}$ é nula, simplificando, assim, a equação de Bernoulli, que fica:

$$h_{total} = \frac{P}{\gamma_w} + z$$

Observando a Figura 4.2, é possível identificar qual a relação dos parâmetros da fórmula abordada com o fluxo.

Figura 4.2 | Perda de carga em um fluxo de água que escoa entre as partículas de solo



Fonte: elaborada pela autora

O gradiente hidráulico, que é a perda de carga entre dois pontos separados por uma distância \boldsymbol{L} , pode ser escrito pela razão entre o $\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{h}$ e \boldsymbol{L} :

 $i = \frac{\Delta h}{L}$

Determinação do coeficiente de permeabilidade dos solos

A permeabilidade da água no solo é determinada pelo ensaio de permeabilidade feito em laboratório com utilização de um permeâmetro. Os permeâmetros podem ser de dois tipos: de carga constante e de carga variável.

Nos ensaios, utilizando o permeâmetro de carga constante, é fornecida uma vazão constante do fluido, no caso, a água, que flui através de uma amostra de solo. O volume (V) do reservatório é conhecido e, portanto, é medido o tempo t que a água leva para preenchê-lo, de tal forma que:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Como a vazão é constante através da amostra de solo, pela Lei de Darcy, temos:

$$Q = k \cdot \frac{h}{L} \cdot A$$

A carga h é mantida constante durante todo o ensaio. Relacionando as duas equações, temos:

$$\frac{V}{t} = k \cdot \frac{h}{L} \cdot A$$

Derivando k em evidência, o coeficiente de permeabilidade é obtido por meio da equação:

$$k = \frac{V \cdot L}{A \cdot h \cdot t}$$

Nos solos pouco permeáveis (ou muito impermeáveis), o volume V de água que passa pela amostra é muito pequeno, mesmo para grandes intervalos de tempo t. Diante disso, o permeâmetro de carga constante só é empregado para solos mais permeáveis (areias e pedregulhos).

Costumeiramente, a unidade da constante k é referida em metros por segundo ou centímetros por segundo e, como para solos seu valor é muito baixo, é expresso por potências de 10, como os exemplos da Tabela 4.1.

Tabela 4.1 | Coeficientes de permeabilidade com relação ao tipo de solo

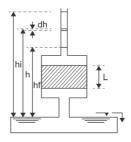
Tipos de solo	K (cm/segundo)		
Pedregulho	>1		
Areias puras	1 a 10 ⁻³		
Areias finas siltosas e argilosas, siltes argilosos	10⁻³ a 10⁻⁻		
Argila	<10-8		

Fonte: Mello; Teixeira (1971, p. 64).

Para efeito de comparação, um concreto sem bolhas ou fissuras tem coeficiente de permeabilidade da ordem de $10^{-12} \, cm \, l$ segundo, não diferindo muito de uma argila.

Já nos ensaios, utilizando o permeâmetro de carga variável, representado na Figura 4.3, observa-se a velocidade de queda d'água em um tubo de vidro de área transversal \boldsymbol{a} . São conhecidas as alturas \boldsymbol{L} do corpo de prova e a área transversal \boldsymbol{A} .

Figura 4.3 | Esquema de permeâmetro de carga variável



Fonte: Pinto (2002, p. 127).

A velocidade de descida d'água no tubo é -dh / dt, tendo o sinal negativo devido h diminuir com o tempo t. A vazão da água no tubo é, portanto, uma relação dh/dt multiplicada pela área da seção transversal do tubo por onde a água é introduzida no permeâmetro.

Substituindo essa relação na fórmula de Darcy, teremos:

$$-a \cdot \frac{dh}{dt} = k \cdot \frac{A}{L} \cdot dt$$

Integrando entre os limites (hi, hf) e (ti,tf), temos:

$$-a\int_{hi}^{hf}\frac{dh}{dt}=k\cdot\frac{A}{L}\int_{ti}^{tf}dt$$

Resolvendo a equação e deixando em função de k, teremos:

$$k = 2, 3 \cdot \frac{a \cdot L}{A \cdot \Delta t} \cdot \log \frac{hi}{hf}$$

Logo, o coeficiente de permeabilidade pode ser determinado experimentalmente utilizando essa equação.



Permeabilidade é a capacidade que um solo tem de permitir o escoamento de água através de seus vazios, sendo a grandeza da permeabilidade expressa pelo coeficiente de permeabilidade do solo, k.

Alguns fatores influenciam a permeabilidade dos solos, como o tamanho dos grãos, como representado na Figura 4.4.

Figura 4.4 | Comparação entre a disposição dos grãos grandes do solo arenoso em relação à disposição dos grãos pequenos do solo argiloso, gerando poros grandes e pequenos, respectivamente



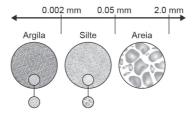
Fonte: adaptada de https://goo.gl/images/3fvgNq. Acesso em: 21 ago. 2017.

Imagine que o solo funcione com uma piscina de bolinhas: caso as bolinhas tenham maior diâmetro, haverá mais espaço vazio entre elas, permitindo a passagem da água mais facilmente; caso o diâmetro das bolinhas seja bem pequeno, a água terá dificuldade em passar pelos vazios. Tal conclusão foi obtida experimentalmente por Hazen, que, enquanto determinava a permeabilidade de areias, chegou à seguinte equação:

 $k \approx 100 \cdot D_e^2$

Em que k é dado em cm por segundo e diâmetro efetivo da areia (D_a) é dado em cm.

Figura 4.5 | Diâmetros das partículas de solo



Fonte: adaptada de http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0032_hidrologia/ch08s06.html. Acesso em: 21 ago. 2017.

A equação de Hazen é muito útil para estabelecer estimativas grosseiras de permeabilidade das areias.

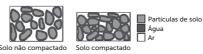
Também é possível relacionar que o coeficiente de permeabilidade das areias varia linearmente com o índice de vazios (e) do solo, pela equação:

$$k = f(\log e)$$

A temperatura e a viscosidade da água também influenciam a permeabilidade de um solo de tal forma que a permeabilidade é proporcional à densidade do fluido (água) e inversamente proporcional à sua viscosidade. Por sua vez, esses parâmetros variam com a temperatura, sendo que a densidade da água varia muito quando comparada com as variações da viscosidade para os mesmos intervalos de temperatura. Entretanto, quando se considera a densidade da água constante, a permeabilidade aumenta com a temperatura.

A disposição das partículas que formam a estrutura de um solo também tem influência sensível na permeabilidade dos solos. Por exemplo, em solos compactados, a permeabilidade horizontal é maior do que a vertical, característica que ocorre pela forma com que os solos são compactados, sempre no sentido vertical, como podese observar na Figura 4.6.

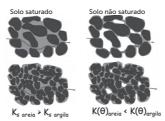
Figura 4.6 | Solo compactado e não compactado



Fonte: adaptada de http://slideplayer.com.br/slide/1860308/>. Acesso em: 21 ago. 2017.

O grau de saturação dos solos, ou seja, a presença de ar nos seus vazios, tem influência marcante na permeabilidade.

Figura 4.7 | Diferença entre o solo saturado e não saturado quanto à permeabilidade



Fonte: adaptada de http://www.dpi.inpe.br/~camilo/prochidr/pdf/04infiltracao_aguanosolo_2.pdf. Acesso em: 21 ago. 2017.

Analisando a Figura 4.7, verifica-se que a presença de ar, mesmo em pequenas quantidades, dificulta a passagem da água pelos poros, resultando, então, em maiores permeabilidades à medida que os solos tendem a tornarem-se saturados. A argila apresenta maior permeabilidade para casos não saturados.



Reduzir o coeficiente de permeabilidade k permite a passagem de água sem que o macico se rompa?

Fluxo através das camadas de solo

A tensão total nos solos é dada pela soma das tensões piezométricas e altimétricas. A percolação da água através do solo faz com que a carga total reduza, pois é transferida aos grãos por atrito viscoso, de forma que onde existe fluxo d'água, desenvolve-se a pressão efetiva, chamada pressão de percolação, que tem o sentido do fluxo da água e que deverá ser somada vetorialmente à pressão efetiva devido ao peso de solo, a fim de se obter a resultante das pressões efetivas sobre o elemento do solo considerado e da qual depende seu comportamento.

A força de percolação em um elemento de solo de área A, em que

a perda de carga é u, será:

$$F_p = u \cdot A = \gamma_A \cdot H \cdot A$$

Que é aplicada uniformemente em um volume (L vezes A) de solo isotrópico. A força por unidade de volume do solo será:

$$F_p = \frac{\gamma_A \cdot H \cdot A}{L \cdot A} = \frac{H}{L} \cdot \gamma_A = i \cdot \gamma_A$$

Sempre há movimento de água através de um solo, seja ele areia ou argila, haverá uma força de percolação aplicada no maciço terroso.

As forças de percolação são as responsáveis pela instabilidade de maciços terrosos, tais como cortes, taludes de aterros e de barragens de terra. O sentido dessas forças, em muitos casos, é o mesmo sentido do movimento de escorregamento do maciço que pode causar sua ruptura.

A importância do estudo do movimento da água no solo e como se calcula, mediante experiências feitas com permeâmetros, é clara quando se discute estabilidade de solos, pois é o principal causador de rupturas em maciços terrosos, fato que não é raro em barragens de terra.

Relacionando com as pressões neutras, é interessante lembrar que a água no solo (solos saturados) tem relação com as tensões totais de um solo por meio da pressão neutra, interferindo, assim, na sua capacidade de suporte.

Sem medo de errar

Retomando o contexto de aprendizagem, você, aluno, é o responsável técnico por uma barragem de terra de uma usina hidrelétrica e precisa analisar o solo que será utilizado para construir o maciço terroso e barrar a água do reservatório da usina hidrelétrica.

Para isso, você, como responsável técnico nessa situação, deverá conhecer e compreender a Lei de Darcy e a Lei de Bernoulli para água nos solos, deverá saber como foi obtida a permeabilidade do solo fornecida no relatório e saber sobre a teoria da percolação da água no solo.

Conhecendo a Lei de Darcy, a permeabilidade define qual a vazão e a velocidade da água que passará pelo maciço dessa barragem, mas, antes, vamos analisar o tipo de ensaio e qual resultado foi obtido.

Figura 4.8 | Ensaio de permeabilidade com resultados importantes para o estudo da água no solo destacado

			Ensa	io de Permeabilidade	Carga Variável		
Nº dias	hi - hf (cm)	k20°c (cm/s)	Tempo (dias)	Local	UHE Cachos	Cota	351,100 (1000)
1	22,7	1,83E-07	1,1	Estaca	39 + 19,00m	Sentido	Horizontal (KHB)
6	33,2	7,34E-08	6,1	Afastamento	8,50 m montante	Horizontal	Base
7	10,6	9,95E-08	7,1	Cilindro	2	Área da bureta (a)	0,88 cm ²
8	10	9,98E-08	8,1	Bureta	2	Área do cilindro (A)	64,33cm ²
11	9,7	3,26E-08	11,1	Peso	1434,6g	g h	2,144g/cm ⁴
13	26,8	1,36E-07	13,1	Diâmetro (D)	9,05	gs	1,839g/cm ³
15	18,6	9,30E-08	15,1	Altura (L)	10,4	e	0,544
18	18,6	6,17E-08	18,1	Umidade inicial	16,60%	G.C.	101,10%
19	8,8	9,32E-08	19,1	Umidade final	16,60%	Dh	0,20%
20	12,2	9,78E-08	20,1	d	2,84	Grau de Sat. in.	86,60%
21	14,9	1,90E-07	21,1	Dens idade máxima	1,820g/cm²	Grau de Sat. fin.	86,60%
22	10,7	9,63E-08	22.1	Umidade ótima	16,40%	hi	158,0cm
25	26,2	9,46E-08	25,1	a = Área da bureta (cm²)		
28	10,2	1,00E-07	26.1	L = Altura do CP (cm)			
/27	11,1	9,76E-08	27.1	A = Área do cil. (cm²)			
28	10,7	9,53E-08	28,1	ti = Tempo inicial (s)			
29	9,3	9,49E-08	29,1	tf = Tempo final (s)			
32	27,1	9,33E-08	32,1	(hi - hf) = Leitura (cm)			
33	10,2	9,59E-08	33,1				
34	10,6	9,53E-08	34,1				
35	9,6	3.73E-08	35.1				
36	9,9	9.56E-08	36.1	l			
40	35,8	9,33E-08	40,1	$k = \frac{2.3 \cdot a \cdot L}{A \cdot (ti - tf)} \cdot \log \frac{hi}{hi - (hi - hf)}$			
41	9,8	9,87E-08	41,1				
43	19,1	9,37E-08	43,1		,	,	
46	28,1	1,00E-07	46,1				
48	20,2	9,78E-08	48,1				
50	20,1	1,00E-07	50,1	(K 20 °c) =9,54E-08 cm/s			
53	28,8	9,65E-08	53,1				
54	10,8	1,04E-07	54,1				
55	10,6	1.02E-07	55.1				

Fonte: arquivo pessoal da autora.

Notamos que o ensaio realizado foi o de Permeabilidade com Carga Variável, pois esse tipo de ensaio é indicado para solos finos argilosos, que demandam maior tempo de ensaio, pois têm coeficiente de permeabilidade menor, conforme Tabela 4.1.

Observa-se que Δh do ensaio se manteve estável no intervalo de dias de 26 a 29, resultando em um valor médio de 10.32 cm.

Retomando a Lei de Darcy, pode-se calcular a vazão que passa por esse permeâmetro de carga variável do ensaio:

$$k = \frac{2, 3 \cdot a \cdot L}{A \cdot (ti - tf)} \cdot \log \frac{hi}{hi - (hi - hf)}$$

Analisando o resultado obtido, nota-se que o solo tem permeabilidade $k=9,54\cdot10^{-8}\,cm\,l\,s$, classificado, assim, como uma argila, o que comprova que o tipo de ensaio escolhido (permeâmetro de carga variável) é fidedigno.

Contemplando pelo lado construtivo, o solo está apto ao emprego na barragem de solo do reservatório, pois tem baixa permeabilidade, evitando rupturas geradas pelo movimento da água no solo.

É importante verificar também que a permeabilidade medida é para direção horizontal do fluxo de água, sendo necessário o ensaio do mesmo solo para a direção vertical, pois a água no solo tende a percorrer os dois sentidos.

Concluindo, o ensaio de permeabilidade do solo que será utilizado

na construção da barragem de terra é obrigatório, pois um solo argiloso saturado pode levar a estrutura à ruptura por percolação de água. Um solo argiloso, bem como o arenoso em menor grau, precisa ter sua permeabilidade e, por conseguinte, a percolação controlada durante toda vida útil. Para tal, são utilizados piezômetros, que medem o nível d'água no ponto onde são instalados.

Avançando na prática

Estudo de uma barragem para piscicultura Descrição da situação-problema

Os piezômetros de uma barragem de terra, utilizada para retenção de água com a finalidade de criação de alevinos na fazenda Novo Cardume, acusam que a força de percolação está em um nível preocupante no solo. Você foi contratado para resolver esse problema por meio do estudo dos fatores que influenciaram essa demasiada permeabilidade dos solos. Como responsável técnico, você precisará retomar o contexto de aprendizagem e escolher a melhor solução econômica e tecnicamente viável.

Resolução da situação-problema

Uma possibilidade de solução seria utilizando um dos fatores principais que influenciam a permeabilidade, como a influência do tamanho dos grãos. Para o maciço terroso da barragem já construída, a alteração do tipo de solo se torna inviável devido ao custo da obra de remoção do material atual para colocação de um material novo menos permeável.

Se pensarmos em uma solução utilizando a influência da temperatura e da viscosidade da água para reduzirmos a percolação da água através do maciço da barragem, deveríamos reduzir a temperatura, uma vez que a permeabilidade aumenta com a temperatura.

Já uma solução utilizando a influência do índice de vazios poderia ser executada por meio da compactação do solo, visto que experimentalmente foi verificado que quanto menor o índice de vazios do solo, menor será a sua permeabilidade. A disposição das partículas que formam a estrutura de um solo tem influência na permeabilidade dos solos, então verificou-se que um solo in

natura ou estratificado tem maior permeabilidade em relação ao solo compactado.

A presença de ar nos vazios de um solo dificulta a passagem da água pelos poros, resultando, então, em maiores permeabilidades à medida que os solos tendem a tornar-se saturados. Como a barragem não poderá trabalhar de outra forma a não ser saturada, essa não é uma solução possível.

Concluindo, a solução possível e viável é a recompactação do maciço, de forma a reduzir o seu índice de vazios, o que vai reduzir a permeabilidade e evitar problemas por percolação da água pela barragem de terra.

Faça valer a pena

- **1.** Sobre a permeabilidade do solo, podemos afirmar que:
- I A permeabilidade pode influenciar a taxa de recalque de um solo saturado quando sob carga.
- II A estabilidade dos taludes e estruturas de retenção podem ser severamente afetadas pela permeabilidade de solos envolvidos.
- III A avaliação da percolação subterrânea é dispensável no projeto de fundações de obras, visto que a água no solo não altera em nada as condições de sustentação do solo.

Assinale a alternativa que cita apenas as sentenças corretas:

- a) Apenas a sentença I está correta.
- b) As sentenças II e III estão corretas.
- c) Apenas a sentença III está correta.
- d) As sentenças I e II estão corretas.
- e) Apenas a sentença II está correta.
- **2.** O coeficiente k é uma constante que varia para cada tipo de solo e recebe o nome de coeficiente de permeabilidade. Observe os dados relacionados na tabela a seguir:

Solo	K (cm/seg)		
Argilas	< 10 ⁻⁷		
Siltes	10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁷		
Areias argilosas	10 ⁻⁵		
Areias finas	10:3		
Areias médias	10 ⁻²		
Areias grossas	10-1		

Fonte: adaptada de Pinto (2002).

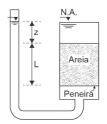
Analisando a tabela com a Lei de Darcy, seguem as afirmativas:

- I Uma argila pode ter coeficiente de permeabilidade próximo ao de um concreto bem compacto.
- II Quanto maior o valor de k menor a vazão.
- III K e a Área são diretamente proporcionais.

Assinale a alternativa que julga as afirmativas de maneira correta:

- a) Apenas a afirmativa I está correta.
- b) Apenas as afirmativas II e III estão corretas.
- c) Apenas a afirmativa III está correta.
- d) Apenas as afirmativas I e II estão corretas.
- e) Apenas a afirmativa II está correta.
- **3.** Para que haja fluxo de água passando por um determinado solo, há necessidade de uma diferença de potencial entre a montante e a jusante do fluxo e, portanto, uma determinada vazão passando pelo sistema. Observando o nível d'água no permeâmetro representado na figura a seguir:

Permeâmetro



Fonte: adaptada de Pinto (2002).

A partir da análise da figura, pode-se afirmar que:

- a) Não há fluxo, pois na bureta que alimenta o permeâmetro, a água está na mesma cota (N.A.).
- b) Até a cota Z há apenas tensão efetiva.
- c) Até a cota Z a pressão neutra é desconsiderada.
- d) Há fluxo, pois na bureta que alimenta o permeâmetro, a água está na mesma cota (N.A.).
- e) Não há fluxo, pois na bureta que alimenta o permeâmetro, a água não está na mesma cota (N.A.).

Seção 4.2

Forças de percolação

Diálogo aberto

Na presente unidade de ensino, daremos ênfase ao estudo das tensões do solo, que podem ocorrer devido ao próprio peso, caso este que encontramos em grandes obras de compactação de aterros, no qual os grãos de solo estão em contato entre si e sob pressão. As tensões podem também ser de natureza neutra, devido a pressões de alívio, quando o solo está com água, e tensões efetivas, que seriam a soma das duas anteriores.

O estudo da mecânica dos solos e geotecnia dá ferramentas para o dimensionamento de grandes obras em terra, como barragens e aterros. Com tais ferramentas também é possível adotar medidas de prevenção contra o *piping* e areia movediça, fenômenos decorrentes da água no solo, que interferem na sua capacidade de suporte.

As tensões no solo dizem respeito às tensões verticais totais, devido ao contato dos grãos entre si e sob tensão. As tensões efetivas tratam das tensões verticais apenas do solo seco e pressões neutras, estas devido à presença de água no solo, que deve ser tratada com atenção, pois pode causar a instabilidade de taludes e estruturas de retenção. Filtros são construídos, portanto, com base nessa permeabilidade.

No contexto de aprendizagem desta seção, uma empresa especializada em barragens necessita construir um reservatório de água para uma determinada cidade.

Na situação-problema (SP) desta seção, você é o projetista da empresa especializada em barragens e foi convocado a realizar o estudo de um projeto a ser executado em uma cidade que necessita de um reservatório para reter o volume do riacho da cidade para abastecimento urbano. A barragem deverá ser executada em estacaprancha e você precisará prever o fenômeno da areia movediça a jusante da barragem, analisando a capilaridade e calculando as tensões que ocorrerão no maciço arenoso que suporta a barragem e o reservatório.

Para tal, você se baseará em conceitos de mecânica dos solos para calcular as tensões no solo sujeito à percolação, prever o fenômeno

de areia movediça, assim como analisar o fenômeno de *piping* e a capilaridade de solos e conhecer a solução para tais fenômenos: os filtros de proteção.

Preparado para esse desafio de grandes dimensões? Vamos lá!

Não pode faltar

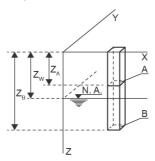
Tensões no solo submetido à percolação

No estudo da mecânica dos solos, a tensão vertical devido ao peso próprio de um maciço terroso é dada pela equação:

$$\sigma = \gamma_n \cdot Z$$

Em que σ é a tensão vertical devido ao peso próprio do solo, γ_n é o peso específico do solo e Z é a altura em metros de solo acima da superfície de contato considerada. Para que essa equação seja válida, a superfície de contato considerada precisa estar acima do nível d'água (N.A.) conforme o plano A, mostrado na Figura 4.9, ou seja, o solo precisa estar seco.

Figura 4.9 | Tensões em um plano horizontal



Fonte: Pinto (2002, p. 85).

Tem-se que o solo é composto por três fases: água, partículas sólidas e ar. Quando as tensões normais se desenvolvem, estando o solo saturado, parte dessa tensão será suportada pelo esqueleto sólido do solo (partículas) e parte será suportada pela água presente nos vazios. A pressão que atua na água que está entre os grãos de solo é denominada pressão neutra, que é representada pela letra \boldsymbol{u} . A pressão que atua nos contatos entre partículas é chamada de tensão efetiva, representada pela letra grega $\boldsymbol{\sigma}'$.

Terzaghi (1943) postulou que a tensão normal total em um plano

qualquer deve ser a soma da parcela de pressão neutra e de tensão efetiva:

$$\sigma = \sigma' + u$$

O plano B da Figura 4.9 está abaixo do nível d'água (\mathbf{z}_{w}), em uma altura (\mathbf{z}_{B}), portanto, está saturado. Para esse caso, a tensão total no plano B será a soma das tensões das camadas superiores, porém, com um alívio devido à água presente no solo, sendo que esse alívio é causado pela pressão neutra \mathbf{u} . Assim, a equação da pressão neutra é dada por:

$$u = (Z_B - Z_W) \cdot \gamma_W$$

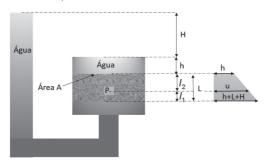
Sendo $\gamma_{\it W}$ o peso específico da água e $\it u$ a pressão da água ou pressão neutra.

Os mesmos efeitos de alívio da tensão efetiva e aumento da tensão total, causados pela pressão neutra, também ocorrem com solos que sofrem percolação, como maciços de barragens.

Fenômeno de areia movediça

Para compreender o fenômeno da areia movediça, vamos considerar o permeâmetro esquematizado na Figura 4.10, em que uma porção de areia, que será o maciço arenoso estudado, está submetida à percolação ascensional de água, ou seja, há passagem de água do ponto mais alto para o mais baixo do permeâmetro, provocando uma perda de carga H.

Figura 4.10 | Permeâmetro padrão



Fonte: adaptada de Mello; Teixeira (1971, p. 71).

O gradiente hidráulico do fluxo será, portanto:

$$i = \frac{H}{L}$$

O equilíbrio do ponto P pode ser analisado da seguinte forma: a tensão total em P será:

$$\sigma_P = h \cdot \gamma_W + (L - I_1) \cdot \gamma_W$$

E a pressão neutra em P, dada pela letra $oldsymbol{u}$ será:

$$u = \left[h + L + H - \frac{I_1}{H} \cdot (L + H)\right] \cdot \gamma_W$$

Tensão efetiva em P, conhecida por σ ', será:

$$\sigma' = \sigma - u$$

Substituindo as equações de pressão neutra e de tensão total na equação da tensão efetiva, teremos a seguinte equação, em que γ_{sat} é o peso específico do solo saturado:

$$\sigma' = (L - I_1) \cdot (\gamma_{sat} - \gamma_W) - \frac{H}{L} \cdot (L - I_1) \cdot \gamma_W$$

Quando a pressão neutra no ponto P se iguala à pressão total, ocorrerá o fenômeno chamado de areia movediça, pois a tensão efetiva passa a ser nula. Essa condição é obtida por meio do ensaio promovido pelo permeâmetro, aumentando-se a carga \boldsymbol{H} até se alcançar um valor crítico $\boldsymbol{H_c}$. O gradiente hidráulico nesse instante é denominado de gradiente crítico:

$$i_c = \frac{H_c}{L}$$

E pode ser calculado pela equação da tensão efetiva igualada a zero:

 $\sigma' = (L - I_1) \cdot (\gamma_{sat} - \gamma_W) - \frac{H_c}{L} \cdot (L - I_1) \cdot \gamma_W = 0$

Resultando, portanto, em:

$$\frac{H_c}{L} = \frac{\left(\gamma_{sat} - \gamma_W\right)}{\gamma_W}$$

Da mecânica dos solos, tem-se que o peso específico seco do solo seco γ ' é dado por:

 $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_W$

Pode-se admitir que o peso específico da água é $\gamma_W=1~g/cm^3$, então, a equação se reduz a:

 $i_c = \gamma'$

Por isso, o gradiente crítico é numericamente igual ao peso específico submerso da areia.

O gradiente crítico é o gradiente que elimina a tensão efetiva, ocasionando nos solos não coesivos o fenômeno da areia movediça. Esse fenômeno só se dá nas areias porque nelas a resistência \boldsymbol{s} (ou capacidade de suporte) é proporcional à tensão efetiva ($\boldsymbol{\sigma}'$):

$$s = \sigma' \cdot tg\phi$$

Quando $\sigma'=0$, teremos s=0, ou seja, a areia sujeita a um gradiente crítico não oferece condições de suporte a corpos sólidos que se apoiam na sua superfície, pois a areia nessa situação tem propriedades equivalentes à de um líquido.

No caso das argilas, o fenômeno não ocorre, pois a resistência **S** é dada pela expressão:

 $s = c + \sigma' \cdot tg\phi$

Em que ${\bf C}$ é a coesão da argila, que tem valores sempre diferentes de zero. Portanto, ${\bf S}$ não se igualará a zero mesmo que ${\bf \sigma}'$ seja igual a zero.

Qualquer areia pode se tornar movediça, porém, as areias finas são mais suscetíveis a esse fenômeno do que as areias grossas. A justificativa dessa afirmação se dá na Lei de Darcy, que diz que a velocidade é diretamente proporcional à constante \pmb{k} de permeabilidade e ao gradiente hidráulico \pmb{i} :

$$V = k \cdot i$$

As areias grossas ($k = 10^{-1} cm/s$) têm velocidade de percolação maior do que a de areias finas ($k = 10^{-3} cm/s$). Na natureza, é raro ocorrer vazões altas para manter altas velocidades de percolação.



O gradiente crítico depende da densidade dos grãos e do índice de vazios da areia, que também influenciam na permeabilidade, logo, o coeficiente de permeabilidade tem influência no gradiente crítico.

Filtros de proteção

O fenômeno da areia movediça pode ser evitado se tornarmos o gradiente menor do que o gradiente crítico; para isso, aumenta-se o caminho de percolação L (Figura 4.10), desde que não possamos alterar $H_{\mathbb{C}}$. O aumento de L corresponde a um aumento de peso total sobre o elemento considerado. Tal aumento de carga pode ser realizado mesmo com outro material granular, por exemplo, areia ou

pedregulho, que permita o escoamento de água sem deixar passar partículas de solo dentro de seus vazios. Tais camadas de solo são denominadas de filtros de proteção.

Pesquise mais

Leia o capítulo Fluxo Bidimensional do livro "Curso básico de mecânica dos solos,", do autor Carlos Souza Pinto (2002, p. 245) para compreender melhor o movimento da água no solo.

Para conferir mais tipos de filtros de proteção e entender como eles funcionam, acesse a apostila do Professor M. Marangon, da UFJF, da disciplina de Hidráulica dos Solos. Disponível em: http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/ms2_unid01.pdf>. Acesso em: 5 ago. 2017.

O filtro, além de promover acréscimo de peso sobre o solo, também deverá ser suficientemente fino para evitar a passagem de partículas do solo de fundação. Essa exigência pode ser expressa pela equação:

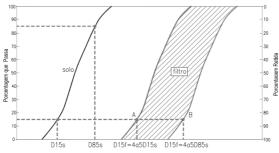
$$D_{15-Filtro} < (4 \ \dot{a} \ 5) \cdot D_{15-Solo}$$

Em que $D_{15-Filtro}$ é o diâmetro de partículas do filtro igual a 0,15 mm, sendo que esse precisa ser menor do que o diâmetro do solo em 4 a 5 vezes. No entanto, deve ser suficientemente grosso, para que as forças de percolação desenvolvidas no filtro sejam pequenas, de tal forma que o diâmetro máximo fica limitado pela equação:

$$D_{15-Filtro} > (4 \ \ \dot{a} \ \ 5) \cdot D_{85-Solo}$$

Em que $D_{85-Filtro}$ é o diâmetro de partículas do filtro igual a 0,85 mm. Observando as curvas granulométricas obtidas no ensaio de granulometria do solo e do material que servirá como filtro, podemos concluir se esse material atende como filtro para esse solo. Na Figura 4.11, podemos visualizar melhor a faixa granulométrica que pode ser utilizada como filtro para esse solo.

Figura 4.11 | Curvas granulométricas do solo e do material filtrante



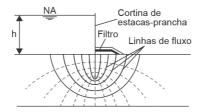
Fonte: adaptada de Ricardo Ferreira (2017, p. 6).

Portanto, todo material cuja curva de distribuição granulométrica estiver contida entre as curvas limites do filtro servirá como filtro para o solo.



Para compreender melhor como funciona o filtro de proteção, observe a Figura 4.12 que esquematiza um reservatório feito em cortina de estacas-prancha. A água que percola o solo arenoso da fundação do reservatório tem, próxima à face de jusante, o fluxo vertical e ascendente, demonstrado pelas linhas de fluxo da percolação, o que pode originar o fenômeno da areia movediça.

Figura 4.12 | Linhas de fluxo em uma cortina de estacas-prancha



Fonte: Marangon (2009, p. 25).

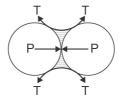
Para evitar esse problema, fez-se um filtro de material granular, permitindo, assim, livre drenagem da água próxima à face de jusante do reservatório.

Na prática, os filtros de proteção são construídos em camadas, sendo cada camada constituída por grãos mais grossos do que os da camada anterior. Esse tipo de instalação é chamado de filtro invertido.

Fenômeno de piping e capilaridade

Em alguns solos pode ocorrer o fenômeno da capilaridade, que é a ascensão da água entre os interstícios de pequenas dimensões deixados pelas partículas sólidas, além do nível do lençol freático. A altura alcançada depende da natureza do solo. A tensão superficial da água aproxima as partículas de solo e, com isso, há um aumento da tensão efetiva, como pode ser visto na Figura 4.13.

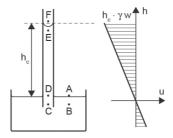
Figura 4.13 | Tensão capilar em água suspensa e coesão aparente devido à aproximação das partículas



Fonte: Pinto (2002, p. 94).

A água em contato com um corpo sólido tem forças químicas de adesão. Tal atração é a mesma que faz com que a superfície da água forme uma curva, chamada menisco. A Figura 4.14 mostra um tubo capilar (de diâmetro muito pequeno) sob efeito da capilaridade ou ascensão capilar.

Figura 4.14 | Altura de ascensão e pressão da água em um tubo capilar



Fonte: Pinto (2002, p. 91).

Em um tubo capilar, a ascensão capilar (h_c) é inversamente proporcional ao raio do tubo (r) e peso específico da água (γ_w) e proporcional à temperatura (T):

$$h_c = \frac{2 \cdot T}{r \cdot \gamma_{\text{áqua}}}$$

A altura da ascensão capilar pode ser determinada igualando-se o peso da água no tubo com a resultante da tensão superficial que a mantém na posição acima do nível d'água livre.

A altura de ascensão dos materiais depende do tamanho de suas partículas. O pedregulho, por exemplo, tem altura da ordem de centímetros, a areia de 1 a 2 metros, o silte de 3 a 4 metros, enquanto a argila tem altura de ascensão capilar maior do que 10 metros.



Reflita

Um solo que está sob efeito da capilaridade tem o mesmo alivio de tensão causado pela pressão neutra que um solo saturado?

Para o cálculo de tensões efetivas, pressões neutras e tensões totais, considera-se como sendo saturado um solo no qual existe a ação de capilaridade. Nas saídas livres a jusante de barragens de terra, o maciço terroso da barragem tem baixa força de atrito entre suas partículas, devido às tensões axiais, ou seja, devido à carga sobre ele ser pequena e as forças de percolação de água no maciço serem altas, a tensão entre partículas se torna baixa demais, a ponto de levar a ruptura do maciço por *piping* (em tradução livre, entubamento), que arrasta partículas por dentro do maciço, formando canalículos, ou tubos, por onde a água escoa, chamado de erosão tubular regressiva, até levar ao colapso completo da estrutura.

Assimile

A força de percolação nas superfícies da jusante do maciço não deve ultrapassar a resistência ao cisalhamento entre as partículas. Caso contrário, provocará o fenômeno de *piping*. Para combatê-lo, utilizam-se os filtros de proteção, que são estruturas porosas colocadas convenientemente dentro do maciço para recolher a água que percola e evitar a formação de altos gradientes hidráulicos.

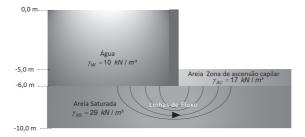
Concluímos esta seção salientando a importância do estudo da água no solo, tanto para o estudo das tensões no solo como para fenômenos decorrentes da saturação do solo. É importante salientar que a preocupação com a água é uma constante na vida do projetista, sendo essa a causadora de vários tipos de patologias e colapsos.

Sem medo de errar

Retomando o contexto de aprendizagem, você é o projetista de uma empresa especializada em barragem contratada para realizar o projeto de barragem em estaca-prancha do novo reservatório de água da cidade.

Assim, a situação-problema desta seção propõe que você calcule as tensões no solo arenoso do maciço (total, efetiva e neutra) a jusante da barragem, levando em consideração o efeito de capilaridade que ocorre nessa região. Além disso, você deve verificar a possibilidade de ocorrência do fenômeno de areia movediça, calculando o coeficiente hidráulico do fluxo de percolação e o gradiente crítico para a ocorrência do fenômeno. Tem-se que os piezômetros instalados na barragem e os ensaios geotécnicos realizados no maciço forneceram os dados necessários para o projeto, mostrados na Figura 4.15.

Figura 4.15 | Perfil do solo do maciço de uma barragem



Fonte: elaborada pela autora

A tensão vertical total é calculada utilizando a equação proveniente da mecânica dos solos:

$$\sigma_{-6} = \gamma_{AC} \cdot Z_{-6} = 17 \frac{kN}{m^3} \cdot 1m = 17 \frac{kN}{m^2} = 17 \text{ kPa}$$

A pressão neutra será:

$$u_{-6} = \gamma_W \cdot Z_{-6} = 10 \frac{kN}{m^3} \cdot 1m = 10 \frac{kN}{m^2} = 10 kPa$$

E a tensão efetiva:

$$\sigma'_{-6} = \sigma_{-6} - u_{-6} = 17 - 10 = 7kPa$$

Tem-se que, na cota -10, a areia mole recebe a carga da areia sob efeito do fenômeno de capilaridade. Portanto, somam-se as tensões

na tensão total:

$$\sigma_{-10} = (\gamma_{AS} \cdot Z_{-10}) + \sigma_{-6} = (29 \cdot 4) + 17 = 133 kPa$$

A pressão neutra é dada por:

$$u_{-10} = (\gamma_W \cdot Z_{-10}) + u_{-6} = (10 \cdot 4) + 10 = 50kPa$$

E a tensão efetiva é dada por:

$$\sigma'_{-10} = (\sigma_{-10} - u_{-10}) = (133 - 50) = 83 \text{ kPa}$$

Assim, o solo é capaz de suportar 83 kPa sem sofrer ruptura. No entanto, de nada vale a verificação da capacidade de suporte do maciço se este sofrer o fenômeno da areia movediça a jusante da barragem, devido à percolação.

O valor do gradiente hidráulico para que ocorra o fenômeno da areia movediça (i_c) é calculado considerando o fluxo ascendente, ou seja, da rocha para a superfície, utilizando a fórmula:

$$i_c = \frac{H_c}{L} = \frac{\left(\gamma_{sat} - \gamma_W\right)}{\gamma_W}$$

Substituindo os dados fornecidos pelos ensaios de caracterização do maciço, temos:

$$i_c = \frac{(29-10)}{10} = 1,9$$

Sendo que i_c é um adimensional.

Verifica-se então o gradiente hidráulico do maciço feito em areia:

$$i_{Areia} = \frac{H}{L} = \frac{6}{4} = 1,5$$

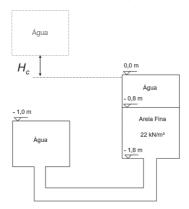
Como o gradiente hidráulico é inferior ao gradiente crítico, o maciço não sofrerá o fenômeno da areia movediça, oferecendo suporte a cargas a jusante.

Avançando na prática

Estudo da areia movediça em laboratório Descrição da situação-problema

Em um laboratório, você se depara com um permeâmetro montado como o esquema da Figura 4.16.

Figura 4.16 | Esquema de um ensaio utilizando permeâmetro



Fonte: elaborada pela autora.

Diante disso, o técnico do laboratório pede para que você ajuste o ensaio, de forma que o maciço de areia sofra o fenômeno da areia movediça. O reservatório a montante deveria estar acima do reservatório a jusante para que a água percola pelo maciço de areia. A qual altura devemos elevar o reservatório a montante para que isso ocorra?

Resolução da situação-problema

Sabe-se que o gradiente crítico pode ser calculado pela fórmula:

$$i_c = \frac{(\gamma_{sat} - \gamma_W)}{\gamma_W} = \frac{(22 - 10)}{10} = 1.2$$

E sabe-se também que:

$$i_c = \frac{H_c}{L}$$

Substituindo os valores de i_c e calculando L, ou seja, comprimento do maciço de areia pela diferença entre cotas, encontra-se a altura crítica \mathcal{H}_c :

$$H_c = i_c \cdot L = 1, 2 \cdot (1, 6 - 0, 8) = 0,96 \text{ m}$$

Portanto, para que a areia se torne uma areia movediça, o nível d'água do reservatório a jusante deve estar 0,96 m acima da referência (0.0 m).

Faça valer a pena

1. As estacas-prancha são cortinas de contenção formadas por perfis, geralmente metálicos, justapostos e cravados no solo. É uma solução para a contenção vertical. Em obras de infraestrutura, são aplicadas em terminais portuários, passagens de nível em vias e rodovias, contenção para valas de rede de água e esgoto, além de proteção de acessos a túneis, por exemplo. As estacas-prancha formam uma contenção impermeável e podem ser aplicadas de forma definitiva ou provisória.

O caso de percolação sob pranchada (cortina de estacas-prancha) pode ser esquematizado de acordo com a figura a seguir:

Linhas de fluxo em uma cortina de estacas-prancha



Fonte: Marangon (2009, p. 25).

Sobre a cortina de estacas-prancha, assinale a alternativa correta.

- a) A água que escapa do solo arenoso da fundação de um reservatório tem, próxima à face jusante, o fluxo vertical e ascendente, o que pode originar o fenômeno da areia movediça.
- b) A água que percola o solo arenoso da fundação de um reservatório tem, próxima à face jusante, o fluxo decrescente e ascendente, o que pode originar o fenômeno da areia movediça.
- c) A água que percola o solo arenoso da fundação de um reservatório tem, próxima à face jusante, o fluxo vertical e ascendente, o que pode originar o fenômeno da areia movediça.
- d) Para combater esse problema, faz-se um filtro de material argiloso, permitindo, assim, livre drenagem da água.
- e) Para combater esse problema, faz-se um filtro de material argiloso, impedindo, assim, livre drenagem da água.
- **2.** A ascensão capilar é decorrente do desenvolvimento de tensões superficiais e das forças de adesão entre os átomos da água e a superfície sólida.

Sobre capilaridade, podemos afirmar que:

- a) É o declínio da água entre os interstícios de pequenas dimensões, além do nível do lençol freático.
- b) implica um crescimento da tensão total efetiva do solo.

- c) A altura alcançada não depende da natureza do solo.
- d) acontece apenas no teórico, pois na prática, o princípio das tensões efetivas mostra o contrário.
- e) É a ascensão da água entre os interstícios de pequenas dimensões deixados pelas partículas sólidas, além do nível do lençol freático.
- **3.** Historicamente, o estudo da hidráulica dos solos é expresso em termos de unidade gravimétrica e volumétrica, que pouco diz sobre a pressão da água que está atuando no solo. Portanto, houve necessidade de expressar o estado hídrico do solo em termos de energia. Assim, surgiu o conceito de potencial de água no solo, que seria a energia com que o solo retém a água em seu interior ou a energia necessária para deslocar um volume de água de um ponto para outro da fase sólida.
- Sobre o estudo da água no solo, assinale a alternativa que contém a afirmação correta.
- a) Pressão neutra refere-se à pressão que a água presente nos poros exerce nesses interstícios e que causa modificações no arcabouço sólido.
- b) Pressão efetiva refere-se à pressão que se transmite de grão a grão e que não causa modificações no arcabouço sólido.
- c) O fenômeno da areia movediça acontece quando a pressão efetiva se anula, ocasionando a perda total da resistência da areia ao cisalhamento.
- d) O processo de *piping* é dependente das forças de percolação, que são indiretamente proporcionais ao gradiente hidráulico.
- e) Na superfície freática, a pressão neutra iguala-se à pressão efetiva, mas é o dobro da pressão atmosférica.

Seção 4.3

Fluxo de água nos solos

Diálogo aberto

Caro aluno, o estudo do movimento da água no solo, denominado fluxo, e a rede formada pelas linhas de fluxo e linhas de perda de carga, permitem determinar a vazão que percola no maciço terroso, permitindo calcular a pressão neutra, causada pela água, e a tensão efetiva em cada ponto do maciço. A estabilidade dos taludes, barragens e estruturas de retenção, em geral, podem ser severamente afetadas pela permeabilidade dos solos envolvidos, portanto, o estudo do fluxo se faz presente ao longo da vida útil dessas estruturas.

As barragens podem ser classificadas de acordo com sua utilização. Existem barragens para geração de energia, para contenção de rejeitos minerais, para contenção de rejeitos industriais, bem como de usos múltiplos. Ao longo da vida útil da barragem, ela sofre percolação de água pelo maciço que a constitui. A percolação pode acarretar em patologias no maciço que levam à sua ruptura.

A importância da segurança de barragens está na sua manutenção, para que não ocorram tais patologias. A segurança de barragens inclui a verificação do movimento da água, por meio de piezômetros, a fim de evitar rupturas por percolação de água no maciço da barragem.

Assim, o contexto de aprendizagem utilizado como situação da realidade profissional desta unidade, envolve uma empresa especializada em segurança de barragens, que contratou você como projetista e consultor, para atuar como líder responsável pela manutenção de barragens.

Na situação-problema (SP) desta seção, devemos verificar a permeabilidade e a vazão unitária que percola pela barragem, a fim de verificar se esses dados ultrapassam o valor estipulado, pois os funcionários da barragem reportaram a você uma quantidade de água anormal de umidade no solo a jusante da barragem, levantando, assim, a suspeita de sua ruptura. A vazão unitária máxima da barragem para que não ocorra a ruptura por ação da água é de $q = 41 \cdot 10^{-7} \, m^3 \, / \, s \, / \, m$. Deve-se observar que se trata de um fluxo não confinado, ou seja, a primeira linha de fluxo é a própria linha

freática. Estaria a barragem em processo de ruptura por liquefação (demasiado fluxo de água) ou *piping* (erosão interna)?

Para isso, devemos conhecer os tipos de barragem e a percolação que ocorre em cada tipo e conhecer e compreender a equação geral do fluxo e redes de fluxo confinados e não confinados, a fim de aplicá-los na solução da situação-problema proposta.

Está preparado para esse fluxo de novos desafios? Bons estudos!

Não pode faltar

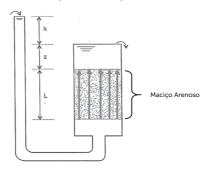
Equação geral do fluxo

O fluxo da água que percola por um solo pode ser uni, bi ou tridimensional. O fluxo é denominado unidimensional quando ocorre sempre na mesma direção, como no caso dos permeâmetros. Se a água percola por curvas em uma mesma direção, esse fluxo é denominado bidimensional, como ocorre em um permeâmetro curvo ou um maciço de solo de fundação de uma barragem. Já quando a água se desloca em qualquer direção no solo, o fluxo é dito tridimensional, como a água que migra para um poço.

Podemos calcular o fluxo unidimensional de maneira análoga ao permeâmetro de carga constante. Neste, o fluxo ocorre retilineamente da face interior à face superior do maciço arenoso. Nesse caso, a Lei de Darcy pode ser utilizada para descrever o fluxo.

O fluxo em um permeâmetro é exemplificado na Figura 4.17. As linhas verticais paralelas às paredes do permeâmetro são chamadas de linhas de fluxo, pois mostram a direção e o sentido do fluxo. As paredes do permeâmetro são linhas de fluxo.

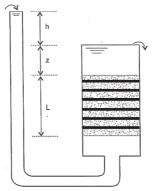
Figura 4.17 | Linhas de fluxo representadas por setas azuis



Fonte: adaptada de Pinto (2002, p. 131).

Ao passar pelo maciço arenoso do permeâmetro, o fluxo perde carga gradualmente. Se desenharmos as linhas cuja perda de carga é de mesmo valor, ou seja, equipotenciais, podemos então denominálas como linhas equipotenciais, como visto na Figura 4.18.

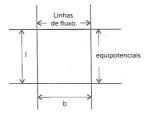
Figura 4.18 | Linhas equipotenciais representadas em preto



Fonte: Pinto (2002, p. 131).

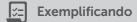
As linhas de fluxo e as linhas equipotenciais devem ser espaçadas, de modo a formar quadrados, a fim de facilitar os cálculos da rede de fluxo. Esses quadrados são denominados elementos da rede de fluxo, representados na Figura 4.19.

Figura 4.19 | Elementos da rede de fluxo



Fonte: Pinto (2002).

A quantidade de linhas de fluxo é denominada como Nf e a quantidade de linhas equipotenciais como Nd. O cruzamento das linhas de fluxo com as linhas equipotenciais forma figuras geométricas com ângulo de 90° nos vértices, figuras que são denominadas elementos de fluxo de dimensões $I \times b$, como visto na Figura 4.19. A partir dos elementos de fluxo é possível dimensionar a rede de fluxo.



Se contarmos as linhas de fluxo e as linhas equipotenciais do permeâmetro representado nas Figuras 4.17 e 4.18, teremos Nf = 6 e Nd = 7.

Adotando h=14~cm (altura da faixa de areia) e I=12~cm (largura do permeâmetro), temos:

$$b = 14/7 = 2cm$$

$$I = 12/6 = 2cm$$

Logo, o elemento da rede de fluxo, nesse caso, tem 2 x 2 cm e aparência como o da Figura 4.19.

Traçada a rede de fluxo, podemos calcular a perda de carga entre equipotenciais:

$$\Delta h = \frac{h}{Nd}$$

O gradiente hidráulico do fluxo será:

$$i = \frac{\Delta h}{I}$$

A vazão no elemento da rede de fluxo, ou seja, a vazão unitária, dada em unidade de vazão por metro de comprimento do maciço, ou seja, $m^3 / s / m$ e é calculada por:

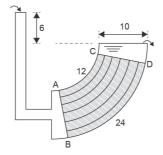
$$q = k \cdot h \cdot \frac{Nf}{Nd}$$

E a vazão total no permeâmetro, dada em unidade de vazão, ou seja, m^3/s , é dada pela equação:

$$Q = k \cdot h \cdot \frac{Nf}{Nd} \cdot b$$

Até agora estudamos fluxos unidimensionais, em permeâmetros retos, porém, para compreendermos o fluxo bidimensional que ocorre em fundações de barragens, consideraremos o permeâmetro curvo da Figura 4.20. As linhas de fluxo seguem o mesmo desenho das paredes do permeâmetro. Para a Figura 4.20, o comprimento da curva interna é igual a 12 cm e o comprimento da curva externa é 24 cm.

Figura 4.20 | Rede de fluxo em permeâmetro curvo



Fonte: Pinto (2002, p. 134).

Nota-se, portanto, que o gradiente hidráulico na curva interna é maior do que o gradiente na curva externa do permeâmetro, ou seja, as velocidades de percolação rentes à parede AC são maiores do que as rentes à parede BD.

A diferença de carga no permeâmetro causa o fluxo, que é gerado devido à pressão exercida pela carga, sendo que essa carga se dissipa pelo maciço arenoso por onde a água percola. Se traçarmos pontos de mesma pressão de percolação teremos linhas equipotenciais, a perda de carga, portanto, ocorre entre as linhas equipotenciais. As linhas equipotenciais são sempre ortogonais às paredes do permeâmetro e às linhas de fluxo.

Nesse caso de permeâmetro curvo, o cruzamento entre linhas equipotenciais e linhas de fluxo formam elementos de rede também, porém, de diferentes tamanhos. As vazões entre cada elemento de fluxo devem ser iguais entre si, de tal maneira que a somatória de todos os elementos da rede de fluxo, quando somados, resultem no mesmo valor final. Posto isso, a Lei de Darcy pode ser aplicada a cada elemento de rede:

$$q = k \cdot \frac{\Delta h}{I} \cdot b$$

Sendo que a relação b/I é constante, então a vazão em todos os elementos é a mesma.



As linhas de fluxo são linhas geradas a partir do contorno de uma barragem, por exemplo, a linha rente à barragem ou a linha freática são

linhas de fluxo.

As superfícies livres do terreno a jusante e a montante da barragem, são linhas equipotenciais.

A vazão total é a quantidade de água por segundo que passa pela barragem.

O gradiente hidráulico, por sua vez, é a diferença de carga entre linhas equipotenciais consecutivas (perda de carga ao longo do curso d'água).

O físico alemão Forchheimer propôs traçados para vários tipos de linha de fluxo, à mão livre, respeitando as condições de contorno impostas. As condições de contorno determinam que as linhas de fluxo sempre intercedam às linhas equipotenciais ortogonalmente, de tal forma a formar figuras próximas a quadrados, e determinaram também que cada elemento da rede tenha o mesmo valor de vazão unitária.

Tipos de barragens

As barragens são estruturas construídas transversalmente aos vales e utilizadas basicamente para acumulação de água para alguma finalidade, dentre elas, abastecimento de água, geração de energia elétrica, irrigação, controle de cheias, perenizarão de rios, criação de animais, paisagismo, prática de esportes, melhora das condições ambientais, contenção de sedimentos, controle de erosão, contenção de rejeitos, açudes, entre outras.

Quanto ao material de construção, as barragens podem ser divididas em dois grupos principais: barragens de terra e/ou enrocamento e barragens de concreto.

As barragens de terra e/ou enrocamento são tidas como convencionais e são construídas com matérias naturais, como argilas, siltes e areias, ou materiais produzidos artificialmente, como brita nos enrocamentos. No interior do maciço de terra ou enrocamento, estabelece-se uma rede de fluxo característica, que deve ser controlada de forma a não gerar problemas no talude, como o *pipping*. Dessa forma, a maioria das barragens é dotada de drenagem interna, feita por filtros horizontais, verticais e drenos

de pé, que conduzem o fluxo de forma controlada para a jusante. No caso de barragens de contenção de rejeitos, o próprio rejeito é utilizado como material de construção, sendo denominadas barragens de rejeitos.

As barragens de concreto são aquelas construídas essencialmente com materiais granulares, produzidos artificialmente, como o cimento e os aditivos químicos. Dentre elas, estão as barragens de concreto por gravidade, em arco e de contrafortes.

Figura 4.21 | Barragem de contrafortes



Fonte: Martins (2013, p. 19).

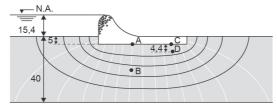
Nos vários tipos de barragem, sempre haverá percolação da água pelo maciço, seja esse maciço formador da barragem ou apenas sua fundação (em casos de barragem de concreto).

O tipo de rede de fluxo formado pela percolação forma dois tipos principais de fluxo, classificados em relação à sua linha de fluxo superior em confinado e não confinado.

Redes de fluxo: fluxo confinado

O fluxo é denominado confinado quando temos todas as condições de contorno conhecidas, ou seja, as linhas de fluxo e as linhas equipotenciais têm o desenho predefinido. Como exemplo, temos a percolação sob barragem de concreto, apresentada na Figura 4.22.

Figura 4.22 | Fluxo confinado sob barragem de concreto

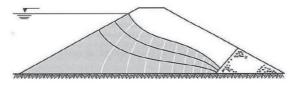


Fonte: Pinto (2002, p. 139).

Redes de fluxo: fluxo não confinado

Um fluxo é dito como não confinado quando não se tem todas as condições de contorno conhecidas, ou seja, não há previsão de como a rede de fluxo está distribuída no maciço. Um exemplo comum é a percolação através de barragem de terra, exemplificada na Figura 4.23.

Figura 4.23 | Fluxo não confinado através de barragem de terra com filtro de pé



Fonte: Pinto (2002, p. 138).

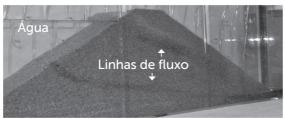
O primeiro passo para traçar esse tipo de rede de fluxo é a estimativa da linha de fluxo superior (também chamada de linha freática superior), a fim de desenhar as linhas de fluxo posteriores acompanhando o desenho dessa primeira. Vários métodos podem estimar o traçado da rede de fluxo, porém, todos devem respeitar as condições de contorno, como a presença ou não de filtros de proteção na barragem.



Como um filtro de proteção pode alterar a rede de fluxo? A introdução de filtros de proteção na barragem pode ter efeitos negativos, ou apenas positivos?

Métodos experimentais podem determinar a posição das linhas de fluxo na rede de fluxo, como os modelos físicos. Ao colocar um solo arenoso em uma caixa de madeira com face de vidro (Figura 4.24), cria-se percolação e por meio de corantes é possível observar as linhas de fluxo nela formadas (verde e vermelha), as linhas equipotenciais podem ser desenhadas utilizando as linhas de fluxo, obedecendo a condição de contorno de que as linhas de fluxo e equipotencial devem ser ortogonais entre si.

Figura 4.24 | Trajetória do produto corante no meio poroso da barragem homogênea com dreno horizontal



Fonte: adaptada de http://paginas.fe.up.pt/~shrha/publicacoes/pdf/JHRHA_5as/14_JCMarques_EstudosEmModelo.pdf, Acesso em: 8 abr. 2016.

Analogias são aplicadas para traçar redes de fluxo mais facilmente, como a utilização da dissipação de calor ou de potencial elétrico, equiparando ao fluxo, para determinar as condições de contorno e valores do estudo do fluxo de água no solo.

Métodos numéricos também podem ser utilizados no processo, como uma rede de elementos finitos, que pode calcular com uma precisão boa a carga total em cada ponto. O método dos elementos de contorno também obtém sucesso nesse tipo de análise.

Em barragens de terra, a permeabilidade deve ser considerada em todas as direções do fluxo, podendo não ser a mesma para todas as direções. Para correção desse fator, é utilizado o fator de transformação de escala na direção x, para obter as medidas em x no caso de escoamento em meio anisótropo (ou seja, com diferentes permeabilidades):

 $x' = x \cdot \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}$

Assim, as novas distâncias na direção \mathbf{x} serão \mathbf{x} , e a permeabilidade equivalente pode ser calculada como:

$$k' = \sqrt{k_x \cdot k_y}$$

Sendo $\mathbf{k}_{\mathbf{x}}$ e $\mathbf{k}_{\mathbf{y}}$ as permeabilidades nas direções x e y, respectivamente.

Pesquise mais

Vale a pena conferir o trabalho dos estudantes portugueses José Couto Marques e César Romão Ferreira sobre a Percolação de água em solos - estudos em modelo reduzido, chamado *Estudos em modelo reduzido de percolação em barragens em aterro*. Disponível em: http://paginas.fe.up.pt/~shrha/publicacoes/pdf/JHRHA_4as/22_JCoutoMarques_APercola%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2017.

Atualmente, diversos programas computacionais, empregando o método dos elementos finitos, estão disponíveis para o cálculo de redes em materiais não homogêneos.

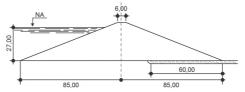
Com relação à proteção de obras de maciços terrosos, devese atentar ao percurso que a água percorre (rede de fluxo) e sua velocidade (coeficiente de permeabilidade), a fim de se prever fenômenos como o *piping*, a erosão e a liquefação do maciço e sua ruptura devido a *estes* fenômenos. Uma vez dada a devida importância à água no solo, estaremos prevenidos de grandes catástrofes em barragens e seus entornos.

Sem medo de errar

Retomando o contexto de aprendizagem, você é o projetista e o consultor técnico de uma empresa especializada em segurança de barragens e foi convocado a verificar a percolação que ocorre no maciço de uma grande barragem em terra.

Na situação-problema desta seção, temos que a barragem de terra a ser analisada tem percolação anisotrópica, portanto, tem coeficientes de permeabilidade diferentes para cada eixo considerado, sendo $k_x = 5 \cdot 10^{-8} \, m \, l \, s$ e $k_y = 2 \cdot 10^{-8} \, m \, l \, s$. Pede-se, então, que seja verificada a permeabilidade equivalente, a largura em x equivalente da barragem (x') e a vazão por metro que percola no maciço, a fim de se prever futuras patologias desse maciço.

Figura 4.25 | Barragem em terra com votas em metros



Fonte: adaptada de Caputo (1978, p. 44).

Para a verificação devida dos fatores pedidos, é necessário primeiramente que se redesenhe a barragem agora com as linhas de fluxo e as linhas equipotenciais, com a largura nova de base da barragem, já corrigida para a largura equivalente (\mathbf{x}'), devido à percolação ser anisotrópica. Para tal, calculamos:

$$x' = x \cdot \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot 10^{-8}}} \cdot x = 0,63 \cdot x$$

Portanto, a barragem terá nova largura, que pode ser calculada como:

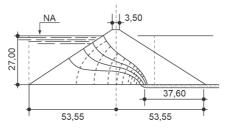
$$x'_{barragem} = 0,63 \cdot x = 0,63 \cdot 85 = 53,55m$$

E largura do filtro como sendo:

$$X'_{filtro} = 0,63 \cdot x = 0,63 \cdot 60 = 37,80m$$

Podemos observar a percolação no maciço agora com as dimensões equivalentes, na Figura 4.26.

Figura 4.26 | Barragem de terra sob efeito da percolação com linhas de fluxo e linhas equipotenciais representadas



Fonte: adaptada de Caputo (1978, p. 406).

Com as larguras em x equivalentes e as linhas de fluxo e as linhas equipotenciais desenhadas na Figura 4.26, podemos calcular a vazão unitária da percolação de água na barragem a partir da equação:

$$q = k \cdot h \cdot \frac{Nf}{Nd}$$

Sendo linhas de fluxo Nf=4 e linhas equipotenciais Nd=17, altura h=2700cm, e o coeficiente de permeabilidade é dado pelo coeficiente de permeabilidade equivalente (k=k), que é calculado através da equação:

$$k' = \sqrt{k_x \cdot k_y}$$

$$k' = \sqrt{5 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 10^{-8}} = 3,16 \cdot 10^{-8} \, m \, / \, s$$

Substituindo os valores na equação da vazão unitária, teremos:

$$q = 3.16 \cdot 10^{-8} \cdot 27 \cdot \frac{4}{17} = 2.01 \cdot 10^{-7} \frac{m^3 / s}{m}$$

Assim, a vazão por metro ao longo do maciço da barragem é de $2,01\cdot 10^{-7}\,m^3$ / s .

Visto que os dados de projeto da barragem apontam que a máxima vazão suportada é de $q = 41 \cdot 10^{-7} \, m^3 \, l \, s \, l \, m$, a barragem não corre risco de ruptura, pois está dentro da vazão estipulada. A umidade observada a jusante da barragem tem como provável motivo as chuvas da região.

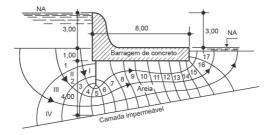
Avançando na prática

Percolação sob barragem de concreto

Descrição da situação-problema

Tem-se uma barragem de concreto construída sobre um solo de areia siltosa, com coeficiente de permeabilidade $k=3\cdot 10^{-3}\,cm\,l\,s$. Foi requerido a você, responsável técnico nesta situação-problema, que determine a vazão de água que percola sob a barragem por metro e a perda de carga que ocorre nesse fluxo, por metro. Os dados são fornecidos na Figura 4.27, com cotas em metros.

Figura 4.27 | Barragem de concreto



Fonte: Caputo (1978, p. 402).

Resolução da situação-problema

Para tal, devemos lançar mão da fórmula da vazão unitária (q) que relaciona linhas de fluxo (Nf), linhas equipotenciais (Nd), altura da barragem (h) e comprimento da barragem (b).

$$q = k \cdot h \cdot \frac{Nf}{Nd}$$

Substituindo os valores na figura, teremos:

$$q = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 300 \cdot \frac{4}{17} = 135.529,41 \text{ cm}^3 / \text{s}$$

A perda de carga entre as linhas equipotenciais pode ser calculada por:

$$\Delta h = \frac{h}{Nd} = \frac{3}{17} = 0,17m$$

A partir desses dados, é possível comparar resultados com o ensaio de permeabilidade, a fim de se prever o fenômeno de areia movediça (por meio do gradiente hidráulico gerado pela perda de carga) e o fenômeno de pipping (por meio da vazão unitária).

Faça valer a pena

1. Os problemas de fluxo podem ser classificados com relação às fronteiras, ou seja, problemas de fluxo confinado e de fluxo não confinado. No caso de problemas de fluxo não confinado, uma parte das fronteiras no fluxo não é conhecida e necessita ser predeterminada de modo a resolver o problema. A predeterminação depende de cinco tipos de condições de contorno, sendo elas a superfície impermeável, a superfície em contato

com o líquido, a superfície livre de fluxo, a linha freática e a posição do filtro de proteção.

Um exemplo clássico de redes de fluxo não confinado são as barragens de terra, conforme representado na figura:

Linhas de fluxo em uma barragem de terra



Fonte: adaptada de Caputo (1978, p. 406).

Analisando a figura, podemos afirmar que:

- a) Apresenta um fluxo de água graças à carga sendo mantida constante entre montante e jusante.
- b) Com o intuito de proteger a barragem do fenômeno de erosão externa (piping) e para permitir rápida drenagem da água que percola através da barragem, utilizam-se filtros construídos na parte externa da barragem, como filtros horizontais da figura.
- c) Com o intuito de proteger a barragem do fenômeno de erosão interna (piping) e para permitir rápida drenagem da água que percola através da barragem, utilizam-se filtros construídos na parte inferior da barragem, como filtros horizontais da figura.
- d) Apresenta um fluxo de água graças à carga sendo mantida constante internamente na barragem.
- e) Com o intuito de proteger a barragem do fenômeno de erosão interna (piping) e para permitir rápida drenagem da água que percola através da barragem, utilizam-se filtros construídos na parte inferior da barragem, como filtros horizontais da Figura, porém, seria mais efetivo se os filtros fossem verticais.
- **2.** Construídas de forma natural ou artificial sobre córregos, rios ou canais, as barragens têm a função de reter e controlar o fluxo de água. Independentemente de sua finalidade e do tipo de funcionamento, que varia bastante, elas apresentam um elemento comum: em algum ponto do percurso, a água fica retida no reservatório formado pelos suportes elevados em relação ao nível d'água.

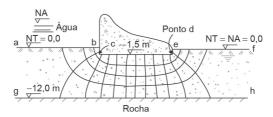
Quais os tipos mais comuns de barragens de concreto?

- a) Barragem de gravidade; barragem em arco; barragem de contrafortes.
- b) Barragem de gravidade; barragem de terra; barragem de concreto asfáltico.
- c) Barragem em arco; barragem de concreto asfáltico; barragem de contraforte.

- d) Barragem de terra; barragem em arco; barragem de contraforte.
- e) Barragem de gravidade; barragem de enrocamento; barragem de concreto asfáltico.
- **3.** De maneira resumida, a rede de fluxo é a trajetória percorrida pela água no interior do maciço de solo, onde as linhas de fluxo mostram a trajetória do fluxo e as linhas equipotenciais são desenhadas ligando os pontos de igual carga total.

Considerando a barragem de concreto da figura, assinale a alternativa correta:

Barragem de concreto com linhas de fluxo e equipotenciais de sua percolação representadas



Fonte: adaptada de Caputo (1979).

- a) Podem ser identificadas 5 linhas de fluxo (Nf) e 11 linhas equipotenciais (Nd) entre b e e.
- b) Podem ser identificadas 4 linhas de fluxo (Nf) e 12 linhas equipotenciais (Nd) entre b e e.
- c) Podem ser identificadas 7 linhas de fluxo (Nf) e 14 linhas equipotenciais (Nd) entre a e f.
- d) Podem ser identificadas 7 linhas de fluxo (Nf) e 11 linhas equipotenciais (Nd) entre a e f.
- e) Podem ser identificadas 3 linhas de fluxo (Nf) e 10 linhas equipotenciais (Nd) entre b e e.

Referências

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**: fundamentos. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC Livros técnicos e científicos Editora S.A., 1978.

FERREIRA, R. **Dimensionamento de filtros.** Goiânia: Puc - Goiás, [201-]. Disponível em: http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/15030/material/barragem_terra_4.pdf>. Acesso em: 5 ago. 2017.

MARANGON, M. **Hidráulica dos solos**. Minas Gerais: UFJF, 2009. Disponível em: http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/ms2_unid01.pdf>. Acesso em: 5 set. 2017.

MARTINS, J. R. S. **Barragens e estruturas hidráulicas**: separata para o curso de barragens. São Paulo: Escola Politécnica - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, 2013.

MELLO, V. F. B.; TEIXEIRA, A. H. **Mecânica dos solos**. São Carlos: Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, 1971.

PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

TERZAGHI, K. Theoretical Soil Mechanics. New York: John Wiley and Sons, 1943.



