

Fenômenos de transportes

Fenômenos de transporte

Roberto Mac Intyer Simões

© 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

Grasielle Aparecida Lourenço

Lidiane Cristina Vivaldini Olo

Paulo Heraldo Costa do Valle

Thatiane Cristina dos Santos de Carvalho Ribeiro

Revisão Técnica

João Carlos dos Santos

Luis Eduardo Zampar Filho

Editorial

Adilson Braga Fontes

André Augusto de Andrade Ramos

Cristiane Lisandra Danna

Diogo Ribeiro Garcia

Emanuel Santana

Erick Silva Gripe

Lidiane Cristina Vivaldini Olo

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Simões, Roberto Mac Intyer

S593f Fenômenos de transporte / Roberto Mac Intyer Simões.

- Londrina : Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017.

176 p.

ISBN 978-85-522-0202-8

1. Mecânica dos fluidos. I. Título.

CDD 532

2017

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

Sumário

Unidade 1 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 Introdução à transferência de calor	91
Seção 3.1 - Introdução à condução	93
Seção 3.2 - Introdução à convecção	106
Seção 3.3 - Introdução à radiação e trocadores de calor	119
Unidade 4 Termodinâmica básica	135
Seção 4.1 - Introdução à termodinâmica	137
Seção 4.2 - Primeira lei de termodinâmica	149
Seção 4.3 - Avaliação de propriedades e modelo de gás ideal	163

Palavras do autor

Caro aluno, os Fenômenos de Transporte, governados por leis físicas, são extremamente importantes para o progresso e o conforto da humanidade. Esses fenômenos 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 desses 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 dessa 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.

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 esses 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

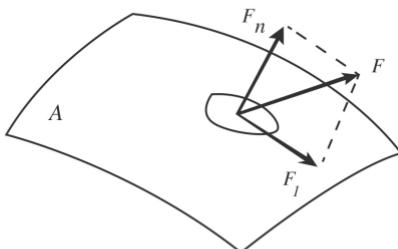
Caro aluno, a Mecânica dos Fluidos é a ciência que estuda os fluidos em repouso e em movimento. No entanto, o que é fluido? Como são definidos e classificados? Tem-se que o fluido é definido como sendo uma substância capaz de escoar e que não tem forma própria, ou seja, é uma substância que adquire o 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: adaptada 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.

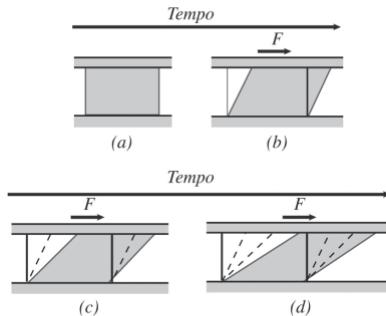


Assimile

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. Aplicando-se 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.

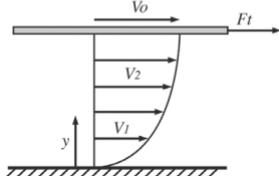
 **Pesquise mais**

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.



Assimile

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 ε 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 ρ , também chamada de densidade, é definida por:

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

Em que m é a massa do fluido e ν 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:

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}}$$

Em que ρ é a massa específica máxima da água, que tem o valor de $1000 \text{ kg} / \text{m}^3$ a 4°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: $g = 9,81 \text{ m} / \text{s}^2$. Realizando uma análise dimensional, tem-se que a unidade do peso específico é N / m^3 .

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

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

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.



Refita

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.

$$A_{pistão} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L$$

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

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

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_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 = $122,5 \text{ kg/m}^3$ e densidade relativa = 0,12.
- b) Peso específico = 1200 N/m^3 , massa específica = $122,5 \text{ kg/m}^3$ e densidade relativa = 1,22.
- c) Peso específico = 12000 N/m^3 , massa específica = $122,5 \text{ kg/m}^3$ e densidade relativa = 1,22.
- d) Peso específico = 1200 N/m^3 , massa específica = $1224,5 \text{ kg/m}^3$ 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 $0,027 \text{ N.s/m}^2$ 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:

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



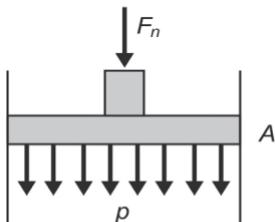
Assimile

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, dobrarmos 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 N** em uma área de **10 cm²**:

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

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

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

Após essa verificação, vamos supor novamente que uma força de **100 N** é aplicada em uma área de **10 cm²**. Tem-se que se dobrarmos a área de aplicação dessa força, verificaremos que a pressão diminui sua intensidade pela metade, como queríamos demonstrar:

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

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 $z_A = -10 \text{ cm}$ e $z_B = -20 \text{ cm}$ 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 $101,3 \text{ kN/m}^2$, tem-se que a pressão no ponto A será:

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

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

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

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

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

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

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

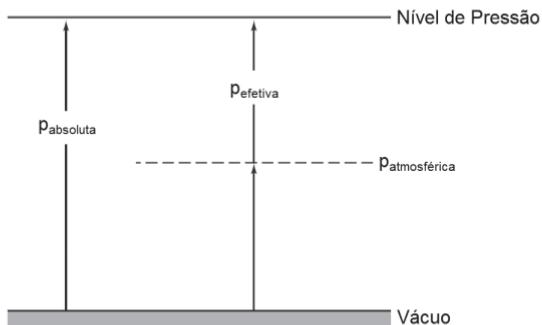
A pressão em B é maior que a pressão em A, como queríamos demonstrar.

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:

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

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 (lb / 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.

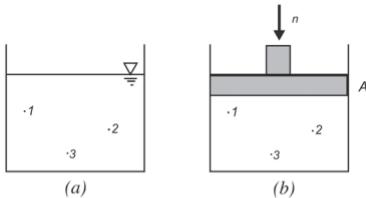
Vamos entender melhor como funciona essa lei? Imagine um recipiente cilíndrico, em que o fluido apresenta uma superfície livre, em contato com a atmosfera, como ilustrado na Figura 1.7 (a).

Suporemos que a pressão nos pontos 1, 2 e 3, mostrados na Figura 1.7 (a), é respectivamente $p_1 = 1 \text{ N/cm}^2$, $p_2 = 2 \text{ N/cm}^2$ e $p_3 = 3 \text{ N/cm}^2$. 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:

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

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: $p_1 = 11 \text{ N/cm}^2$, $p_2 = 12 \text{ N/cm}^2$ e $p_3 = 13 \text{ N/cm}^2$.

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.

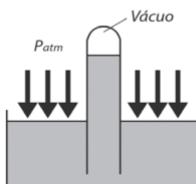
Finalmente, tem-se que a lei de Pascal é largamente utilizada em problemas que envolvem sistemas que transmitem e amplificam uma força, através da pressão aplicada em uma área, como em uma prensa hidráulica para conformação de metais, em um sistema de freio hidráulico, em servomecanismos etc.

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.

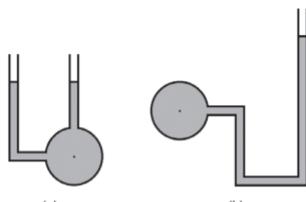
Figura 1.8 | Desenho esquemático de um barômetro



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



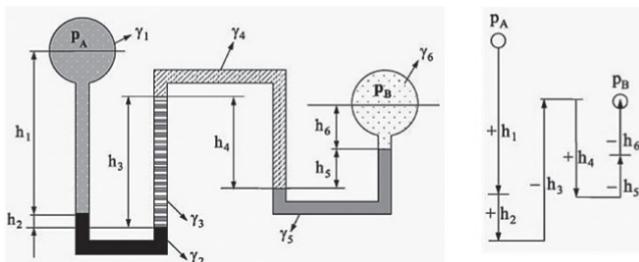
Fonte: elaborada pelo autor.

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, utilizando-se 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:

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

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



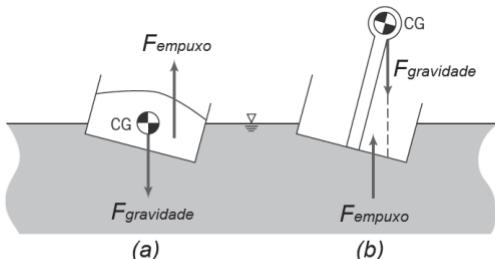
Refletia

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.

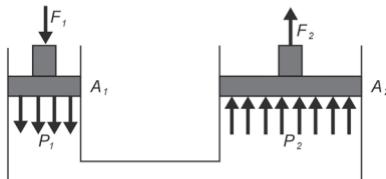
Sem medo de errar

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 resolvemos 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 $A_1 = 10 \text{ cm}^2$, a área do pistão de saída, onde o automóvel será levantado, é $A_2 = 100 \text{ cm}^2$.

A força peso do automóvel, considerando a aceleração da gravidade igual a $9,81 \text{ m/s}^2$ 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:

$$p_2 = \frac{F_2}{A_2} = \frac{9.810 \text{ N}}{100 \text{ cm}^2} = 98,1 \text{ N/cm}^2$$

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:

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

Portanto:

$$F_1 = 98,1 \text{ N/cm}^2 \cdot A_1 = 98,1 \text{ N/cm}^2 \cdot 10 \text{ cm}^2 = 981 \text{ N}$$

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.

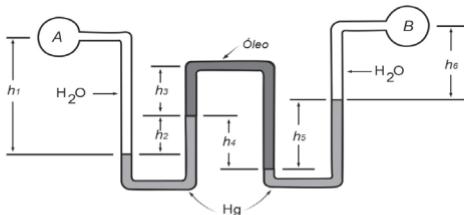
Avançando na prática

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: $\gamma_{H_2O} = 10.000 \text{ N/m}^3$; $\gamma_{Hg} = 135.500 \text{ N/m}^3$ e $\gamma_{Óleo} = 8.800 \text{ N/m}^3$. As alturas são: $h_1 = 10 \text{ cm}$, $h_2 = 3 \text{ cm}$, $h_3 = 4 \text{ cm}$, $h_4 = 4 \text{ cm}$, $h_5 = 5 \text{ cm}$ e $h_6 = 8 \text{ cm}$.

Resolução da situação-problema

Aplicando a regra prática da equação manométrica, temos que:

$$p_A + \gamma_{H_2O} \cdot h_1 - \gamma_{Hg} \cdot h_2 + \gamma_{Óleo} \cdot h_4 - \gamma_{Hg} \cdot h_5 - \gamma_{H_2O} \cdot h_6 = p_B$$

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

$$\begin{aligned} p_A - p_B &= -\gamma_{H_2O} \cdot h_1 + \gamma_{Hg} \cdot h_2 - \gamma_{Óleo} \cdot h_4 + \gamma_{Hg} \cdot h_5 + \gamma_{H_2O} \cdot h_6 \\ p_A - p_B &= -10.000 \text{ N/m}^3 \cdot 0,1 \text{ m} + 135.500 \text{ N/m}^3 \cdot 0,03 \text{ m} - 8.800 \text{ N/m}^3 \cdot 0,04 \text{ m} + \\ &\quad + 135.500 \text{ N/m}^3 \cdot 0,05 \text{ m} + 10.000 \text{ N/m}^3 \cdot 0,08 \text{ m} \\ p_A - p_B &= 10.288 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

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.

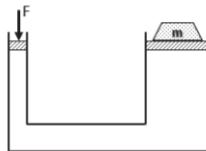
Analise as informações a seguir:

- 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.

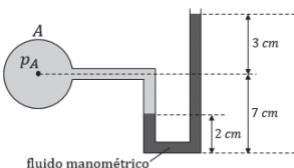
2. Uma força F de 850 N é aplicada ao pistão menor de um elevador hidráulico ilustrado na figura a seguir. A área a do pistão menor é de 15 cm^2 e a área A do pistão maior é de 150 cm^2 . O fluido utilizado no elevador hidráulico é água ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$). Que massa m deve ser colocada no 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) $m = 85 \text{ kg}$.
- b) $m = 850 \text{ kg}$.
- c) $m = 8500 \text{ kg}$.
- d) Não é possível manter ambos os pistões no mesmo nível.
- e) $m = 8,5 \text{ kg}$.

- 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 p_A ?
Dados: $\gamma_{água} = 10000\text{N/m}^3$; $\gamma_{mercúrio} = 136000\text{N/m}^3$; $P_{atm} = 101,3\text{kPa}$



Com base no texto assinale a alternativa correta.

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

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.

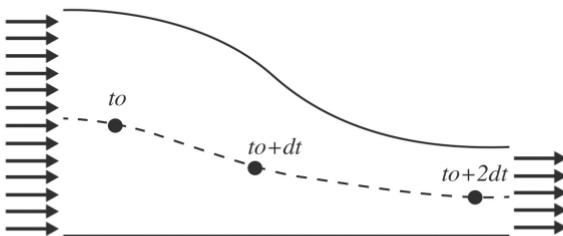
Está preparado para esse novo desafio? Bons estudos!

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 quando 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.

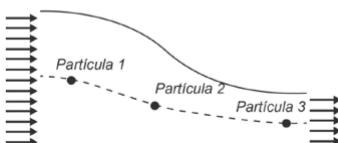
Figura 1.14 | Método de análise lagrangeano



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

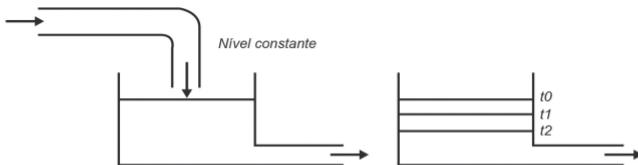


Fonte: elaborada pelo autor.

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.

Figura 1.16 | 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, tem-se 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.

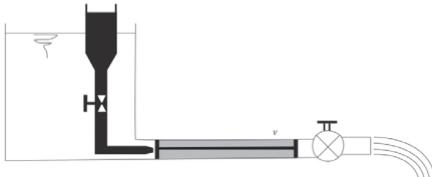
Número de Reynolds: escoamento laminar; transição; turbulento

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, define-se 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 Re . Para um escoamento interno, dentro de uma tubulação com diâmetro D , o número de Reynolds Re_D é definido como:

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



Pesquise mais

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.

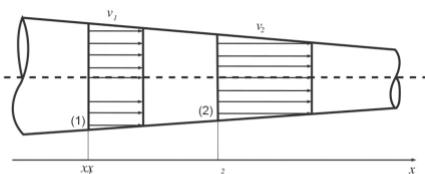
Fonte: FOX, Robert W.; PRITCHARD, Philip J., McDONALD, Alan T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

Finalizando, a fim de definir os regimes de escoamento, tem-se o seguinte critério: para valores de $Re_D < 2.000$, o escoamento é laminar; para valores de número de Reynolds entre $2.000 < Re_D < 2.400$, o escoamento é de transição; e para valores de $Re_D > 2.400$, 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.



Assimile

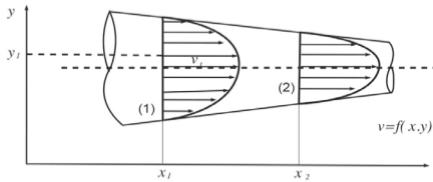
Esse modelo é bastante utilizado em situações em que os valores médios das propriedades do fluido são relevantes para a análise do problema,

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 ∇ que cruza uma determinada seção do escoamento por unidade de tempo t , como mostra a equação a seguir:

$$Q = \frac{\nabla}{t}$$

Uma aplicação prática dessa formulação é o cálculo do tempo de enchimento de um reservatório, com um volume ∇ , 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:

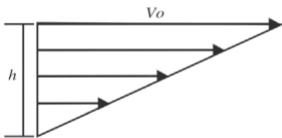
$$V_m = \frac{1}{A} \int_A V dA$$



Exemplificando

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:

$$Q_{m_{\text{entrada}}} = Q_{m_{\text{saída}}}$$

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:

$$\rho \cdot Q_{\text{entrada}} = \rho \cdot Q_{\text{saída}}$$

Ou seja:

$$Q_{\text{entrada}} = Q_{\text{saída}}$$



Exemplificando

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

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

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

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

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

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

$$Q_1 = Q_2$$

$$V_{m_1} \cdot A_1 = V_{m_2} \cdot A_2$$

$$1 \text{ m/s} \cdot 0,001 \text{ m}^2 = V_{m_2} \cdot 0,0005 \text{ m}^2$$

$$V_{m_2} = 2 \text{ m/s}$$

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

$$\sum_{\text{entrada}} Q_m = \sum_{\text{saída}} Q_m$$



Refletir

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:

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

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.

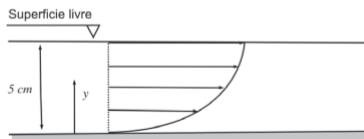
Avançando na prática

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, tem-se que:

$$V_m = \frac{1}{A} \int_A V dA = \frac{1}{A} \int_0^h (75 \cdot y - y^2) \cdot b \cdot dy = \frac{1}{A} \left(75 \cdot \frac{y^2}{2} - \frac{y^3}{3} \right) \Big|_0^h = \frac{75 \cdot h^2}{2 \cdot A} - \frac{h^3}{3 \cdot A}$$

Faça valer a pena

- 1.** Um líquido de massa específica 1000 kg/m^3 e viscosidade dinâmica $1 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$ escoa com velocidade se $0,1 \text{ m/s}$ 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) $Q = 78,5 \text{ L/s}$
- 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 $0,03 \text{ m}^3/\text{s}$?

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 potência e o rendimento 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

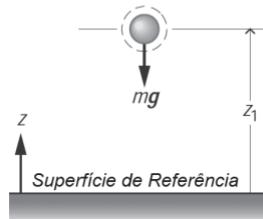
Energias mecânicas associadas a um fluido

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 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:

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

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

$$\Delta E_p = E_{pB} - E_{pA} = m \cdot g (z_B - z_A)$$



Refita

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 $E_{\text{pressão}}$, 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:

$$W = E_{\text{pressão}} = \int_V p dV$$

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.

$$E_{\text{mecânica}} = E_p + E_c + E_{\text{pressão}}$$

$$E_{\text{mecânica}} = m \cdot g \cdot z + \frac{m \cdot V^2}{2} + \int_V p dV$$



Assimile

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.

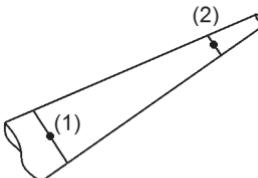
As hipóteses simplificadoras da equação de Bernoulli são:

- 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:

$$E_{mecânica_1} = E_{mecânica_2}$$

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



Fonte: elaborada pelo autor.

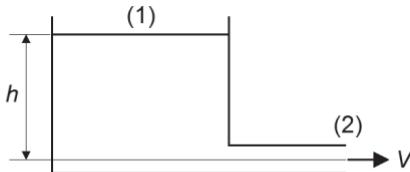
Reescrevendo a igualdade encontrada pela conservação de energia, $E_{mecânica_1} = E_{mecânica_2}$, utilizando todas as energias mecânicas associadas ao fluido, tem-se a forma mais utilizada da equação de Bernoulli:

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



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 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:

$$H_1 = H_2$$



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_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_T :

$$H_1 - H_T = H_2$$

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_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 máquina 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.



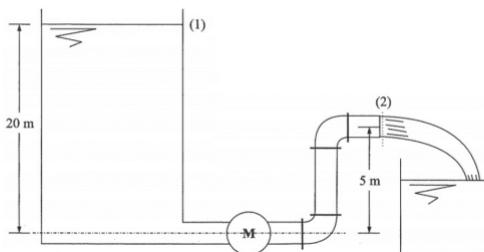
Exemplificando

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 $\gamma_{H2O} = 10^4 \text{ N/m}^3$; $A_{tubos} = 10 \text{ cm}^2$ e $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

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 $z_1 = 20 \text{ m}$; $V_1 = 0 \text{ m/s}$; $p_1 = p_2 = p_{atm}$ e $z_2 = 5 \text{ m}$.

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

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

Portanto, temos que altura manométrica da máquina é:

$$H_M = 5 \text{ m} + \frac{(10 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}} - 20 \text{ m} = -9,9 \text{ m}$$

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, $H_T = 9,9 \text{ m}$.

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

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

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

$$Pot_T = \eta_T \cdot Pot = 0,75 \cdot 990 \text{ W} = 742,5 \text{ W}$$

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:

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

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:

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

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

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

Ou seja:

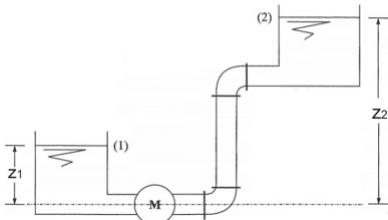
$$\sum_{\text{entrada}} \gamma \cdot Q \cdot H = \sum_{\text{saida}} \gamma \cdot Q \cdot H$$

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 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 2.6, tem-se que $V_1 = V_2 = 0 \text{ m/s}$; $p_1 = p_2 = p_{atm}$. 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:

$$H_M = z_2 - z_1 = h$$

Analizando 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:

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

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

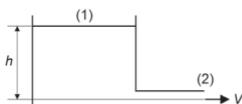
1. Por um duto de seção circular escoa água ($\gamma = 10.000 \text{ N/m}^3$). Em um ponto localizado a 10 m acima do nível do solo, a pressão dentro do duto é 250 kPa e a velocidade é 5m/s. Num ponto a jusante, no nível do solo, a velocidade é 20m/s.

Determine a pressão na seção a jusante desprezando os efeitos de atrito. Para os cálculos utilize $g = 10 \text{ m/s}^2$.

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 $h = 2 \text{ m}$.

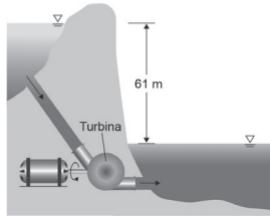


Fonte: elaborada pelo autor.

Com base no texto assinale a alternativa correta

- a) $0,02 \text{ m}^3 / \text{s}$
- b) $0,03 \text{ m}^3 / \text{s}$
- c) $0,04 \text{ m}^3 / \text{s}$
- d) $0,05 \text{ m}^3 / \text{s}$
- e) $0,06 \text{ m}^3 / \text{s}$

3. Na taxa máxima de geração de eletricidade, uma pequena central hidrelétrica apresenta uma vazão de $14,1 \text{ m}^3/\text{s}$, 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 $\gamma_{H2O} = 10^4 \text{ N/m}^3$; $A_{tubos} = 10 \text{ cm}^2$ e $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.



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

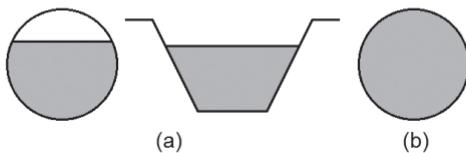
Visando calcular a perda de carga que ocorre em um sistema hidráulico, estudaremos nesta seção os conceitos envolvidos no escoamento permanente de um fluido incompressível em um conduto fechado. Tem-se que a perda de carga é uma dissipação de

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 A da seção transversal do conduto e o perímetro molhado 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 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, 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	A	P	r_h	D_h
Circular (de diâmetro D)	$\frac{\pi \cdot D^2}{4}$	$\pi \cdot D$	$\frac{D}{4}$	D
Quadrada (de lado a)	a^2	$4 \cdot a$	$\frac{a}{4}$	a
Retangular (de lados a e b)	$a \cdot b$	$2(a + b)$	$\frac{a \cdot b}{2(a + b)}$	$\frac{2 \cdot a \cdot b}{(a + b)}$
Triangular (de lado a)	$\frac{a^2 \sqrt{3}}{4}$	$3 \cdot a$	$\frac{a\sqrt{3}}{12}$	$\frac{a\sqrt{3}}{3}$

Fonte: elaborada pelo autor.



Exemplificando

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 $a = 30\text{ cm}$ e $b = 15\text{ cm}$?

A área é calculada por:

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

O perímetro molhado é dado por:

$$P = 2(a + b) = 2(30 + 15) = 90 \text{ cm}$$

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:

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

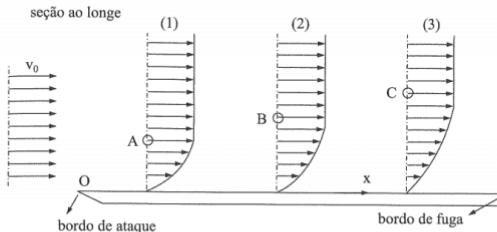
Camada limite: placa plana e conduto forçado

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, que é inserida paralelamente ao escoamento.

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

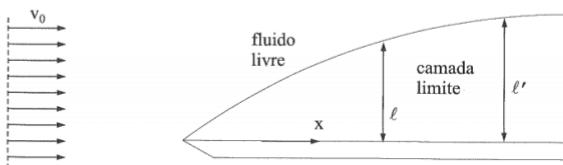


Fonte: Brunetti (2008, p. 165).

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 x , percebe-se que o gradiente de velocidade dV/dy diminui, devido ao crescimento da região em 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 inviscido 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 $\ell = f(\text{Re}_x)$, sendo que o número de Reynolds para a placa plana é dado por:

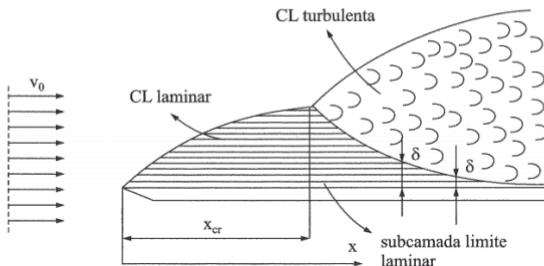
$$\text{Re}_x = \frac{\rho \cdot V_0 \cdot x}{\mu} = \frac{V_0 \cdot x}{\nu}$$

Verifica-se que para $\text{Re}_x < 5 \cdot 10^5$, 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.

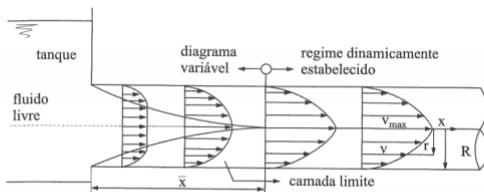
Figura 2.11 | Desenho esquemático do surgimento da camada limite turbulenta



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 \bar{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 inviscido 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 \bar{x} é dado por:

$$\frac{\bar{x}}{D} \approx 0,06 \cdot \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$$

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

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

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 calcularmos 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.

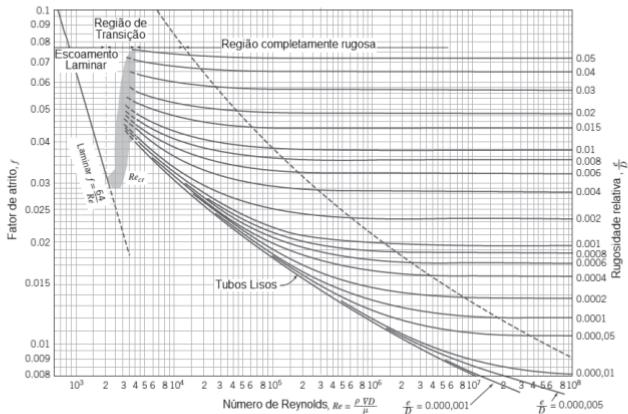
Portanto, é importante conhecermos e compreendermos o fator de atrito de Darcy f , a fim de calcularmos a perda de carga. Tem-se que o fator de atrito de Darcy f é uma função do número de Reynolds e da rugosidade relativa da parede interna do conduto.

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:

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

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.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{e/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re_D \cdot \sqrt{f}} \right)$$

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 $Re \leq 10^5$:

$$f = \frac{0,316}{Re_D^{0,25}}$$

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 $0,3155 \text{ l/s}$. Dados da água: $v = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Primeiramente, calculamos o número de Reynolds, a fim de decidir qual formulação utilizaremos no cálculo do comprimento de entrada \bar{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:

$$Re_D = \frac{(Q/A) \cdot D}{v} = \frac{0,3155 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{0,0001327 \text{ m}^2} \cdot \frac{0,013 \text{ m}}{10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 30.900,54$$

Analizando o número de Reynolds, tem-se que o escoamento é turbulento. Portanto, o comprimento de entrada \bar{x} é dado por:

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

Finalmente:

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

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 D . O escoamento tem velocidade 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

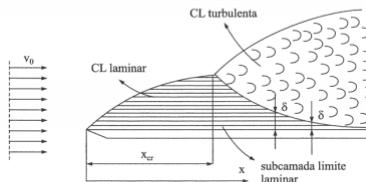
1. Água escoa com velocidade de 4 m/s através de um conduto fechado retangular de área de seção transversal de lados $a = 10\text{ cm}$ e $b = 300\text{ mm}$. Calcule número de Reynolds para esse escoamento. Dados da água: $\nu = 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$.

Com base no texto assinale a alternativa correta.

- a) $\text{Re} = 4,0 \cdot 10^5$.
- b) $\text{Re} = 12 \cdot 10^5$.
- c) $\text{Re} = 6,0 \cdot 10^5$.
- d) $\text{Re} = 1,2 \cdot 10^5$.
- e) $\text{Re} = 0,3 \cdot 10^5$.

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: $\rho = 1,21\text{ kg/m}^3$ e $\mu = 1,81 \times 10^{-5}\text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$)



Fonte: Brunetti (2008, p. 166).

Com base no texto assinale a alternativa correta.

- a) $X_{cr} = 0,50\text{ m}$.
- b) $X_{cr} = 0,75\text{ m}$.
- c) $X_{cr} = 0,15\text{ m}$.
- d) $X_{cr} = 0,03\text{ m}$.
- e) $X_{cr} = 1,26\text{ m}$.

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 conduto pode ser considerado como liso.

Dados da água: $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$.

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. Tem-se 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:

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



Assimile

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:

$$f_{\text{laminar}} = \frac{64}{Re_D}$$

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

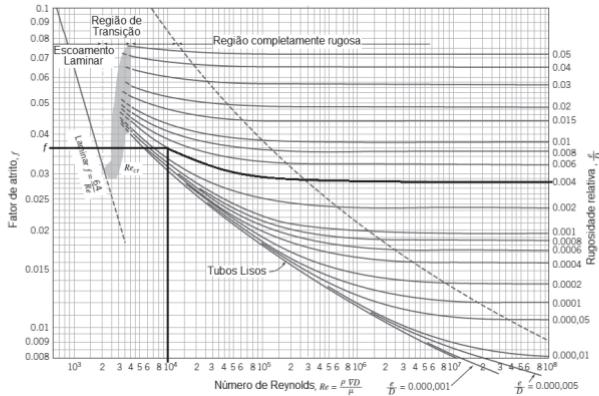
Nesta seção, mostraremos mais detalhadamente como o diagrama de Moody é utilizado no cálculo do fator de atrito de Darcy. Para isso, utilizaremos alguns valores numéricos para exemplificar a utilização do diagrama.



Exemplificando

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 intersecção 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; tés; válvulas abertas ou parcialmente abertas etc.



Refita

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 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:

$$h_l = f \cdot \frac{L_{eq}}{D_h} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$



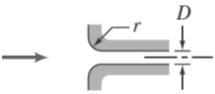
Pesquise mais

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 tés).

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 K é encontrado, por exemplo, pela Tabela 2.3, que apresenta os seguintes tipos de entrada: reentrante, borda viva e arredondada.

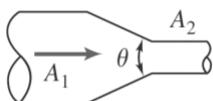
Tabela 2.3 | Coeficiente de forma para vários tipos de entradas de tubulação

Tipo de entrada	Desenho esquemático	Coeficiente de Forma K						
Reentrante		0,78						
Borda Viva		0,5						
Arredondada		$\frac{r/D}{K}$ <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr> <td>0,02</td> <td>0,06</td> <td>$\geq 0,15$</td> </tr> <tr> <td>0,28</td> <td>0,15</td> <td>0,04</td> </tr> </table>	0,02	0,06	$\geq 0,15$	0,28	0,15	0,04
0,02	0,06	$\geq 0,15$						
0,28	0,15	0,04						

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 K em função do ângulo da contração gradual e da relação de áreas dos condutos.

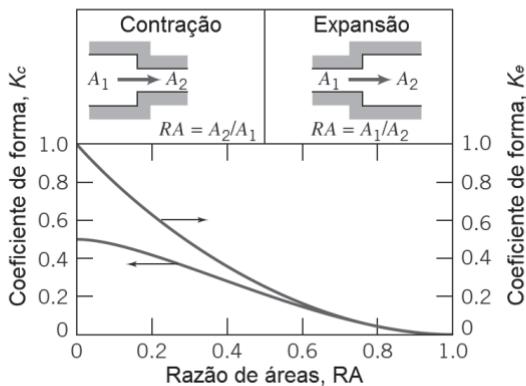
Tabela 2.4 | Coeficiente de forma para contrações graduais

A_2 / A_1	Ângulo θ , dado em graus						
	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_c e para expansões bruscas K_e .

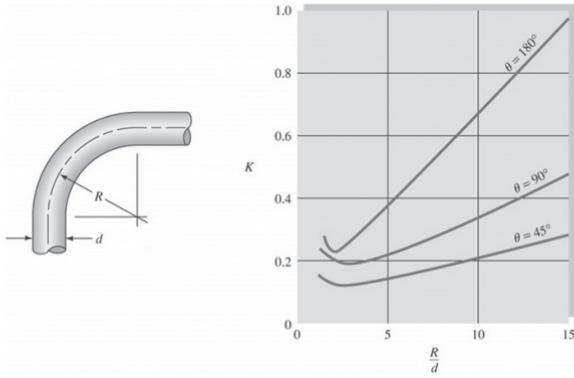
Figura 2.16 | Cálculo de K para contrações e expansões bruscas



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 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 tés é encontrado a partir da Tabela 2.5, que apresenta os valores de 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					
90° normal	0,21	0,20	0,19	0,16	0,14				
90° raio longo	2,0	1,5	0,95	0,64	0,50	0,39	0,30	0,26	0,21
180° normal	1,0	0,72	0,41	0,23	0,40	0,30	0,19	0,15	0,10
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).

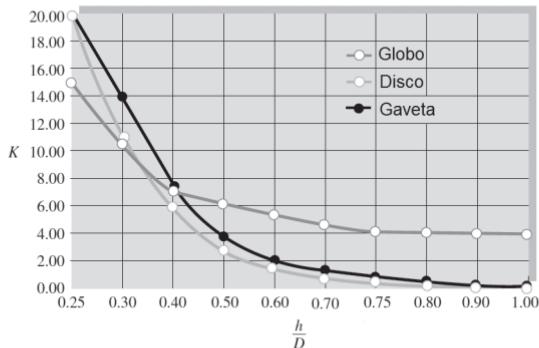
Tabela 2.6 | Coeficiente de forma para vários tipos de válvulas totalmente abertas

Diâmetro nominal, pol.									
	Rosqueada				Flangeada				
	1/2	1	2	4	1	2	4	8	20
Cotovelos	14	8,2	6,5	5,7	13	8,5	6,0	5,8	5,5
45° normal	0,3	0,24	0,16	0,11	0,8	0,35	0,16	0,07	0,03
90° normal	5,1	2,9	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
90° raio longo	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.

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

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

Com os valores de Re_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.

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

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

A perda de carga total do escoamento é dada por:

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

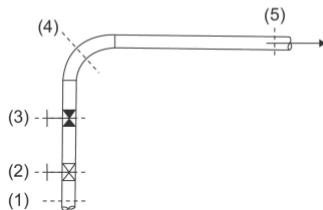
Avançando na prática

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:

$$h_{p1,5} = 0,025 \cdot \frac{(50 \text{ m} + 20,945 \text{ m})}{0,05 \text{ m}} \cdot \frac{(2 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} = 7,23 \text{ m}$$

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.

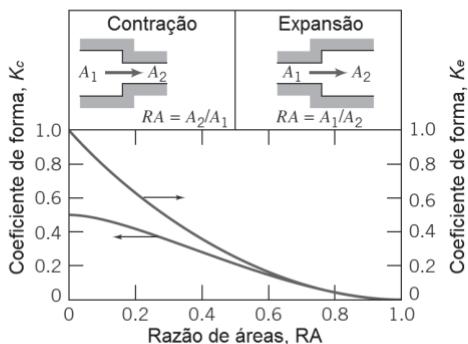
Qual a perda de carga localizada em uma entrada de borda viva ($K = 0,5$) cuja velocidade do escoamento é de $4\text{ m} / \text{s}^2$?

Com base no texto, assinale a alternativa correta:

- a) 0,1 m.
- b) 0,2 m.
- c) 0,3 m.
- d) 0,4 m.
- e) 0,5 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 $5\text{ m} / \text{s}^2$?



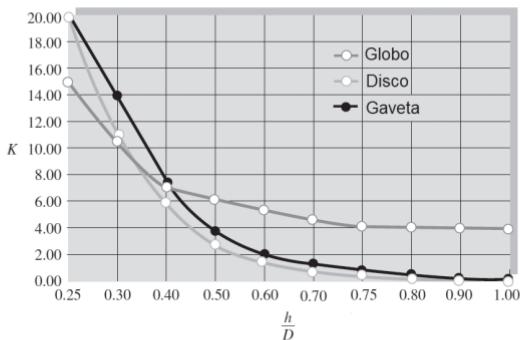
Fonte: adaptada de Fox, Pritchard e McDonald (2013, p. 318).

Com base no texto, assinale a alternativa correta:

- a) 0,1 m.
- b) 0,2 m.
- c) 0,3 m.
- d) 0,4 m.
- e) 0,5 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 $5\text{ m} / \text{s}^2$?



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, Howard 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.

Introdução à transferência de calor

Convite ao estudo

Caro aluno, prosseguindo nosso estudo dos Fenômenos de Transporte, nesta unidade de ensino, estudaremos os três tipos de processos de transferência de calor existentes: a condução, a convecção e a radiação térmica. Na Unidade 1, estudamos a estática e a cinemática dos fluidos, ou seja, o comportamento dos fluidos em repouso e em movimento, respectivamente, e na Unidade 2, estudamos 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. Nesta unidade, veremos que a condução é um processo de transferência de calor que ocorre em um meio estacionário (sólido ou fluido estático) quando existir uma diferença de temperatura nesse meio. A convecção ocorre entre a superfície de um meio estacionário e um fluido em movimento, a partir de uma diferença de temperatura entre eles. E a radiação térmica ocorre através de ondas eletromagnéticas, ou seja, não necessita de um meio material para ocorrer. Tem-se que todas as superfícies a uma temperatura não nula emitem radiação térmica. Portanto, nota-se que o projeto térmico de um equipamento ou de um setor industrial é muito importante, pois os sistemas térmicos estão presentes em vários processos de produção de toda e qualquer indústria moderna.

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 os tipos de transferência de calor por condução, convecção e radiação, a fim de analisar um trocador de calor.

O contexto de aprendizagem utilizado como situação da realidade profissional (SR) aqui proposta é focado em uma empresa fabricante de trocadores de calor, que contratou você, aluno, como projetista, que atuará como líder responsável pelo projeto e desenvolvimento de sistemas térmicos. Para atingir os objetivos desta unidade, você deve estar apto a analisar o circuito térmico de um sistema de dissipação de calor de um circuito integrado, formado por uma base de alumínio e um chip de silício, separados por uma junta de epóxi; calcular a velocidade do escoamento fluido para realizar a dissipação de calor do circuito integrado e a projetar um trocador de calor de casco e tubo, utilizado para resfriar o óleo lubrificante de uma turbina a gás.

Para isso, serão tratados nas seções desta unidade: a Lei de Fourier, a condutividade térmica dos materiais, a condução unidimensional em regime estacionário, o conceito da resistência térmica, a lei de Newton do resfriamento, as camadas-limite de convecção, os coeficientes convectivos local e médio, o escoamento laminar e turbulento, a lei de Stefan-Boltzmann, os tipos de trocadores de calor e a análise de trocadores de calor.

Está preparado para esses grandes desafios? Vamos lá!

Seção 3.1

Introdução à condução

Diálogo aberto

Caro aluno, a transferência de calor é um ramo da Engenharia que abrange praticamente todas as áreas de atuação dos tecnólogos e dos engenheiros, como a mecânica, a química, a eletrônica, a computação, a biomédica etc. Situações-problema como o projeto de uma turbina a gás, o estudo da eficiência de uma célula de combustível (que é um reator eletroquímico), o resfriamento de componentes eletrônicos e os avanços nos procedimentos de cirurgias a laser e criocirurgias e nos tratamentos de quimioterapia, entre outros, são exemplos da importância da transferência de calor no avanço tecnológico e na sociedade em geral.

Tem-se que a condução é um processo de transferência de calor extremamente importante, não só em sistemas de engenharia, mas também na natureza. A análise do circuito térmico de um sistema de dissipação de calor tem grande importância em várias situações da realidade prática profissional. Os princípios da condução são utilizados, por exemplo, no dimensionamento do sistema de isolamento térmico de uma tubulação de transporte de vapor, utilizado no projeto de uma instalação industrial.

Assim, o contexto de aprendizagem utilizado como situação da realidade profissional (SR) proposta nesta unidade é focado em uma empresa fabricante de trocadores de calor, que contratou você, aluno, como projetista, que atuará como líder responsável pelo projeto e desenvolvimento de sistemas térmicos.

Na situação-problema (SP) desta seção, você, analisará o circuito térmico de um sistema de dissipação de calor de um circuito integrado, formado por uma base de alumínio e um chip de silício, separados por uma junta de epóxi, a fim de que a temperatura de trabalho do chip de silício não exceda a máxima temperatura permitida, mantendo a sua integridade.

Para isso, devemos conhecer e compreender a Lei de Fourier, a condutividade térmica dos materiais, a condução unidimensional em regime estacionário e o conceito da resistência térmica, a fim de

aplicá-los na solução da situação-problema proposta.

Está preparado para esse novo desafio? Bons estudos!

Não pode faltar

Caro aluno, a transferência de calor é a ciência que estuda os mecanismos físicos que fundamentam os tipos de processos (também chamados de modos) de transferência de calor: a condução, a convecção e a radiação térmica. A condução é um processo de transferência de calor que ocorre em um meio estacionário (sólido ou fluido estático) quando existir uma diferença de temperatura nesse meio. A convecção ocorre entre a superfície de um meio estacionário e um fluido em movimento, a partir de uma diferença de temperatura entre eles. E a radiação térmica ocorre através de ondas eletromagnéticas, ou seja, não necessita de um meio material para ocorrer.

No entanto, o que é transferência de calor? Como essa transferência ocorre? Tem-se que energia pode ser transferida de um sistema para outro, através de interações, que podem ser denominadas trabalho e calor.



Assimile

A transferência de calor, ou calor, é a energia térmica que está em trânsito devido a uma determinada diferença de temperatura finita entre dois sistemas. A forma como essa transferência de calor ocorre dependerá do tipo de processo de calor que está ocorrendo.

O foco do estudo desta seção é a condução. É intuitivo pensarmos em movimentos atômicos e moleculares quando tratamos desse modo de transferência de calor. Portanto, a condução pode ser definida como a transferência de energia de partículas mais energéticas para partículas menos energéticas, devido a interações entre essas partículas. Chamamos de difusão de energia a transferência líquida de energia a partir do movimento molecular aleatório das moléculas.

Lei de Fourier

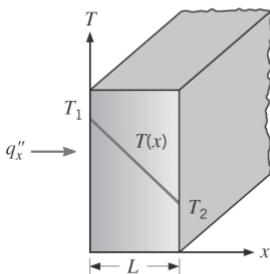
A partir dessa lei fenomenológica, é possível quantificar o processo de transferência de calor por condução em termos de uma equação

de taxa, ou seja, é possível determinar a quantidade de energia que é transferida por condução por unidade de tempo. Para a parede plana unidimensional sem geração de energia, mostrada na Figura 3.1, que apresenta uma distribuição linear de temperatura entre T_1 e T_2 , a Lei de Fourier pode ser escrita da seguinte forma:

$$q_x'' = -k \cdot \frac{dT}{dx}$$

Em que q_x'' é o fluxo térmico, dado em W/m^2 , que representa a taxa de transferência de calor por condução na direção x por unidade de área de seção transversal, perpendicular à direção na qual ocorre a transferência de calor. O termo k é a condutividade térmica, dada em $W/m \cdot K$, que representa uma propriedade de transporte que é uma característica do material do meio. O termo dT/dx representa o gradiente de temperatura na direção na qual ocorre a transferência de calor. Devido ao fato de o calor ser transferido na direção da temperatura maior para a menor, temos um sinal negativo na equação transferência de calor por condução.

Figura 3.1 | Transferência de calor por condução em uma parede plana



Fonte: Incropora et al. (2013, p. 3).

Para uma condição de regime estacionário, ou seja, na qual não existe variação de propriedades e condições em relação ao tempo, devido ao fato da distribuição de temperatura ter sido modelada como linear, o gradiente de temperatura é dado por:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L}$$

Em que T_1 é a temperatura da superfície do lado esquerdo da figura, T_2 é a temperatura da superfície do lado direito da figura e L é a espessura da parede plana. Portanto, a Lei de Fourier pode ser reescrita da seguinte forma:

$$q_x'' = -k \cdot \frac{T_2 - T_1}{L} = k \cdot \frac{T_1 - T_2}{L} = k \cdot \frac{\Delta T}{L}$$

Para calcularmos a taxa de transferência de calor, partimos da definição que o fluxo é a taxa de transferência de calor por unidade de área. Portanto:

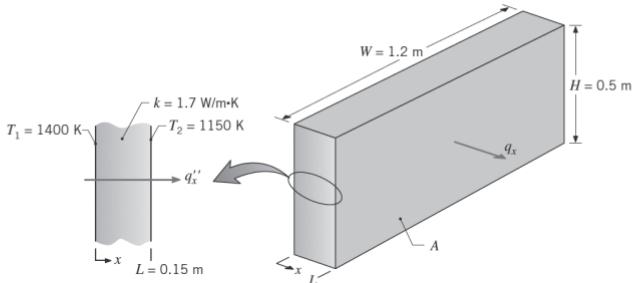
$$q_x = \frac{q_x''}{A} \rightarrow q_x = q_x'' \cdot A$$



Exemplificando

Nesse exercício, calcularemos a taxa de transferência de calor perdida através da parede mostrada na Figura 3.2, que mede 0,5 m por 1,2 m. A condutividade térmica da parede é $1,7 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ e as temperaturas das paredes internas e externas são $T_1 = 1400 \text{ K}$ e $T_2 = 1150 \text{ K}$, respectivamente. Consideraremos condução unidimensional em regime estacionário com condutividade térmica constante.

Figura 3.2 | Desenho esquemático do exercício proposto



Fonte: Incropera et al. (2013, p. 4).

O fluxo térmico é calculado pela Lei de Fourier:

$$q_x'' = k \cdot \frac{\Delta T}{L} = 1,7 \text{ W/(m}\cdot\text{K}) \cdot \frac{250 \text{ K}}{0,15 \text{ m}} = 2833 \text{ W/m}^2$$

A taxa de transferência de calor perdida através da parede é calculada por:

$$q_x = q_x'' \cdot A = 2833 \text{ W/m}^2 \cdot (0,5 \text{ m} \cdot 1,2 \text{ m}) = 1700 \text{ W}$$

O objetivo principal de se analisar a condução de calor é determinar o perfil de temperatura em um meio, resultante das condições impostas em suas fronteiras, conhecendo como a temperatura varia em relação à posição. Após essa análise, o fluxo de calor pode ser determinado pela Lei de Fourier. Chamamos as condições impostas nas fronteiras de condições de contorno, que

são expressas por equações matemáticas. As condições de contorno em $x=0$ para a condução unidimensional em uma parede plana são mostradas no Quadro 3.1, a seguir. A primeira condição simula um processo de mudança de fase, como uma ebulição ocorrendo na superfície da parede. A segunda condição simula um aquecimento na parede, como a utilização de um aquecedor elétrico na forma de uma fina película na superfície. A terceira condição corresponde a um resfriamento ou aquecimento por convecção na superfície da parede, em que h é o coeficiente de transferência de calor por convecção e T_∞ é a temperatura do meio.

Quadro 3.1 | Condições de contorno para a condução unidimensional em uma parede plana

Condição de contorno	Equação	Desenho esquemático
Temperatura da superfície constante	$T(0, t) = T_s$	
Fluxo térmico na superfície constante: fluxo diferente de zero	$\dot{q}_s'' = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big _{x=0}$	
Fluxo térmico na superfície constante: superfície adiabática	$\frac{\partial T}{\partial x} \Big _{x=0} = 0$	
Convecção na superfície	$\dot{q}_{conv}'' = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big _{x=0}$	

Fonte: adaptado de Incropera et al. (2013, p. 49).

O fluxo de calor por convecção é calculado pela lei de Newton do resfriamento:

$$\dot{q}_{conv}'' = h \cdot (T_s - T_\infty)$$

Condutividade térmica dos materiais

A partir da Lei de Fourier, a condutividade térmica nos indica a taxa de energia que é transferida por difusão, ou seja:

$$k_x = \frac{q_x''}{dT / dx}$$

Para materiais isotrópicos, a condutividade térmica independe da direção da transferência, portanto, $k_x = k_y = k_z = k$.

Analizando a equação que define a condutividade térmica, nota-se que, para um dado gradiente de temperatura, aumentando-se a condutividade térmica do material, aumenta-se o fluxo térmico por condução. Comparativamente, sólidos têm valores de condutividade térmica maiores que os líquidos, que têm valores maiores que os gases.



Pesquise mais

Para conhecer e compreender a dependência da condutividade térmica em relação à temperatura para materiais sólidos metálicos e não metálicos, sugerimos a leitura do livro de Incropera et al. (2013, p. 39-43). O apêndice do livro mostra os valores de condutividade térmica para materiais utilizados em engenharia nas tabelas A.1, A.2 e A.3 (p. 588-599).

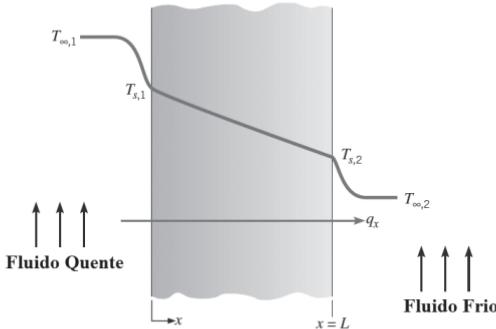
Fonte: INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

Os isolantes térmicos são constituídos de materiais de baixa condutividade térmica, como fibras, pós ou flocos, em que o material sólido se encontra disperso em um espaço vazio. Os isolantes rígidos são feitos de materiais vítreos ou plásticos e os isolantes refletivos são feitos de várias camadas finas e paralelas de lâminas de alta refletividade, que refletem a radiação térmica.

Condução unidimensional em regime estacionário

A Figura 3.3 mostra um problema comum em engenharia, que é a transferência de calor entre dois fluidos a temperaturas diferentes, separados por uma parede plana.

Figura 3.3 | Transferência de calor através de uma parede plana



Fonte: adaptada de Incropera et al. (2013, p. 63).

A transferência de calor ocorre por convecção do fluido quente à temperatura $T_{\infty,1}$ para a superfície esquerda da parede à temperatura $T_{s,1}$ por condução através da parede e por convecção da superfície direita da parede à temperatura $T_{s,2}$ para o fluido frio à temperatura $T_{\infty,2}$. A distribuição de temperatura na parede é encontrada através da Lei de Fourier, a partir da aplicação da condição de contorno na superfície. A solução geral para a condução unidimensional em regime estacionário em uma parede plana sem geração de energia é dada por:

$$T(x) = C_1 \cdot x + C_2$$

Em que C_1 e C_2 são constantes de integração. Aplicando as condições de contorno $T(0) = T_{s,1}$ e $T(L) = T_{s,2}$ em $x = 0$ e $x = L$, temos que, substituindo na solução geral, encontramos:

$$C_2 = T_{s,1} \text{ e } C_1 = \frac{T_{s,2} - T_{s,1}}{L}$$

Finalmente, encontramos que a distribuição de temperatura é:

$$T(x) = (T_{s,2} - T_{s,1}) \cdot \frac{x}{L} + T_{s,1}$$

Portanto, temos que a temperatura varia linearmente com x para a condução unidimensional em regime estacionário em uma parede plana com condutividade térmica constante e sem geração de energia. Para esse problema, o fluxo térmico é constante, independente de x , calculado por:

$$q''_x = k \cdot \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{L}$$



Caro aluno, e se tivéssemos uma geração de energia térmica no interior da parede? Como seria calculado o fluxo de calor por condução? A distribuição de temperatura na parede seria linear? Podemos considerar que a geração de energia térmica ocorre devido a uma conversão de uma outra forma de energia em energia térmica. Exemplos: aquecimento ôhmico, resistivo ou de Joule; reação nuclear; reações químicas exotérmicas e endotérmicas etc.

Conceito da resistência térmica

Tem-se que, para a condução unidimensional em regime estacionário em uma parede plana com condutividade térmica constante e sem geração de energia, existe uma analogia entre a difusão de calor e o conceito de carga elétrica. A condução de eletricidade está ligada a uma resistência elétrica. Da mesma forma, associaremos uma resistência térmica à condução de calor. Definimos resistência como sendo uma razão entre uma força motriz e uma correspondente taxa de transferência. Para o conceito de condução de eletricidade, temos:

$$\Delta V = R_e \cdot I \rightarrow R_e = \frac{V_1 - V_2}{I}$$

A partir da equação da taxa de transferência de calor por condução unidimensional, definimos a resistência térmica para a condução em uma parede plana:

$$R_{t,cond} = \frac{T_{S,1} - T_{S,2}}{q_x} = \frac{L}{k \cdot A}$$

É notável, portanto, a analogia entre os conceitos de difusão de calor e de carga elétrica. A resistência térmica para a transferência de calor por convecção em uma superfície é dada por:

$$R_{t,conv} = \frac{T_s - T_\infty}{q_{conv}} = \frac{1}{h \cdot A}$$

O intuito dessa teoria de resistência térmica é representar o problema mostrado na Figura 3.3 por um circuito térmico equivalente, análogo a um circuito elétrico, como mostra a Figura 3.4:

Figura 3.4 | Circuito térmico equivalente para a transferência de calor através de uma parede plana



Fonte: Incropera et al. (2013, p. 63).

A taxa de transferência de calor pode ser determinada resolvendo-se separadamente cada elemento do circuito:

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{s,1}}{1/(h_1 \cdot A)} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{L/(k \cdot A)} = \frac{T_{s,2} - T_{\infty,2}}{1/(h_2 \cdot A)}$$

Outra forma de resolvemos o problema é utilizando o conceito de resistência térmica total, que, para um circuito em série, é dada pela soma de todas as resistências condutivas e convectivas do circuito térmico proposto:

$$R_{total} = \frac{1}{h_1 \cdot A} + \frac{L}{k \cdot A} + \frac{1}{h_2 \cdot A}$$

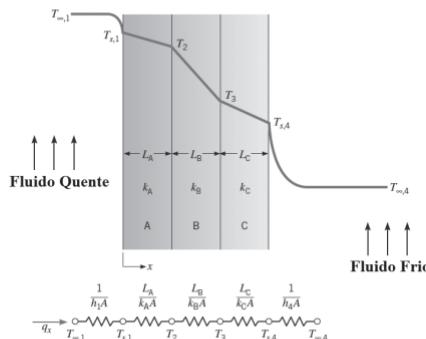
Finalmente, a taxa de transferência de calor pode ser determinada por:

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{total}}$$

A parede composta

O conceito de resistência térmica total é muito utilizado em problemas mais complexos, como o problema da parede composta, mostrado na Figura 3.5, em que temos várias resistências térmicas em série, devido a camadas de parede de vários materiais com diferentes condutividades térmicas.

Figura 3.5 | Desenho esquemático e circuito térmico equivalente para a transferência de calor através de uma parede composta



Fonte: adaptada de Incropera et al. (2013, p. 65).

A taxa de transferência de calor unidimensional para a parede composta da Figura 3.5 é:

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{R_{total}}$$

Novamente, para a parede composta, a taxa de transferência de calor pode ser determinada resolvendo-se separadamente cada elemento do circuito:

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{S,1}}{1/(h_1 \cdot A)} = \frac{T_{S,1} - T_2}{L_A / (k_A \cdot A)} = \frac{T_2 - T_3}{L_B / (k_B \cdot A)} = \dots$$

Em paredes compostas, é conveniente utilizarmos o conceito de coeficiente global de transferência de calor U , que é definido através de uma analogia com a Lei de Newton do resfriamento:

$$q_x = U \cdot A \cdot \Delta T$$

Em que ΔT é a diferença de temperatura global $T_{\infty,1} - T_{\infty,4}$. O coeficiente global de transferência de calor U se relaciona com a resistência térmica total a partir de:

$$U \cdot A = \frac{1}{R_{total}} \rightarrow U = \frac{1}{R_{total} \cdot A}$$

Portanto:

$$R_{total} = \frac{\Delta T}{q} = \frac{1}{U \cdot A}$$



Pesquise mais

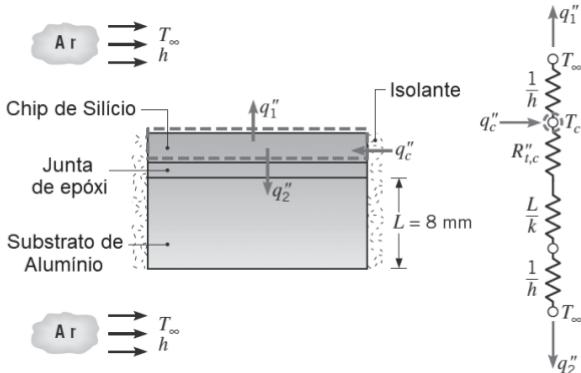
Caro aluno, para aprofundar os seus conhecimentos sobre a condução de calor, sugerimos que você pesquise sobre os seguintes assuntos: resistência térmica de contato; condução de calor unidimensional em sistemas radiais (cilíndrico e esférico); condução de calor com geração de energia térmica e superfícies estendidas (aletas).

Sem medo de errar

Retomando o contexto de aprendizagem, temos uma empresa fabricante de trocadores de calor, que contratou você, aluno, como projetista, que atuará como líder responsável pelo projeto e desenvolvimento de sistemas térmicos. Na situação-problema (SP)

desta seção, analisaremos o circuito térmico de um sistema de dissipação de calor de um circuito integrado, formado por uma base de alumínio e um chip de silício, separados por uma junta de epóxi, como mostra a Figura 3.6.

Figura 3.6 | Desenho esquemático e circuito térmico equivalente



Fonte: adaptada de Incropera et al. (2013, p. 69).

Para que a temperatura de trabalho do chip de silício não exceda a máxima temperatura permitida, mantendo a sua integridade, analisaremos o circuito térmico equivalente do problema proposto na figura. Temos que o chip de silício recebe um fluxo de calor \dot{q}_c'' , que deve ser dissipado através das superfícies superior e inferior do sistema, que estão em contato com uma corrente de ar.

Realizando um balanço de energia no chip de silício, temos que o circuito térmico é escrito por:

$$\dot{q}_c'' = \dot{q}_1'' + \dot{q}_2'' = \frac{T_c - T_\infty}{1/h} + \frac{T_c - T_\infty}{R_{t,c}'' + L/k + 1/h}$$

Em que $R_{t,c}''$ é a resistência térmica na interface entre o chip de silício e o alumínio, que são separados por uma junta de epóxi. Portanto, analisando o circuito térmico equivalente do problema proposto, temos que a temperatura do chip será:

$$T_c = T_\infty + \dot{q}_c'' \left[h + \frac{1}{R_{t,c}'' + L/k + 1/h} \right]^{-1}$$

Avançando na prática

Distribuição de temperatura não linear

Descrição da situação-problema

Vamos supor que a distribuição de temperatura ao longo de uma parede plana seja não linear. A temperatura em qualquer ponto da parede é calculada pela seguinte equação:

$$T(x) = 225 - 180 \cdot x + 10 \cdot x^2$$

Como podemos calcular o fluxo térmico a partir da Lei de Fourier, se tivermos condução unidimensional em regime estacionário na parede plana, que tem condutividade térmica constante? Qual é o fluxo térmico em $x=0$ e $x=L$?

A Lei de Fourier é dada por:

$$\dot{q}_x'' = -k \cdot \frac{dT}{dx}$$

Resolução da situação-problema

Para resolver essa nova situação-problema, derivaremos a equação da distribuição de temperatura em relação a x :

$$\frac{dT}{dx} = \frac{d}{dx}(225 - 180 \cdot x + 10 \cdot x^2) = -180 + 20 \cdot x$$

Portanto, o fluxo térmico para a condução unidimensional em regime estacionário na parede plana que tem uma distribuição de temperatura não linear é calculado por:

$$\dot{q}_x'' = -k \cdot (-180 + 20 \cdot x)$$

Finalmente:

$$\dot{q}_x'' = 180 \cdot k - 20 \cdot x \cdot k$$

O fluxo térmico em $x=0$ e $x=L$ é dado por:

$$\dot{q}_x'' = 180 \cdot k$$

O fluxo térmico em $x=0$ e $x=L$ é calculado por:

$$\dot{q}_x'' = 180 \cdot k - 20 \cdot L \cdot k$$

Faça valer a pena

1. A condutividade térmica de uma folha de isolante de alumínio extrudado rígido é igual a $0,029 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$. Para uma determinada aplicação, a diferença de temperaturas medidas entre as superfícies de uma folha com 20 mm de espessura deste material é $T_1 - T_2 = 10 \text{ K}$. Qual é a taxa de transferência de calor através de uma folha de isolante com dimensões 2 m x 2 m?

Com base no texto, assinale a alternativa correta:

- a) 32 W.
- b) 44 W.
- c) 58 W.
- d) 65 W.
- e) 73 W.

2. A câmara de um freezer é um espaço cúbico com 2 m de lado. Considere o fundo como sendo perfeitamente isolado. Qual a espessura mínima requerida do isolante térmico à base de espuma de poliestireno ($K = 0,030 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$) que deve ser aplicado nas paredes do topo e das laterais do freezer, para garantir que a taxa que entra nele seja inferior a 500 W, quando as suas superfícies interna e externa se encontram a -10°C e 35°C , respectivamente?

Com base no texto, assinale a alternativa correta:

- a) 11 mm.
- b) 54 mm.
- c) 4,2 cm.
- d) 7,6 cm.
- e) 0,033 m.

3. Uma taxa de calor de 3 kW é conduzida através de um material isolante, utilizado em um forno industrial, com área de seção reta de 10 m^2 e espessura de $2,5 \text{ cm}$. Se a temperatura da superfície interna é de 415°C e a condutividade térmica do material é de $0,02 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$, qual a temperatura da superfície externa? Assinale a alternativa correta:

- a) 30°C .
- b) 40°C .
- c) 50°C .
- d) 60°C .
- e) 70°C .

Seção 3.2

Introdução à convecção

Diálogo aberto

Caro aluno, a transferência de calor por convecção é um modo bastante utilizado na indústria e no nosso dia a dia, tendo, portanto, grande importância em várias situações da realidade prática profissional e cotidiana. Quem nunca utilizou um ventilador para se resfriar, em um dia muito quente de verão? Outro exemplo de utilização da convecção no cotidiano é o simples fato de esquentarmos água em uma panela no fogão: esse processo envolve o conceito de ebulição, que é uma das formas de troca de calor por convecção com mudança de fase. Tem-se também que a condensação de vapor na superfície externa de um copo de suco gelado também envolve a troca de calor por convecção com mudança de fase. Na indústria, temos inúmeros exemplos de utilização da convecção: nos processos de fabricação mecânica, nos processos químicos e farmacêuticos, na secagem de alimentos, no resfriamento de equipamentos eletrônicos, nos sistemas de refrigeração e condicionamento de ar, nas máquinas térmicas etc.

Assim, o contexto de aprendizagem utilizado como situação da realidade profissional (SR) proposta nesta unidade, é focado em uma empresa fabricante de trocadores de calor, que contratou você, aluno, como projetista, que atuará como líder responsável pelo projeto e desenvolvimento de sistemas térmicos.

Na situação-problema (SP) desta seção, você, calculará a taxa de resfriamento necessária para manter o sistema de um circuito integrado a uma temperatura de trabalho abaixo do limite máximo permitido, garantindo a integridade dos equipamentos que compõem o circuito integrado utilizado na SP da seção anterior. Qual é a influência da velocidade do escoamento fluido no resfriamento do circuito integrado? Quais são as variáveis importantes nesse processo de resfriamento?

Para respondermos a essas perguntas e solucionarmos a situação-problema proposta, devemos conhecer e compreender a Lei de Newton do resfriamento, o conceito das camadas-limite

de convecção, os coeficientes convectivos local e médio, e o escoamento laminar e turbulento.

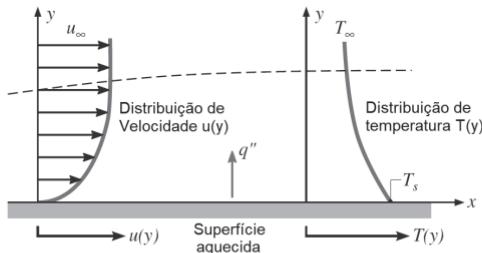
Está preparado para esse novo desafio? Bons estudos!

Não pode faltar

O foco de estudo desta seção é o modo de transferência de calor por convecção, que ocorre entre a superfície de um meio estacionário e um fluido em movimento, a partir de uma diferença de temperatura entre eles. Existem dois mecanismos de transferência de energia envolvidos na convecção de calor: a difusão e a advecção. A difusão, apresentada anteriormente na definição do modo de transferência de calor por condução, é o mecanismo de transferência de energia que ocorre devido ao movimento atômico e molecular aleatório das partículas de fluido, considerando-se o movimento microscópico das partículas de fluido. A advecção é o mecanismo de transferência de energia que ocorre devido ao movimento global do fluido, ou seja, considerando-se o movimento macroscópico do fluido.

Considerando o escoamento de um fluido sobre uma placa plana com sua superfície aquecida, conforme mostra a Figura 3.7, nota-se o desenvolvimento de uma região no fluido na qual a velocidade varia desde zero, no contato com a superfície, até u_∞ , que representa a velocidade da corrente livre. Como visto anteriormente, essa região é conhecida como camada-limite hidrodinâmica, ou de velocidade. De maneira análoga, se as temperaturas da superfície e do fluido forem diferentes, existe a formação de uma região chamada de camada-limite térmica, na qual existe um gradiente de temperaturas, desde a temperatura da superfície T_s até a temperatura do escoamento livre T_∞ .

Figura 3.7 | Desenvolvimento da camada-limite na convecção de calor

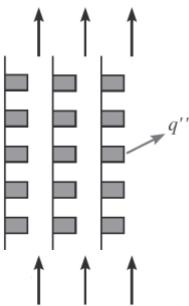


Fonte: adaptada de Incropera et al. (2013, p. 5).

A difusão é dominante na região próxima à superfície aquecida, pois a velocidade do fluido é baixa nessa região, sendo que na interface, devido à condição de não deslizamento (princípio da aderência), temos somente o mecanismo de difusão, pois a velocidade é nula. A contribuição da advecção ocorre devido ao fato de a espessura da camada-limite aumentar à medida que o escoamento progride em relação ao eixo x.

A convecção de calor pode ser classificada considerando-se a natureza do escoamento fluido. A convecção forçada ocorre quando o escoamento fluido é causado por um meio externo, como um ventilador, uma bomba hidráulica etc. Já na convecção natural, também chamada de convecção livre, temos que o escoamento fluido é induzido por forças de empuxo, que são originadas a partir de diferenças de densidade do fluido, causadas pela variação de temperatura entre as partículas de fluido, devido a um aquecimento (ou resfriamento). Como exemplo, podemos utilizar o resfriamento de uma série de placas de circuito integrado, posicionadas na vertical, que apresentam componentes eletrônicos aquecidos montados em suas superfícies, como mostra a Figura 3.8. As partículas de ar, em contato com os componentes quentes, experimentam um aumento de temperatura, reduzindo, assim, sua densidade. Essas partículas ficam mais leves e as forças de empuxo induzem um movimento vertical ascendente delas, que são substituídas continuamente por partículas de fluido mais frias e, consequentemente, mais densas.

Figura 3.8 | Exemplo de transferência de calor por convecção natural



Fonte: adaptada de Incropera et al. (2013, p. 5).

Normalmente, temos que a energia transferida por convecção é a energia sensível, ou seja, a energia interna do fluido. Todavia, existem processos de convecção em que a energia transferida é a energia latente, que é responsável pela mudança de fase entre os

estados líquido e vapor do fluido. Esses processos são: a ebulação e a condensação. A convecção de calor no processo de ebulação resulta da movimentação do fluido induzida por bolhas de vapor geradas no fundo de uma panela contendo água em ebulação, por exemplo.

Lei de Newton do resfriamento

O fluxo de calor por convecção é dado pela equação a seguir, chamada de Lei de Newton do resfriamento, em que \dot{q} é o próprio fluxo de calor por convecção, dado em W/m^2 , h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, dado em $W/m^2 \cdot K$, T_s é a temperatura da superfície e T_∞ é a temperatura do escoamento, dadas em K :

$$\dot{q}_{conv} = h \cdot (T_s - T_\infty)$$

Nessa forma que a equação foi apresentada, tem-se que o fluxo de calor por convecção é: positivo, se a temperatura da superfície for maior que a temperatura do fluido, e negativo, se a temperatura da superfície for menor que a temperatura do fluido.

O Quadro 3.2 apresenta valores típicos do coeficiente de transferência de calor por convecção. Nota-se que o coeficiente h atinge maiores faixas para a convecção forçada em comparação com a convecção natural. Além disso, o coeficiente h atinge um valor até cinco vezes maior do que a convecção forçada, para o caso de termos uma mudança de fase (ebulação ou condensação) ocorrendo.

Quadro 3.2 | Valores típicos do coeficiente de transferência de calor por convecção

Processo	$h [W/m^2 \cdot K]$
Convecção natural - gases	2 a 25
Convecção natural - líquidos	50 a 1.000
Convecção forçada - gases	25 a 250
Convecção forçada - líquidos	100 a 20.000
Ebulição e condensação	2.500 a 100.000

Fonte:adaptado de Incropora et al. (2013, p. 6).

Finalizando, tem-se que os problemas que envolvem a convecção de calor resumem-se à determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção. É sabido que o coeficiente h depende das condições da camada-limite, influenciadas pela geometria da superfície, pela natureza do escoamento e pelas propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido.

As camadas-limite de convecção

O conceito das camadas-limite é de suma importância para o entendimento do mecanismo de transferência de calor por convecção. Já estudamos a camada-limite hidrodinâmica, ou de velocidade, entretanto o foco desta seção é o estudo da camada-limite térmica. Analogamente à transferência de calor por convecção, temos também a transferência de massa por convecção, sendo que a camada-limite que descreve esse processo é a camada-limite de concentração.

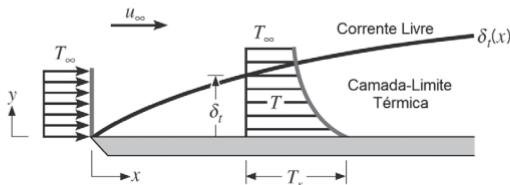


Assimile

A camada-limite térmica se desenvolve a partir de uma diferença de temperatura entre a temperatura do fluido na corrente livre e na superfície de um meio estacionário.

Considerando a placa plana isotérmica com sua superfície aquecida, mostrada na Figura 3.9, estudaremos com mais detalhes o desenvolvimento da camada-limite térmica.

Figura 3.9 | Camada-limite térmica em uma placa plana isotérmica



Fonte: adaptada de Incropera et al. (2013, p. 222).

No bordo de ataque, o perfil de temperaturas é uniforme, ou seja, $T(y) = T_{\infty}$. A partícula de fluido que entra em contato com a placa troca calor com a placa até chegar na mesma temperatura dela, momento em que atinge o equilíbrio térmico. A partícula localizada na camada de fluido adjacente troca calor com a partícula de fluido em contato com a placa, e assim sucessivamente, originando um gradiente de temperaturas no fluido. A região onde existe esse gradiente de temperaturas é chamada de camada-limite térmica, com espessura δ_t . Nota-se a partir da Figura 3.9 que, aumentando-se a distância do bordo de ataque da placa, os efeitos da transferência de calor penetram cada vez mais na corrente livre do escoamento, fazendo com que a camada-limite térmica desenvolva-se. Como a diferença de temperaturas ($T_s - T_{\infty}$) para uma placa isotérmica é constante,

tem-se que, enquanto a espessura da camada-limite cresce com o aumento de x , os gradientes de temperatura na camada-limite devem diminuir com o aumento de x .



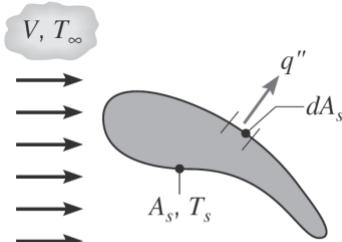
Refita

Se os gradientes de temperatura na camada-limite diminuem com o aumento de x , qual deverá ser o comportamento do fluxo de calor e do coeficiente de transferência de calor por convecção com o aumento de x ? Eles aumentam, diminuem ou não se alteram?

Coeficientes convectivos local e médio

Para definirmos o conceito de coeficiente convectivo médio, utilizaremos a Figura 3.10.

Figura 3.10 | Transferência de calor por convecção em uma superfície arbitrária



Fonte: adaptada de Incropera et al. (2013, p. 224).

Considerando um fluido com velocidade V e com uma temperatura T_{∞} , escoando sobre uma superfície arbitrária com uma área superficial A_s a uma temperatura T_s , como mostra a Figura 3.10, temos que a taxa total de transferência de calor q é obtida pela integração do fluxo local ao longo de toda a superfície:

$$q = \int_{A_s} q'' dA_s$$

Pela Lei de Newton do resfriamento, temos que $q'' = h \cdot (T_s - T_{\infty})$. Portanto:

$$q = (T_s - T_{\infty}) \int_{A_s} h dA_s$$

Definindo um coeficiente convectivo médio \bar{h} para toda a superfície, temos:

$$q = \bar{h} \cdot A_s \cdot (T_s - T_{\infty})$$

Os coeficientes convectivos local e médio estão relacionados a partir da equação:

$$\bar{h} = \frac{1}{A_s} \int_{A_s} h dA_s$$

Finalizando, para uma placa plana, tem-se que o coeficiente convectivo h varia somente com o eixo x, portanto, temos:

$$\bar{h} = \frac{1}{L} \int_0^L h dx$$



Exemplificando

Resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor por convecção h , para o caso de um escoamento sobre uma placa plana isotérmica, sugerem a seguinte relação: $h = C \cdot x^{-1/2}$, em que C é uma constante. Determine o coeficiente de transferência de calor por convecção médio \bar{h} e desenvolva uma expressão que relate os coeficientes convectivos local e médio.

Tem-se que os coeficientes convectivos local e médio estão relacionados a partir da seguinte equação:

$$\bar{h} = \frac{1}{L} \int_0^L h dx$$

Utilizando a relação empírica $h = C \cdot x^{-1/2}$, temos:

$$\bar{h} = \frac{1}{L} \int_0^L (C \cdot x^{-1/2}) dx = \frac{C}{L} \int_0^L x^{-1/2} dx = \frac{C}{L} \cdot 2 \cdot L^{1/2}$$

Portanto, o coeficiente convectivo médio é:

$$\bar{h} = 2 \cdot C \cdot L^{-1/2}$$

Finalmente, a expressão que relaciona os coeficientes convectivos local e médio é:

$$\bar{h} = 2 \cdot h$$

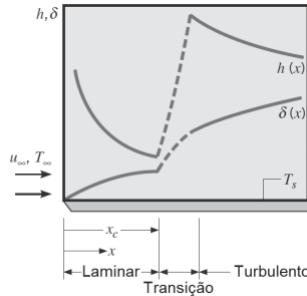
Escoamento laminar e turbulento

As camadas-limite hidrodinâmica, ou de velocidade, para escoamento laminar e para escoamento turbulento já foram estudadas neste livro didático. Portanto, o foco dessa seção é o estudo da camada-limite térmica para o escoamento laminar e para

o escoamento turbulento, pois tem-se que a taxa de transferência de calor por convecção é extremamente influenciada pelo regime de escoamento.

No exemplo de transferência de calor por convecção sobre uma placa plana isotérmica, tem-se que os gradientes de temperatura na camada-limite, o fluxo de calor e o coeficiente de transferência de calor por convecção diminuem com o aumento de x . Tem-se também que a mistura turbulenta promove grandes gradientes de temperatura entre a placa e a partícula adjacente a ela, fazendo com que exista um aumento significativo no coeficiente de transferência de calor por convecção na região de transição, como mostra a Figura 3.11, em que x_c é o ponto em x onde ocorre a transição do regime laminar para o turbulento.

Figura 3.11 | Comportamento de h e δ para o escoamento sobre uma placa plana isotérmica



Fonte: adaptada de Incropera et al. (2013, p. 228).

Nota-se, a partir da figura, que a espessura da camada-limite térmica também aumenta, devido à mistura turbulenta.

Parâmetros adimensionais importantes no estudo da convecção

Existem diversos parâmetros adimensionais utilizados em fenômenos de transporte. Para a mecânica dos fluidos, o parâmetro mais importante é o número de Reynolds.

O intuito de utilizar parâmetros adimensionais é que eles nos permitem utilizar os resultados obtidos em uma superfície submetida a um conjunto de condições convectivas em superfícies geometricamente similares, submetidas a condições totalmente diferentes, como as propriedades do fluido, a velocidade do fluido e o

comprimento característico L .

O número de Nusselt é um parâmetro adimensional muito utilizado para determinarmos o coeficiente de transferência de calor por convecção. Ele indica qual é a relação da convecção com a condução de calor, pois:

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k}$$

Se o número de Nusselt for igual a um, significa que temos somente transferência de calor por condução ocorrendo, ou seja, o fluido está estacionário. Quanto maior for o número de Nusselt, maior será a influência da convecção na transferência de calor, ou seja, maior será o coeficiente de transferência de calor por convecção, o que indica que a velocidade do escoamento aumenta com o aumento do número de Nusselt.

Realizando-se uma análise dimensional, nota-se que o número de Nusselt médio é uma função do número de Reynolds e do número de Prandtl:

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h} \cdot L}{k} = f(\text{Re}_L; \text{Pr})$$

O número de Prandtl é um parâmetro adimensional muito utilizado para determinarmos a relação da espessura das camadas-limite térmica e de velocidade. Portanto, ele indica a relação entre a difusividade viscosa e a difusividade térmica:

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}$$

Em que ν é a viscosidade cinemática, dada em m^2/s , e α é a condutividade térmica, também dada em m^2/s .

Realizando-se uma análise dimensional, nota-se que o número de Prandtl não depende de nenhuma escala de comprimento, ou seja, depende apenas do fluido e de seu estado. Por essa razão, o número de Prandtl é comumente encontrado em tabelas de propriedades, com a viscosidade cinemática e a condutividade térmica.

Existem diversas correlações empíricas para solução de problemas de transferência de calor por convecção para escoamento externo e interno. Considerando-se uma placa plana com escoamento externo paralelo à placa, se o escoamento for laminar, utilizamos a seguinte correlação para calcular o número de Nusselt médio:

$$\overline{Nu}_L = 0,664 \cdot Re_L^{1/2} \cdot Pr^{1/3}$$

Se o escoamento for turbulento, utilizamos a seguinte correlação:

$$\overline{Nu}_L = (0,037 \cdot Re_L^{4/5} - A) \cdot Pr^{1/3}$$

Em que a constante A é dada por: $A = 0,037 \cdot Re_{cr}^{4/5} - 0,664 \cdot Re_{cr}^{1/2}$.



Pesquise mais

Para conhecer mais sobre as correlações empíricas para várias condições de escoamento externo (placa plana em escoamento paralelo com comprimento inicial não aquecido, cilindro em escoamento cruzado e escoamento sobre uma esfera), sugerimos que você pesquise o Capítulo 6 do livro de Incropera et al. (2013, p. 255-282).

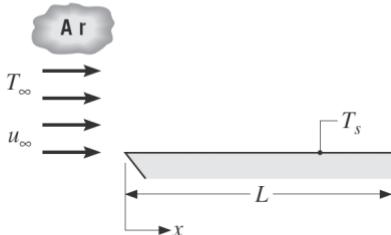
Fonte: INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

Sem medo de errar

Retomando o contexto de aprendizagem, temos uma empresa fabricante de trocadores de calor, que contratou você, aluno, como projetista, que atuará como líder responsável pelo projeto e desenvolvimento de sistemas térmicos. Na situação-problema (SP) desta seção, calcularemos a taxa de resfriamento necessária para manter o sistema de um circuito integrado a uma temperatura de trabalho abaixo do limite máximo permitido, garantindo a integridade dos equipamentos do circuito integrado utilizado na SP da seção anterior.

De acordo com a Figura 3.12, que mostra que o circuito integrado é uma placa plana isotérmica e que o escoamento de ar atinge o bordo de ataque do sistema a uma velocidade U_∞ e uma temperatura T_∞ , o chip de silício tem uma largura L e tem uma temperatura de superfície T_s .

Figura 3.12 | Desenho esquemático do problema proposto



Fonte: adaptada de Incropera et al. (2013, p. 261).

Para determinarmos a taxa de resfriamento, primeiramente calculamos o número de Reynolds do escoamento, em que ν é a viscosidade dinâmica do ar:

$$\text{Re}_L = \frac{u_\infty \cdot L}{\nu}$$

Se o escoamento for laminar, utilizamos a seguinte correlação para o cálculo do número de Nusselt:

$$\overline{Nu}_L = 0,664 \cdot \text{Re}_L^{1/2} \cdot \text{Pr}^{1/3}$$

Se o escoamento for turbulento, utilizamos a seguinte correlação:

$$\overline{Nu}_L = (0,037 \cdot \text{Re}_L^{4/5} - A) \cdot \text{Pr}^{1/3}$$

Em que a constante A é dada por $A = 0,037 \cdot \text{Re}_{cr}^{4/5} - 0,664 \cdot \text{Re}_{cr}^{1/2}$.

O coeficiente convectivo é calculado por:

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_L \cdot k}{L}$$

Finalmente, a taxa de resfriamento necessária para manter o sistema do circuito integrado a uma temperatura de trabalho abaixo do limite máximo permitido é:

$$q' = \bar{h} \cdot L \cdot (T_s - T_\infty)$$

Avançando na prática

Utilizando os parâmetros adimensionais

Descrição da situação-problema

Considere a transferência de calor por convecção ocorrendo em duas superfícies geometricamente similares, sendo que

o comprimento característico L da superfície A é cinco vezes maior que o comprimento característico da superfície B; que a velocidade do escoamento sobre a superfície A é cinco vezes menor que a velocidade do escoamento sobre a superfície B e que o fluido utilizado é o mesmo. Agora, desenvolva uma expressão que relate o coeficiente convectivo médio das duas superfícies.

Resolução da situação-problema

Primeiramente, calculamos o número de Reynolds do escoamento sobre as superfícies A e B:

$$Re_A = \frac{V_A \cdot L_A}{\nu} \text{ e } Re_B = \frac{V_B \cdot L_B}{\nu}$$

Considerando-se que $V_A = 5 \cdot V_B$ e que $L_A = 0,2 \cdot L_B$, temos:

$$Re_A = \frac{(5 \cdot V_B) \cdot (0,2 \cdot L_B)}{\nu} = \frac{V_B \cdot L_B}{\nu} = Re_B$$

Portanto, temos que o número de Reynolds do escoamento é o mesmo para as duas superfícies. Como o fluido utilizado é o mesmo, temos que o número de Prandtl também é o mesmo para as duas superfícies. Então, temos que o número de Nusselt local permanece o mesmo para os dois casos, ou seja: $Nu_A = Nu_B$.

Considerando-se que $Nu = \frac{h \cdot L}{k}$, temos:

$$\frac{h_A \cdot L_A}{k} = \frac{h_B \cdot L_B}{k}$$

Finalmente, rearranjando a equação e sabendo que $L_A = 0,2 \cdot L_B$, chegamos em uma expressão que relaciona o coeficiente convectivo médio das duas superfícies:

$$h_A = \frac{h_B \cdot L_B}{L_A} = \frac{h_B \cdot L_B}{0,2 \cdot L_B} \rightarrow h_A = 5 \cdot h_B$$

Faça valer a pena

- A superfície de uma placa de aço é mantida a uma temperatura de 150 °C. Uma corrente de ar é soprada por um ventilador e passa por sobre a superfície da placa. Sabendo que o ar se encontra a uma temperatura de 25 °C e considerando um coeficiente de troca de calor por convecção de 150 W / m² · K, o fluxo de calor removido da placa é de?

a) $24567 \frac{W}{m^2}$.

b) $18750 \frac{W}{m^2}$.

c) $10600 \frac{W}{m^2}$.

d) $9950 \frac{W}{m^2}$.

e) $15000 \frac{W}{m^2}$.

2. A superfície externa das paredes de um forno industrial possui uma área de $8m^2$ e é mantida a uma temperatura de $150\text{ }^\circ\text{C}$, enquanto o ar externo do ambiente se encontra a uma temperatura de $25\text{ }^\circ\text{C}$.

Considerando um coeficiente de troca de calor por convecção de $50\text{ }W/m^2\cdot K$, a taxa de calor trocado por convecção entre as paredes do forno e o ar é de?

a) 10 kW.

b) 20 kW.

c) 30 kW.

d) 40 kW.

e) 50 kW.

3. Resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor por convecção h , para o caso de um escoamento sobre uma placa plana isotérmica de comprimento 0,5 m, sugerem a seguinte relação: $h = 2x^{-1/2}$. O coeficiente de transferência de calor por convecção média h sobre toda a placa é?

a) $2,23\text{ }W/m^2\cdot K$.

b) $3,42\text{ }W/m^2\cdot K$.

c) $4,98\text{ }W/m^2\cdot K$.

d) $5,66\text{ }W/m^2\cdot K$.

e) $6,12\text{ }W/m^2\cdot K$.

Seção 3.3

Introdução à radiação e trocadores de calor

Diálogo aberto

Caro aluno, a transferência de calor por radiação também é um modo bastante utilizado na indústria e no nosso dia a dia, tendo, portanto, grande importância em várias situações da realidade prática profissional e cotidiana. Você já viu um coletor solar, equipamento utilizado para esquentar a água para utilização em residências? E uma estufa, para cultivo de plantas? Qual é o princípio aplicado nessas situações? Na indústria, temos inúmeros exemplos de utilização da radiação: nos processos industriais de aquecimento, de resfriamento e de secagem, bem como nos métodos de conversão de energia que envolvem a combustão de combustíveis fósseis e radiação solar.

Os trocadores de calor são equipamentos utilizados para promover a transferência de calor entre fluidos a diferentes temperaturas que se encontram separados por uma parede sólida. Suas aplicações específicas são: o aquecimento de ambientes e o condicionamento de ar para estabelecer o conforto térmico, a produção de potência em máquinas térmicas, o processamento químico (esterilização, pasteurização, congelamento, refrigeração, evaporação, secagem, cristalização, destilação etc.) e a recuperação de calor em processos industriais.

Assim, o contexto de aprendizagem utilizado como situação da realidade profissional (SR) proposta nesta unidade é focado em uma empresa fabricante de trocadores de calor, que contratou você, aluno, como projetista, que atuará como líder responsável pelo projeto e desenvolvimento de sistemas térmicos.

Na situação-problema (SP) desta seção, você, projetará um trocador de calor de casco tubo, utilizado para resfriar o óleo lubrificante de uma turbina a gás. Qual é o melhor arranjo de trocador de calor? O trocador de calor de correntes paralelas ou o de correntes contrárias? Qual é o trocador com menor área para que ocorra uma determinada taxa de transferência de calor?

Para respondermos a essas perguntas e solucionarmos a situação-problema proposta, devemos conhecer e compreender o processo

de transferência de calor por radiação, a partir da Lei de Stefan-Boltzmann, além de conhecer e compreender os tipos de trocadores de calor existentes, a fim de projetar e analisar um trocador de calor.

Está preparado para esse novo desafio? Bons estudos!

Não pode faltar

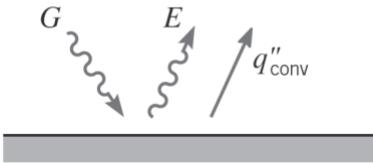
Conceitos fundamentais

Toda matéria que se encontra a uma temperatura diferente de zero absoluto (zero Kelvin ou -273,15 °C) emite radiação térmica, modo de transferência de calor atribuída a mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que constituem a matéria. O transporte de energia do campo de radiação é realizado por ondas eletromagnéticas ou fótons, também chamados de quanta. Apesar de estarmos interessados na radiação térmica a partir de superfícies sólidas, tem-se que a radiação térmica independe de um meio material (sólido, líquido ou gasoso) para ocorrer, sendo que a troca por radiação é mais eficiente no vácuo.

Lei de Stefan-Boltzmann

A radiação emitida por uma superfície, mostrada na Figura 3.13, é calculada comparando-a com um corpo negro. Um corpo negro é definido como um corpo hipotético que absorve toda a radiação térmica que nele incidir, ou seja, ele emite radiação exatamente na mesma taxa que absorve.

Figura 3.13 | Transferência de calor por radiação em uma superfície



Fonte: adaptada de Incropera et al. (2013, p. 6).

A taxa de energia emitida por unidade de área, dada em W/m^2 , é chamada de poder emissivo da superfície, E . A Lei de Stefan-Boltzmann relaciona o poder emissivo de um corpo negro com a temperatura da sua superfície, como mostra a equação a seguir:

$$E_{\text{negro}} = \sigma \cdot T_s^4$$

Em que σ é a constante de Stefan-Boltzmann, que vale $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$, e T_s é a temperatura da superfície do corpo negro, em Kelvin.

O fluxo térmico de uma superfície real é menor que o poder emissivo do corpo negro (limite superior), à mesma temperatura, ou seja:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4$$

Em que ε é a emissividade, uma propriedade radiante da superfície que depende do seu material e seu acabamento. Essa propriedade tem valores na faixa de $0 \leq \varepsilon \leq 1$, ou seja, a emissividade mede a eficiência na qual uma superfície emite energia em relação ao corpo negro.

A irradiação G mede a taxa na qual a radiação incide sobre a área unitária de uma superfície. A incidência de radiação sobre uma superfície, a partir de sua vizinhança, pode ser oriunda de uma fonte de energia, como o sol, ou qualquer outra superfície na qual a superfície em estudo esteja exposta. A taxa na qual essa energia é absorvida, por unidade de área da superfície em relação à irradiação, é dada por:

$$G_{\text{absorvida}} = \alpha \cdot G$$

Em que α é a absorvividade, uma propriedade da superfície, que tem valores na faixa de $0 \leq \alpha \leq 1$. A superfície pode ser opaca (que reflete parte da energia vinda da irradiação) ou semitransparente (que transmite parte da irradiação). Em problemas de engenharia, os líquidos podem ser considerados opacos, os gases podem ser considerados transparentes e os sólidos podem ser opacos ou semitransparentes.

Para uma superfície cinza, em que $\varepsilon = \alpha$, a taxa líquida de transferência de calor por radiação que sai da superfície, dada por unidade de área da superfície, é expressa por:

$$\dot{q}_{\text{rad}}'' = \varepsilon \cdot E_{\text{negro}} \cdot T_s - \alpha \cdot G = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{\text{viz}}^4)$$

Em que T_{viz} é a temperatura da vizinhança. A equação exprime a diferença entre a energia térmica que sai da superfície devido à emissão de radiação e a energia térmica que entra na superfície devido à absorção de radiação.



Assimile

Como visto anteriormente, é conveniente em algumas aplicações exprimir a troca líquida de calor por radiação de uma maneira análoga à

transferência de calor por convecção. Portanto, tem-se que:

$$q_{rad} = h_r \cdot A \cdot (T_s - T_{viz})$$

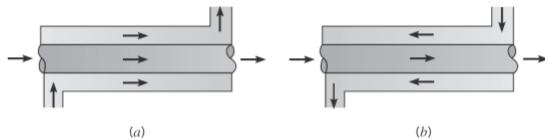
Em que h_r é o coeficiente de transferência de calor por radiação.

Tipos de trocadores de calor

Os trocadores de calor são equipamentos utilizados para promover a transferência de calor entre fluidos, a diferentes temperaturas, que se encontram separados por uma parede sólida. Os trocadores de calor são classificados basicamente de acordo com o arranjo do escoamento e o tipo de construção.

O tipo de trocador mais simples, mostrado na Figura 3.14, é o de tubos concêntricos, também chamado de bitubular.

Figura 3.14 | Trocador de calor de tubos concêntricos



Fonte: adaptada de Incropera et al. (2013, p. 425).

Na Figura 3.14 (a), temos um trocador de calor com escoamento paralelo, ou seja, o fluido frio e o fluido quente entram no trocador de calor na mesma extremidade, escoam no mesmo sentido e saem pela mesma extremidade. Já na Figura 3.14 (b), temos um trocador de calor com escoamento em contracorrente, ou seja, o fluido frio e o fluido quente entram no trocador de calor em extremidades opostas, escoam em sentidos opostos e saem em extremidades opostas.



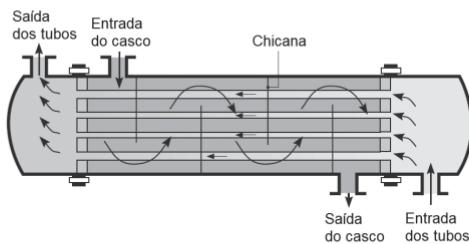
Pesquise mais

Existe um tipo de trocador de calor alternativo, o trocador com escoamento cruzado, no qual um fluido escoa perpendicularmente ao outro, seja com mistura de fluido ou não. Para saber mais sobre esses tipos de trocadores de calor, pesquise em Incropera et al. (2013, p. 425-426).

Fonte: INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

Outro tipo de trocador de calor comumente encontrado na indústria é o trocador de casco e tubo. Existem inúmeras configurações desses trocadores, e a principal variável é o número de passes no casco e nos tubos. O trocador de casco e tubo mais simples é mostrado na Figura 3.15. As chicanas são instaladas para aumentar o coeficiente de convecção do fluido do lado do casco, pela indução da turbulência e devido ao componente de velocidade do escoamento cruzado, além de reduzir a vibração do escoamento, servindo como um apoio físico para os tubos.

Figura 3.15 | Trocador de calor de casco e tubo



Fonte: adaptada de Incropera et al. (2013, p. 426).

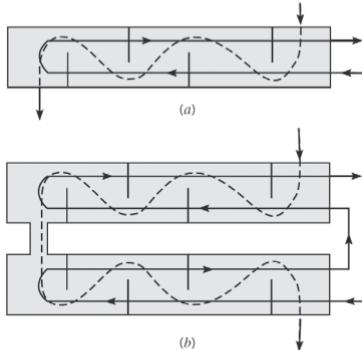
É comum encontrarmos trocadores de calor com dois passes no casco e com dois ou quatro passes nos tubos.



Exemplificando

A Figura 3.16 ilustra em (a) um trocador com um passe no casco e dois passes nos tubos e em (b) um trocador com dois passes no casco e quatro passes nos tubos.

Figura 3.16 | Exemplos de configuração de trocadores de calor de casco e tubo



Fonte: adaptada de Incropera et al. (2013, p. 426).

Análise de trocadores de calor

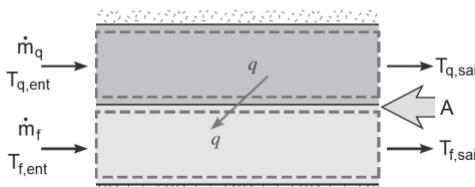
Uma parte essencial da análise de qualquer trocador de calor é a determinação do coeficiente global de transferência de calor. O coeficiente global é definido em termos da resistência térmica total para a transferência de calor para dois fluidos. O coeficiente foi determinado levando-se em conta as resistências condutivas e convectivas entre fluidos, que são separados pela parede da tubulação. O coeficiente global de transferência de calor é dado por:

$$\frac{1}{U \cdot A} = \frac{1}{(h \cdot A)_f} + \frac{R''_{d,f}}{A_f} + R_p + \frac{R''_{d,q}}{A_q} + \frac{1}{(h \cdot A)_q}$$

Em que os índices **f** e **q** indicam fluidos frio e quente, respectivamente; R_p é a resistência condutiva da parede da tubulação, que normalmente é desprezada, pois utilizaremos tubulações de parede fina e alta condutividade térmica e $R''_{d,f}$ é o fator de deposição (ou incrustação), que mede a resistência à transferência de calor da película (ou filme) que se forma na superfície da tubulação devido ao depósito de impurezas do fluido na tubulação.

Iniciando os cálculos para o projeto ou análise de desempenho de um trocador de calor, é essencial relacionarmos a taxa total de transferência de calor a grandes, tais como as temperaturas de entrada e saída do fluido, o coeficiente global de transferência de calor e a área total da superfície para a transferência de calor. A primeira relação que será apresentada é dada a partir da aplicação dos balanços globais de energia para os fluidos quente e frio, como mostrado na Figura 3.17.

Figura 3.17 | Balanço de energia entre fluidos quente e frio de um trocador de calor



Fonte: adaptada de Incropera et al. (2013, p. 428).

Considerando-se que a transferência de calor entre o trocador e sua vizinhança é desprezível, assim como as variações de energias potencial e cinética do fluido, a aplicação da equação de energia em um escoamento em regime estacionário, para o caso em que os fluidos não sofrerem mudança de fase e forem considerados com

calores específicos constantes, temos que a equação da energia para o fluido frio e o fluido quente é dada por:

$$q = \dot{m}_f \cdot c_{p,f} (T_{f,sai} - T_{f,ent})$$

$$q = \dot{m}_q \cdot c_{p,q} (T_{q,ent} - T_{q,sai})$$

Em que q é a taxa total de transferência de calor entre os fluidos quente e frio; os índices *ent* e *sai* designam as condições de entrada e saída do fluido e c_p é o calor específico à pressão constante. Tem-se que as temperaturas que aparecem nas expressões referem-se às temperaturas médias do fluido nas posições mostradas na figura. Vale ressaltar que as expressões são independentes do arranjo do escoamento e do tipo de trocador de calor.

Relacionando-se a taxa total de transferência de calor q com a diferença de temperatura ΔT entre os fluidos quente e frio, tem-se que, em uma posição qualquer do trocador de calor:

$$\Delta T = T_q - T_f$$

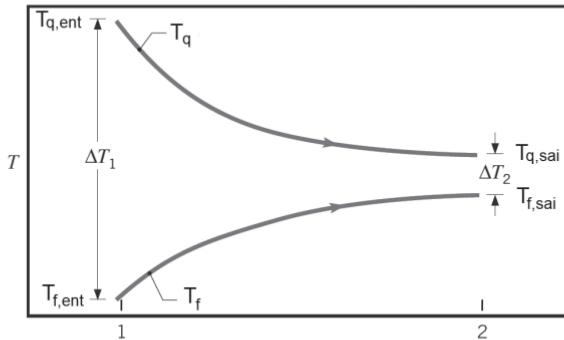
Tale expressão seria uma extensão da Lei de Newton do resfriamento, com o coeficiente global de transferência de calor U utilizado em lugar do único coeficiente de convecção h . Entretanto, uma vez que ΔT varia com a posição no trocador de calor, é necessário trabalhar com uma equação de taxa na seguinte forma:

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_m$$

Em que ΔT_m é a diferença de temperatura média apropriada. Essa equação pode ser utilizada com as equações anteriores para realizar uma análise do trocador de calor.

Primeiramente, determinaremos ΔT_m para um trocador de calor com correntes paralelas. As distribuições de temperatura dos fluidos quente e frio associadas ao trocador de calor com correntes paralelas são mostradas na Figura 3.18.

Figura 3.18 | Distribuição de temperaturas em um trocador de calor com correntes paralelas



Fonte: adaptada de Incropera et al. (2013, p. 429).

A diferença de temperatura ΔT é inicialmente mais alta no ponto 1 (entrada dos fluidos quente e frio), mas decresce rapidamente com o aumento de x , aproximando-se assintoticamente de zero no ponto 2 (saída dos fluidos quente e frio).



Refletia

Para essa configuração de correntes paralelas, existe a possibilidade de a temperatura de saída do fluido frio exceder a temperatura de saída do fluido quente?

Tem-se que ΔT_m pode ser determinada pela aplicação de um balanço de energia para elementos diferenciais nos fluidos quente e frio. Dessa forma, chega-se à seguinte relação:

$$q = U \cdot A \cdot \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml}$$

Portanto, conclui-se que a diferença de temperatura média apropriada é dada pela média logarítmica da diferença de temperatura, ΔT_{ml} , sendo que:

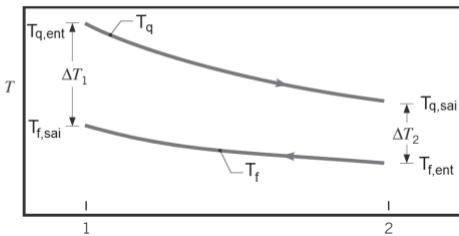
$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

Para trocador com correntes paralelas, temos:

$$\begin{aligned}\Delta T_1 &\equiv T_{q,1} - T_{f,1} = T_{q,ent} - T_{f,ent} \\ \Delta T_2 &\equiv T_{q,2} - T_{f,2} = T_{q,sai} - T_{f,sai}\end{aligned}$$

Já para um trocador de calor com correntes contrárias, tem-se que as distribuições de temperatura dos fluidos quente e frio associadas são mostradas na Figura 3.19:

Figura 3.19 | Distribuição de temperaturas em um trocador de calor com correntes contrárias



Fonte: adaptada de Incropera et al. (2013, p. 430).

Comparando com o trocador de correntes paralelas, essa configuração proporciona a transferência de calor entre as regiões mais quentes dos dois fluidos em uma extremidade, assim como entre as regiões mais frias dos dois fluidos na outra extremidade. Por essa razão, a variação na diferença de temperatura, $\Delta T = T_q - T_f$, em relação a x não é em nenhum ponto do trocador de calor tão alta quanto para a região de entrada do trocador de calor de correntes paralelas.



Refletir

Para essa configuração de correntes contrárias, existe a possibilidade de a temperatura de saída do fluido frio exceder a temperatura de saída do fluido quente?

Note que as equações utilizadas para o trocador de calor de correntes paralelas são válidas também para o trocador de calor com correntes contrárias. Portanto:

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} = U \cdot A \cdot \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}$$

A única diferença é que para o trocador com correntes contrárias os pontos extremos das diferenças de temperatura devem ser agora definidos como:

$$\left[\begin{array}{l} \Delta T_1 \equiv T_{q,1} - T_{f,1} = T_{q,ent} - T_{f,sai} \\ \Delta T_2 \equiv T_{q,2} - T_{f,2} = T_{q,sai} - T_{f,ent} \end{array} \right]$$

Concluindo, temos que, para as mesmas temperaturas de entrada e saída, a média logarítmica da diferença de temperatura para correntes contrárias excede a das correntes paralelas. Logo, a área necessária da superfície para termos uma dada taxa de transferência de calor é menor para o arranjo de correntes contrárias do que para o de correntes paralelas, admitindo-se o mesmo valor de U.

Sem medo de errar

Retomando o contexto de aprendizagem, temos uma empresa fabricante de trocadores de calor, que contratou você, aluno, como projetista, que atuará como líder responsável pelo projeto e desenvolvimento de sistemas térmicos. Na situação-problema (SP) desta seção, projetaremos um trocador de calor de casco e tubo, utilizado para resfriar o óleo lubrificante de uma turbina a gás industrial. Portanto, estamos interessados em saber qual é o comprimento desse trocador de calor.

Para isso, devemos saber a vazão de água de resfriamento através da tubulação interna, a vazão do óleo lubrificante através da região anular e devemos fixar a temperatura de entrada das duas correntes e a temperatura de saída do óleo lubrificante, para manutenção do sistema de arrefecimento da turbina.

As propriedades do óleo lubrificante e da água são obtidas através das tabelas A.5 e A.6, respectivamente, do livro de Incropera et al. (2013, p. 605-609). É importante ressaltar que utilizamos uma temperatura média entre a entrada e a saída do fluido para avaliar as propriedades através das tabelas.

Para determinarmos o comprimento do trocador de calor, primeiramente realizamos um balanço de energia global no fluido quente, a fim de determinarmos a taxa de transferência de calor requerida:

$$q = \dot{m}_q \cdot c_{p,q} (T_{q,ent} - T_{q,sai})$$

Conhecendo a taxa de transferência de calor requerida, conseguimos encontrar a temperatura de saída da água de resfriamento:

$$T_{f,sai} = \frac{q}{\dot{m}_f \cdot c_{p,f}} + T_{f,ent}$$

O comprimento do trocador de calor pode ser obtido através da seguinte equação:

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml}$$

Em que a média logarítmica das diferenças de temperatura é dada por:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}$$

A área é calculada por:

$$A = \pi \cdot D \cdot L$$

E o coeficiente global de transferência de calor é dado por:

$$U = \frac{1}{(1/h_{int}) + (1/h_{ext})}$$

Para o escoamento de água de resfriamento, temos:

$$Re_D = \frac{4 \cdot \dot{m}_f}{\pi \cdot D_{int} \cdot \mu}$$

Se o escoamento for laminar e o fluxo térmico na superfície for uniforme, utilizamos a seguinte correlação para o cálculo do número de Nusselt:

$$Nu_D = 4,36$$

Portanto, para escoamento laminar, o coeficiente convectivo é dado por:

$$h_{int} = \frac{4,36 \cdot k}{D_{int}}$$

Se o escoamento for turbulento, utilizamos a seguinte correlação:

$$Nu_D = 0,023 \cdot Re_D^{4/5} \cdot Pr^{0.4}$$

Para escoamento turbulento, o coeficiente convectivo é calculado por:

$$h_{int} = \frac{Nu_D \cdot k}{D_{int}}$$

Para o escoamento de óleo lubrificante, temos:

$$\text{Re}_D = \frac{4 \cdot \dot{m}_f}{\pi \cdot (D_{ext} - D_{int}) \cdot \mu}$$

O número de Nusselt para escoamento em uma região anular é calculado a partir da tabela 8.2 do livro de Incropera et al. (2013, p. 327).

Assim, podemos calcular o coeficiente global de transferência de calor:

$$U = \frac{1}{(1/h_{int}) + (1/h_{ext})}$$

Finalmente, calculamos o comprimento do trocador de calor a partir da equação da taxa de transferência de calor:

$$L = \frac{q}{U \cdot \pi \cdot D_{int} \cdot \Delta T_{ml}}$$

A título de informação, podemos calcular o comprimento do trocador de calor para um arranjo de correntes paralelas. Como visto, a área necessária da superfície para termos uma dada taxa de transferência de calor é menor para o arranjo de correntes contrárias do que para o de correntes paralelas, admitindo-se o mesmo valor de U e para as mesmas temperaturas de entrada e saída dos fluidos quente e frio.

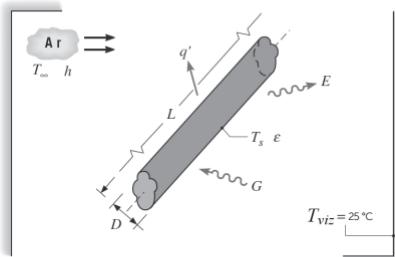
Avançando na prática

Cálculo do calor perdido por radiação em uma tubulação

Descrição da situação-problema

A Figura 3.20 apresenta uma tubulação de vapor d'água sem isolamento térmico em uma sala na qual o ar ambiente e as suas paredes encontram-se na mesma temperatura T_∞ . São conhecidos o diâmetro externo da tubulação, a temperatura de sua superfície e a emissividade da superfície. Como calculamos o poder emissivo da superfície da tubulação e a sua irradiação? Qual é a taxa de calor perdida pela superfície por unidade de comprimento de tubulação, considerando-se a ocorrência de convecção natural além da radiação?

Figura 3.20 | Desenho esquemático do exercício proposto



Fonte: adaptada de Incropera et al. (2013, p. 7).

Resolução da situação-problema

O poder emissivo da superfície é dado por:

$$E = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4$$

Considerando-se que a emissividade e a absoratividade da superfície são iguais, a irradiação é calculada por:

$$G = \sigma \cdot T_s^4$$

A taxa de calor perdida pela superfície por unidade de comprimento de tubulação é dada por:

$$q' = \frac{q}{L} = \frac{q_{conv}}{L} + \frac{q_{rad}}{L} = h \cdot \pi \cdot D \cdot (T_s - T_\infty) + \epsilon \cdot \pi \cdot D \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{viz}^4)$$

Faça valer a pena

1. Os trocadores de calor são classificados basicamente de acordo com o arranjo do escoamento e o tipo de construção.



Fonte: adaptada de Incropera et al. (2013, p. 425).

Assinale a alternativa que apresenta o tipo de trocador de calor a qual a imagem se refere:

- | | |
|--------------------|------------------------|
| a) Casco e tubo. | d) Tubos concêntricos. |
| b) Tubo capilar. | e) Tubos cilíndricos. |
| c) Casco circular. | |

2. Ar escoa por um trocador de calor com uma vazão em massa de 10 kg/s. O ar entra no trocador de calor com uma temperatura de 27 °C e sai com uma temperatura de 100 °C.

Para um escoamento em regime estacionário, considerando o calor específico do ar constante igual a $1,007 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, a taxa total de transferência de calor é de aproximadamente:

- a) 612 kW.
- b) 735 kW.
- c) 844 kW.
- d) 923 kW.
- e) 1001 kW.

3. A radiação emitida por uma superfície real é calculada comparando-a com um corpo negro. Um corpo negro é definido como um corpo hipotético que absorve toda a radiação térmica que nele incidir, ou seja, ele emite radiação exatamente na mesma taxa que absorve. A Lei de Stefan-Boltzmann relaciona o poder emissivo de um corpo negro com a temperatura da sua superfície, como mostra a equação:

$$E_{\text{negro}} = \sigma \cdot T_s^4$$

Em que σ é a constante de Stefan-Boltzmann e T_s é a temperatura da superfície do corpo negro, em Kelvin.

O fluxo térmico E máximo de uma superfície real, cuja emissividade e absorvividade valem 0,8 e 0,6, respectivamente, pode ser calculado através da equação:

a) $E = 0,6 \cdot \sigma \cdot T_s^4$.

b) $E = 0,8 \cdot \sigma \cdot T_s^4$.

c) $E = \frac{\sigma \cdot T_s^4}{1,4}$.

d) $E = 0,4 \cdot \sigma \cdot T_s^4$.

e) $E = \frac{\sigma \cdot T_s^4}{1,2}$.

Referências

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

Termodinâmica básica

Convite ao estudo

Caro aluno, nesta unidade de ensino, estudaremos os princípios básicos da termodinâmica, que é um ramo da Física que estuda as transformações que envolvem calor e trabalho em um sistema.

Na Unidade 1, estudamos a estática e a cinemática dos fluidos. Na Unidade 2, estudamos 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, estudamos os três tipos de processos de transferência de calor existentes: a condução, a convecção e a radiação térmica.

Tem-se que os conceitos da termodinâmica são estudados e aplicados desde a história antiga, na qual os egípcios relacionavam calor ao fogo, por exemplo. Os conceitos termodinâmicos tornaram-se extremamente relevantes com o advento das máquinas térmicas, que foram difundidas na Revolução Industrial, e se tornaram o marco da termodinâmica moderna. Nos dias de hoje, além de situações cotidianas e na indústria moderna, a termodinâmica está presente em vários ramos da Engenharia, como na bioengenharia e na nanotecnologia.

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 conhecer e compreender os conceitos e as definições da termodinâmica,

a fim de aplicar a primeira lei da termodinâmica para sistemas fechados e a equação de estado para gases ideais.

O contexto de aprendizagem utilizado como situação da realidade profissional (SR) proposta nesta unidade é focado em uma empresa fabricante de máquinas térmicas, que contratou você, aluno, como engenheiro responsável pelo projeto e desenvolvimento de sistemas térmicos. Para atingir os objetivos desta unidade, você deve estar apto a calcular a variação da energia total, considerando a cinética, a potencial e a energia interna de um sistema constituído de um gás contido em um tanque; realizar um balanço de energia para um ciclo de potência, um ciclo de refrigeração e uma bomba de calor e analisar um gás ideal submetido a um ciclo termodinâmico (expansão e compressão).

Para isso, serão tratados nas seções desta unidade os conceitos de sistema termodinâmico; de propriedade, de estado e de processo termodinâmico; de energia potencial e de energia cinética; de calor e trabalho; da primeira lei de termodinâmica; do balanço de energia para ciclos de potência, de refrigeração e bomba de calor; de fase e substância pura; das relações p-v-T; da equação de estado de gás ideal e das relações de processos politrópicos.

Está preparado para esses grandes desafios? Vamos lá!

Seção 4.1

Introdução à termodinâmica

Diálogo aberto

Caro aluno, a termodinâmica é um ramo da Engenharia que abrange praticamente todas as áreas de atuação dos tecnólogos e dos engenheiros, como a mecânica, a química, a de petróleo e gás, a biomédica etc. Situações-problema como o uso de combustíveis fósseis de maneira mais eficaz, o desenvolvimento e a implementação de tecnologias de energias renováveis e limpas, a preocupação com as emissões de gases de efeito estufa, com a poluição da água e do ar em geral e com o aquecimento global, entre outros são exemplos da importância da termodinâmica no avanço tecnológico sustentável e no bem-estar da sociedade em geral.

Tem-se que os princípios da termodinâmica estão presentes em vários ramos da ciência, como na área aeronáutica e aeroespacial, na área de transporte terrestre, na geração e na transmissão de eletricidade, no conforto térmico (aquecimento e refrigeração), na biomédica etc. Portanto, a termodinâmica tem grande importância em várias situações da realidade prática profissional, principalmente na indústria moderna, que utiliza máquinas térmicas, bombas de calor e sistemas de refrigeração em suas instalações.

Assim, o contexto de aprendizagem utilizado como situação da realidade profissional (SR) proposta nesta unidade é focado em uma empresa fabricante de máquinas térmicas, que contratou você, aluno, como engenheiro responsável pelo projeto e desenvolvimento de sistemas térmicos.

Assim, na situação-problema (SP) desta seção, você calculará a variação da energia total, considerando a cinética, a potencial e a energia interna de um sistema constituído de um gás contido em um tanque.

Para isso, devemos conhecer e compreender os conceitos de sistema termodinâmico; de propriedade, de estado e de processo termodinâmico e de energia potencial e de energia cinética, a fim de aplicá-los na solução da situação-problema proposta.

Bons estudos!

Não pode faltar

Sistemas termodinâmicos

Para realizarmos uma análise termodinâmica, aplicamos as leis e as relações físicas a sistemas termodinâmicos, que são o objeto de estudo que analisaremos. Existem vários tipos de sistemas termodinâmicos, e a definição deles e a identificação de suas interações com outros sistemas é o primeiro passo para o sucesso de uma análise termodinâmica.



Exemplificando

Os sistemas podem ser simples, como um corpo rígido, ou complexo como uma planta de uma central termoelétrica. Podem ter uma quantidade de matéria com composição química fixa ou variável, como no caso de termos uma combustão ou uma fissão nuclear. Podem ter uma quantidade de matéria contida em um recipiente fechado, ou podem ter uma vazão volumétrica de fluido escoando, por exemplo, em uma turbina a gás.

Assim, dependendo da situação-problema proposta a ser resolvida, o passo inicial, e de suma importância, é a escolha de um modelo de sistema que descreva de forma precisa os processos termodinâmicos que desejamos estudar.

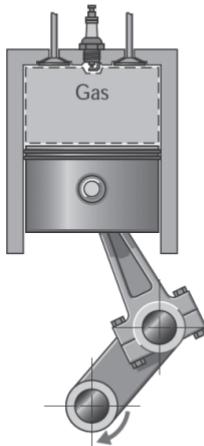
Antes de definirmos os tipos de sistema termodinâmicos, definiremos o que é fronteira e vizinhança de um sistema. Entende-se por vizinhança tudo que é externo a ela. O que delimita o sistema e o distingue de sua vizinhança é chamado de fronteira, que pode estar em repouso ou em movimento. É a partir da fronteira que ocorrem as interações entre o sistema e sua vizinhança, fato que mostra a importância desses conceitos na análise termodinâmica.

O primeiro sistema que estudaremos é o sistema fechado, que é definido quando temos uma quantidade fixa de matéria sendo estudada, ou seja, no sistema fechado, a quantidade de matéria não varia, impossibilitando o fluxo de massa através de suas fronteiras. Apesar de não termos fluxo de massa através das fronteiras do sistema, interações termodinâmicas, como calor e trabalho, podem ocorrer através dessa fronteira. Tem-se que o sistema isolado, que é um tipo particular de sistema fechado, é um sistema no qual nenhum tipo de interação ocorre entre o sistema e sua vizinha, ou seja, não

existe fluxo de massa, calor e trabalho cruzando a fronteira de um sistema isolado.

A Figura 4.1 mostra um exemplo de um sistema fechado. Se considerarmos que as válvulas do conjunto cilindro-pistão permanecem fechadas, o gás pode ser modelado como sendo um sistema fechado, ou seja, nenhuma massa atravessa a fronteira do sistema. Analisando a figura, temos que a fronteira é dada pela linha tracejada que delimita o gás no interior do cilindro, ou seja, a fronteira está alinhada com as paredes internas do cilindro e do pistão. Vale ressaltar que a fronteira entre o gás e o pistão pode se movimentar, de acordo com o movimento do pistão. Portanto, temos que o volume de um sistema fechado pode ser variável. Além disso, se considerarmos a combustão que ocorre no interior do conjunto cilindro-pistão, temos que a composição química da matéria (o gás contido dentro do conjunto) varia conforme a mistura inicial de combustível e o ar se transforma em produtos de combustão.

Figura 4.1 | Exemplo de um sistema fechado

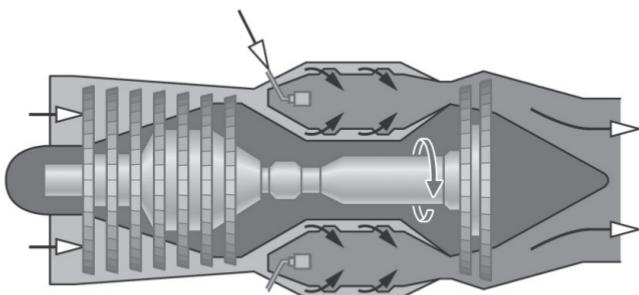


Fonte: adaptada de Moran et al. (2014, p. 2).

O sistema aberto, também chamado de volume de controle, é o sistema no qual é permitido termos um fluxo de massa fluindo através de suas fronteiras, além das interações termodinâmicas, como o calor e o trabalho. A Figura 4.2 mostra um exemplo de sistema aberto. No motor turbojato, bem como em turbinas, bombas hidráulicas etc., é muito comum utilizarmos essa modelagem de sistema aberto. Obviamente, poderíamos modelar esses dispositivos analisando-os a

partir de um sistema fechado, ou seja, estudando uma determinada quantidade de matéria e acompanhando o seu escoamento ao longo do dispositivo. Em várias situações-problema, essa abordagem é válida, como é o caso do acompanhamento da dispersão de um poluente na atmosfera, ou na previsão do tempo, na qual é estudada detalhadamente a movimentação das correntes de ar. Dependendo da situação-problema, não necessitamos analisá-la utilizando a abordagem de sistema fechado, pois essa análise nos leva a modelos complexos e de difícil solução.

Figura 4.2 | Exemplo de um sistema aberto



Fonte: adaptada de Moran et al. (2014, p. 2).

Para a maioria dos problemas em termodinâmica, o sistema aberto, ou volume de controle, é uma análise mais simples e adequada. A partir da Figura 4.2, podemos notar fluxos de matéria atravessando as fronteiras do dispositivo. Na região à esquerda da figura, temos uma entrada de ar no motor turbojato; na parte superior, temos a entrada de combustível; e, na região à direita, temos a saída dos gases de combustão. Nessa análise, portanto, estudamos uma região delimitada por uma fronteira fixa, que pode ser física ou imaginária, mas que não se movimenta.

Resumindo, temos que o sistema fechado é definido como um sistema no qual a quantidade de matéria é fixa, ou seja, não existe fluxo de massa cruzando a fronteira do sistema, permitindo somente interações termodinâmicas através dela. O sistema aberto ou volume de controle é definido como um sistema no qual existe fluxo de massa cruzando a fronteira do sistema.



Assimile

Propriedade, estado e processo

Uma propriedade termodinâmica é uma característica macroscópica de um sistema para o qual não é necessário saber o histórico (ou seja, o comportamento prévio) do sistema para mensurá-la. Como exemplos de propriedades termodinâmicas, temos: massa, volume, temperatura, pressão etc.

Um estado termodinâmico refere-se à condição, na qual o sistema se encontra, que é definida pelas suas propriedades. O estado termodinâmico é definido por duas propriedades independentes. Tem-se que uma grandeza é considerada como sendo uma propriedade termodinâmica se, e somente se, sua alteração de valor entre dois estados for independente do processo termodinâmico.

Portanto, precisamos definir o que é um processo termodinâmico! Vamos supor uma situação em que uma propriedade qualquer do sistema sofre uma alteração. Para que essa situação ocorra, necessitamos de uma mudança de estado termodinâmico. Essa mudança é chamada de processo termodinâmico, que é uma transformação de um estado para outro estado. Como visto anteriormente, no estudo da cinemática dos fluidos, se as propriedades variam com o tempo, temos um regime variado, também chamado de transitório. E, se as propriedades não variam com o tempo, temos um regime permanente.

As propriedades podem ser classificadas como: propriedades extensivas e propriedades intensivas. Uma propriedade é chamada de extensiva se o seu valor para todo o sistema é dado pela somatória dos valores da propriedade para cada porção na qual o sistema é dividido. Portanto, as propriedades extensivas, como o próprio nome indica, dependem do tamanho ou da extensão do sistema. A massa, o volume, a energia etc. são exemplos desse tipo de propriedade.

Uma propriedade é chamada de intensiva se ela independe do tamanho ou da extensão do sistema. Portanto, a propriedade intensiva pode variar de intensidade de uma região para outra no interior do sistema, ou seja, é uma propriedade que é uma função da posição e do tempo, diferentemente de uma propriedade extensiva, que é uma função somente do tempo. A temperatura, a pressão, o volume específico etc. são exemplos de propriedades intensivas.

Tem-se que uma propriedade específica é uma propriedade obtida

dividindo-se uma propriedade extensiva pela massa total do sistema. Ao efetuarmos esse cálculo, obtemos uma propriedade intensiva, portanto a propriedade específica é um tipo especial de propriedade intensiva.

O conceito de equilíbrio é fundamental nas análises termodinâmicas de sistemas. Na mecânica geral, aprendemos que equilíbrio é uma condição de estabilidade, na qual uma partícula ou um corpo rígido se encontra devido a uma igualdade de forças que se opõem. Em termodinâmica, o termo equilíbrio é utilizado de uma maneira mais ampla, ou seja, é utilizado para vários outros aspectos termodinâmicos, diferentes da aplicação de forças, como o equilíbrio mecânico, térmico, químico, de fase etc.

Finalizando, não existe a necessidade de que um sistema em que ocorre um processo termodinâmico esteja em equilíbrio ao longo do processo. Portanto, alguns ou todos os estados intermediários que ocorrem durante um processo podem ser estados de não equilíbrio, sendo que para muitos processos conhecemos somente o estado inicial (antes de o processo ocorrer) e o estado final (após o processo estar finalizado).



Pesquise mais

Caro aluno, para aprofundar o conhecimento sobre os conhecimentos introdutórios de termodinâmica, sugerimos que você pesquise sobre a massa, o comprimento, o tempo e a força, em unidades do SI e do sistema inglês; sobre o volume específico; sobre a pressão e sobre a temperatura, no livro de Moran et al. (2014, p. 7-15).

Fonte: MORAN, M. J. et al. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

Conservação da energia mecânica: energia cinética

Estudamos sobre os tipos de energia mecânica (energia potencial, energia cinética e trabalho) na Unidade 2 desse material. Vimos que 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 equação da energia cinética E_c é representada por:

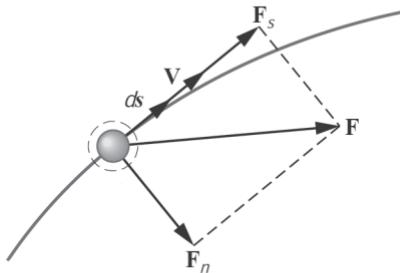
$$E_c = \frac{m \cdot V^2}{2}$$

Nesta unidade de ensino, trabalharemos com a variação da energia cinética ΔE_c entre dois pontos 1 e 2, por exemplo. Portanto, temos:

$$\Delta E_c = E_{c2} - E_{c1} = \frac{m \cdot (V_2^2 - V_1^2)}{2}$$

A partir das leis de movimento de Newton, temos que a variação da energia cinética é igual ao trabalho realizado por uma força F_s aplicada em um corpo que se desloca de s_1 a s_2 ao longo de uma trajetória, como mostra a Figura 4.3.

Figura 4.3 | Forças atuando em um corpo em movimento



Fonte: adaptada de Moran et al. (2014, p. 28).

Note que F_s é tangente à trajetória do corpo. Finalizando, tem-se que a variação da energia cinética pode ser dada por:

$$\frac{m \cdot (V_2^2 - V_1^2)}{2} = \int_{s_1}^{s_2} F \cdot ds$$

Conservação da energia mecânica: energia potencial

Tem-se que 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, em relação a uma referência adotada. Essa energia é a medida do potencial de realização de trabalho desse sistema.

A equação da energia potencial E_p é representada por:

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

A variação de energia potencial entre dois pontos 1 e 2 é dada por:

$$\Delta E_p = E_{p2} - E_{p1} = m \cdot g (z_2 - z_1)$$

Considerando que o sistema em estudo não tenha nenhuma interação com a sua vizinhança, o enunciado da conservação da energia mecânica mostra que a energia mecânica total de um corpo é a soma das energias cinética e potencial desse corpo, ou seja:

$$\frac{m \cdot (V_2^2 - V_1^2)}{2} + m \cdot g(z_2 - z_1) = 0$$

Obviamente, o conceito de energia utilizado em termodinâmica é muito mais amplo que o conceito de energia mecânica, pois envolve várias outras propriedades, processos e interações do sistema com a vizinhança que são muito mais complexos. Estudaremos outros tipos de energia na próxima seção.

Finalizando esta seção, para ampliar a nossa compreensão sobre a energia de um sistema, estudaremos o conceito da variação total de energia de um sistema, que leva em consideração a energia cinética, a potencial e as outras formas de energia.

Por exemplo, quando uma bateria é carregada, tem-se que a energia armazenada em seu interior aumenta. Quando uma mola é comprimida, a partir de um trabalho sobre ela, também se tem uma energia armazenada em seu interior.



Refletia

Consideremos agora um fluido em repouso no interior de um recipiente fechado e isolado. Ao agitá-lo, aumentamos a sua energia. Após cessar a agitação, esperamos que o fluido retorne ao repouso, atingindo um estado de equilíbrio termodinâmico. Tem-se que a energia do fluido aumenta durante esse processo. Isso é verdade? Se sim, como esse aumento de energia ocorre?

Em cada um desses exemplos, a variação da energia do sistema não pode ser atribuída a variações na energia cinética ou potencial do sistema. Por isso, surge a necessidade de definirmos a energia interna do sistema. Portanto, a energia interna U do sistema é a somatória de todas as interações de energia do sistema que não são classificadas como energia cinética ou potencial.

Finalmente, a variação total de energia ΔE de um sistema é dada pela contribuição macroscópica da energia cinética, potencial e interna do sistema:

$$\Delta E = \Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U$$

Assim como as energias cinética e potencial, a energia interna é uma propriedade extensiva do sistema. A variação da energia interna em um processo que ocorre entre os estados 1 e 2 é:

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

Sem medo de errar

Retomando o contexto de aprendizagem, temos uma empresa fabricante de máquinas térmicas que contratou você, aluno, como engenheiro responsável pelo projeto e desenvolvimento de sistemas térmicos.

A proposta dessa SP1 é que você, aluno, determine a variação da energia total, considerando a cinética, a potencial e a energia interna de um sistema constituído de um gás contido em um tanque.

A variação total de energia ΔE de um sistema é dada pela somatória das contribuições da energia cinética, potencial e interna do sistema:

$$\Delta E = \Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U$$

Uma maneira de entendermos melhor o conceito da energia interna é considerarmos uma interpretação microscópica do sistema termodinâmico. Portanto, consideraremos os movimentos e as configurações das moléculas, dos átomos e das partículas subatômicas que compõem a matéria contida no sistema em estudo.

Temos que, para a SP proposta, na qual o sistema é constituído de um gás contido em um tanque, as moléculas de gás têm um movimento aleatório e, ao se movimentarem, chocam-se com outras moléculas e com as paredes do recipiente. Assim, podemos considerar esse movimento como sendo uma energia cinética de translação das moléculas de gás, energia que faz parte da energia interna do sistema.

Temos também que as moléculas giram em torno de seu centro de massa e que existe uma vibração das partículas subatômicas que compõem as moléculas, ou seja, temos mais dois tipos de energia cinética que ocorrem nas moléculas e em suas partículas subatômicas, que também fazem parte da energia interna do sistema.

Além disso, existe o armazenamento de energia no nível atômico, que leva em consideração a energia associada aos estados orbitais dos elétrons, spin nuclear e forças de ligação no núcleo, que também

fazem parte da energia interna do sistema.

Note que, macroscopicamente, o sistema pode estar em equilíbrio, ou seja, não existe nenhuma variação de energia mecânica no sistema, nem mesmo variações de energia cinética e potencial, para o caso da energia mecânica se conservar, porém, no nível microscópico, existem variações de energia ocorrendo. O somatório dessas energias é classificado como sendo a energia interna total do sistema.

Avançando na prática

Conservação da energia mecânica

Descrição da situação-problema

Vamos supor que um avião de 15.000 kg esteja em velocidade de cruzeiro (170 m/s) a uma altitude de 10.000 m. Devido a uma pane momentânea no seu sistema motor, o avião perde um pouco de altitude, chegando a 8.000 m. Qual será a velocidade do avião nessa nova altitude? Considerar a aceleração da gravidade igual a $9,81 \text{ m/s}^2$.

Resolução da situação-problema

Considerando que o sistema em estudo não tenha nenhuma interação com a sua vizinhança, o enunciado da conservação da energia mecânica mostra que a energia mecânica total de um corpo é a soma das energias cinética e potencial desse corpo, ou seja:

$$\frac{m \cdot (V_2^2 - V_1^2)}{2} + m \cdot g(z_2 - z_1) = 0$$

Rearranjando a equação, temos:

$$(V_2^2 - V_1^2) = 2 \cdot g(z_1 - z_2)$$

Finalmente, a velocidade do avião será de:

$$V_2 = \sqrt{2 \cdot g(z_1 - z_2) + V_1^2}$$

$$V_2 = \sqrt{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 (10.000 \text{ m} - 8.000 \text{ m}) + 170^2 \text{ m/s}^2} = 261 \text{ m/s}$$

Portanto, tem-se que, se o avião perdeu altitude, ele aumentará sua velocidade, pois a energia mecânica se conserva, ou seja, a soma da energia cinética e da energia potencial nos estados inicial e final permanece constante.

Faça valer a pena

1. A energia mecânica pode ser dividida em: energia potencial, energia cinética e trabalho.

Analise as afirmações a seguir e julgue-as como verdadeiras (V) ou falsas (F):

() 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, em relação a uma referência adotada.

() 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.

() O trabalho é representado por uma energia de pressão, que corresponde ao potencial de realização de trabalho das forças de pressão que atuam em um escoamento fluido.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência correta:

- a) V, V, V.
- b) V, F, F.
- c) F, F, V.
- d) F, V, F.
- e) V, V, F.

2. 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. Uma massa de 10 kg percorre uma trajetória retilínea com velocidade de 5 m/s. Em um determinado momento, uma força F age sobre ela no sentido contrário ao movimento, fazendo com que ela reduza sua velocidade em 20%.

O módulo do trabalho realizado pela força F , para reduzir a velocidade da massa, é de?

- a) 3,0 J.
- b) 3,5 J.
- c) 4,0 J.
- d) - 4,5 J.
- e) 5,0 J.

3. O conceito de energia utilizado em termodinâmica é muito mais amplo que o conceito de energia mecânica, pois envolve várias outras propriedades, processos e interações do sistema com a vizinhança que são muito mais complexos.

Analise as afirmações a seguir:

I- A energia interna do sistema é a somatória de todas as interações de energia do sistema que não são classificadas como energia cinética ou potencial.

II- A variação total de energia de um sistema é dada pela contribuição macroscópica da energia cinética, potencial e interna do sistema.

III- Assim como as energias cinética e potencial, a energia interna é uma propriedade extensiva do sistema.

É correto o que se afirma em:

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

Seção 4.2

Primeira lei de termodinâmica

Diálogo aberto

Caro aluno, a primeira lei da termodinâmica é a base para o estudo de ciclos termodinâmicos, como os ciclos de potência, os ciclos de refrigeração e os ciclos de bomba de calor. A compreensão dessa lei, que diz que a energia se conserva, permite-nos aplicar o princípio do balanço de energia para um sistema fechado. Esse princípio é primordial para que possamos realizar a análise da variação de energia de sistemas que são submetidos a um ciclo termodinâmico, como um sistema de vapor de uma central termoelétrica ou um sistema de fluido refrigerante de um condicionador de ar. Para formularmos a primeira lei da termodinâmica, precisamos conhecer e compreender os conceitos de calor e trabalho. Esses conceitos, com o princípio da variação total de energia de um sistema, são a base para o entendimento da primeira lei da termodinâmica.

Assim, o contexto de aprendizagem utilizado como situação da realidade profissional (SR) proposta nesta unidade é focado em uma empresa fabricante de máquinas térmicas, que contratou você, aluno, como engenheiro responsável pelo projeto e desenvolvimento de sistemas térmicos.

Assim, na situação-problema (SP) desta seção, você realizará um balanço de energia para um ciclo termodinâmico, que pode ser dado por um ciclo de potência, um ciclo de refrigeração ou um ciclo de bomba de calor. Quais são as variáveis relevantes no cálculo da eficiência térmica de um ciclo de potência e do coeficiente de desempenho de um ciclo de refrigeração ou de bomba de calor? O que esses indicadores de desempenho medem?

Para isso, devemos conhecer e compreender os conceitos de calor e trabalho, o princípio do balanço de energia para sistemas fechados, para ciclos de potência e para ciclos de refrigeração e de bomba de calor, a fim de aplicá-los na solução da situação-problema proposta.

Está preparado para esse novo desafio? Bons estudos!

Não pode faltar

Trabalho e calor

O trabalho W é definido em termodinâmica como sendo uma extensão do conceito de trabalho visto em física mecânica. A aplicação desse conceito em termodinâmica é muito importante, como no cálculo do trabalho realizado na compressão ou expansão de um gás, no alongamento de uma barra sólida, no estiramento de uma película líquida, na rotação de um eixo etc. Para esses exemplos, o trabalho realizado por um sistema, ou sobre um sistema, é calculado pela equação a seguir, em que F representa uma força e s representa um deslocamento.

$$W = \int_{s_1}^{s_2} F \cdot ds$$

Consideraremos que um sistema realiza trabalho sobre as suas vizinhanças se o único efeito sobre o ambiente externo puder ser dado hipoteticamente pelo levantamento de um peso. Temos que o levantamento de um peso é definido por uma força que age através de uma distância, ou seja, é um trabalho mecânico.

Nas análises de ciclos termodinâmicos, consideraremos que o trabalho é um modo de transferência de energia. Tem-se que o trabalho se refere ao que está sendo transferido entre sistemas ou entre um sistema e suas vizinhanças, ou então ao que está sendo armazenado em um sistema. Portanto, consideraremos que a energia é transferida ou armazenada a partir da realização de trabalho.



Assimile

Convencionaremos que o trabalho realizado pelo sistema será positivo ($W > 0$) e o trabalho realizado sobre o sistema será negativo ($W < 0$).

É importante ressaltar que o valor do trabalho depende das interações que ocorrem entre o sistema e suas vizinhanças durante a realização do trabalho, e não apenas dos estados inicial e final do sistema, ou seja, o trabalho não é uma propriedade termodinâmica.

Portanto, os limites de integração da equação do trabalho são entendidos como "do estado 1 ao estado 2", não fazendo sentido interpretar o trabalho em um desses estados citados. A diferenciação

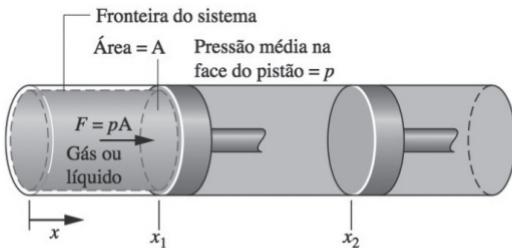
do trabalho δW é inexata, ou seja, a integral não pode ser calculada sem que detalhes do processo de realização do trabalho sejam especificados.

A potência **Pot** é definida como sendo a taxa de transferência de energia por meio de trabalho. Se o trabalho envolve uma força observável macroscopicamente, a potência é dada pelo produto da força pela velocidade **V** no ponto de aplicação da força:

$$Pot = F \cdot V$$

Temos que o trabalho de compressão ou expansão de um fluido (gás ou líquido), realizado para obtermos uma variação do seu volume, é avaliado em um sistema fechado. Consideremos o sistema cilindro pistão, mostrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 | Compressão ou expansão de um gás ou líquido



Fonte: Moran et al. (2014, p. 33).

Exemplificando, para a expansão de um gás, tem-se que a pressão do gás **p** exerce uma força normal sobre o pistão. Portanto, a força que o gás exerce sobre o pistão será $F = p \cdot A$, em que A é a área do pistão. Finalmente, temos que o trabalho realizado pelo sistema durante o processo de expansão, que faz com que o pistão se desloque de uma distância dx , é dado por:

$$\delta W = pAdx$$

Em que o produto Adx é o mesmo que a variação do volume do sistema dV . Assim:

$$\delta W = pdV$$

Tem-se que, quando o volume aumenta, dV é positivo, fazendo com que o trabalho na fronteira do sistema seja positivo no processo de expansão. Para um processo de compressão, o volume diminui e o trabalho é negativo.

Para uma variação de volume desde V_1 até V_1 , o trabalho é obtido

através da integral:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

A integração dessa equação requer a obtenção da relação entre a pressão do gás na fronteira móvel e o volume do sistema. Em vários casos, em que não conseguimos encontrar a relação pressão-volume devido aos efeitos de não equilíbrio durante um processo real, como no cilindro de um motor de combustão interna, o trabalho poderá ser obtido por meio de um balanço de energia, como veremos adiante.

 Pesquise mais

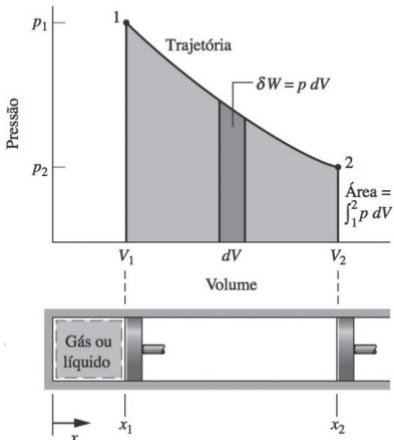
Existem outros tipos de trabalho, como o alongamento de uma barra sólida, o estiramento de uma película líquida, a potência transmitida por um eixo, a potência elétrica, o trabalho devido à polarização ou magnetização etc. Para saber mais sobre esses exemplos de trabalho, sugerimos a leitura das páginas 37-38 do livro de Moran et al. (2014).

Fonte: MORAN, M. J. et al. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

Podemos modelar alguns processos como ideais, nos quais o afastamento do equilíbrio termodinâmico ao longo do processo é praticamente infinitesimal, chamados de quase estáticos (ou de quase equilíbrio).

Analizando graficamente a relação entre pressão e volume para processos quase estáticos, apresentada na Figura 4.5, temos que inicialmente o pistão se encontra na posição x_1 e a pressão do gás é p_1 , ao final do processo de expansão, o pistão se encontra na posição x_2 e a pressão do gás é p_2 . A curva que une os estados 1 e 2, que representa a trajetória do processo, também chamada de caminho, indica os estados de equilíbrio nos quais o sistema passou durante o processo. A área sob a curva de pressão versus volume corresponde ao trabalho do processo. Essa interpretação prova que o trabalho não é uma propriedade, pois depende da natureza do processo entre os estados inicial e final.

Figura 4.5 | Trabalho de um processo de expansão ou compressão



Fonte: Moran et al. (2014, p. 35).

Observando, analiticamente, a relação entre pressão e volume de um processo quase estático pode ser dada por $p \cdot V^n = \text{constante}$, na qual n é uma constante. Esse processo é chamado de processo polirrópico.



Exemplificando

Um gás passa por um processo de expansão em um conjunto cilindro-pistão, em que $p \cdot V^n = \text{constante}$. Qual será a equação para o cálculo do trabalho, se $n = 0$ e se $n = 1$?

Para o caso de $n = 0$, temos que $p = \text{constante}$. Portanto, o trabalho será:

$$W = \text{constante} \cdot \int_{V_1}^{V_2} dV = \text{constante} \cdot (V_2 - V_1) = p \cdot (V_2 - V_1)$$

Se $n = 1$, temos que $p = \text{constante}/V$. Portanto, o trabalho será:

$$W = \text{constante} \cdot \int_{V_1}^{V_2} \frac{1}{V} dV = \text{constante} \cdot \ln(V_2 / V_1) = p_1 \cdot V_1 \cdot \ln(V_2 / V_1)$$

Sugerimos que você, aluno, deduza a equação para outros valores de n , como $n = 2,5$, a fim de comparar os resultados obtidos.

Além do trabalho, temos também a interação do sistema com suas vizinhas, chamada de transferência de energia através do calor, ou simplesmente calor. Em termodinâmica, Q indica a quantidade de energia transferida através da fronteira do sistema. Temos que

a convenção de sinais para o calor é o inverso do adotado para o trabalho: a transferência de calor para um sistema é positiva e a transferência de calor de um sistema é negativa.

Novamente, a quantidade de calor transferida não é uma propriedade termodinâmica, ou seja, depende da natureza do processo e não apenas dos estados inicial e final. A quantidade de calor transferida durante um processo do estado 1 para o estado 2 é dada por:

$$Q = \int_1^2 \delta Q$$

A taxa de transferência de calor líquida \dot{Q} é a quantidade de energia transferida sob a forma de calor durante um período de tempo entre t_1 e t_2 :

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt$$

O fluxo de calor \dot{q} é a taxa de transferência de calor por unidade de área de superfície do sistema:

$$\dot{Q} = \int_A \dot{q} dA$$

Finalizando, os modos de transferência de calor são a condução, a convecção e a radiação, que já foram estudados na Unidade 3 deste material didático.



Pesquise mais

Para saber mais sobre as considerações feitas sobre os modos de transferência de calor em livros de termodinâmica, sugerimos a leitura das páginas 41-42 do livro de Moran et al. (2014), que tratam da condução, da convecção e da radiação.

Fonte: MORAN, M. J. et al. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

O termo adiabático significa que não existe transferência de calor entre o sistema e suas vizinhanças, ou ela pode ser desprezada. Na prática, esse processo ocorre em três situações especiais: se a fronteira do sistema é delimitada por um material isolante; se existe uma pequena diferença entre a temperatura do sistema e da vizinhança e se a área superficial do sistema é pequena o suficiente, não permitindo que uma transferência de calor significativa ocorra.



De acordo com a convenção de sinais, temos que:

$W > 0$: trabalho realizado pelo sistema.

$W < 0$: trabalho realizado sobre o sistema.

$Q > 0$: transferência de calor da vizinhança para o sistema.

$Q < 0$: transferência de calor do sistema para a vizinhança.

Primeira lei da termodinâmica: balanço de energia para sistemas fechados

Tem-se que os únicos caminhos para variarmos a energia de um sistema fechado são a transferência de energia por trabalho ou calor. Um dos fundamentos da termodinâmica é que a energia se conserva, como mostra a primeira lei da termodinâmica.

O balanço de energia pode ser escrito como:

$$E_2 - E_1 = Q - W$$

Em que o termo $E_2 - E_1$ significa a variação da quantidade de energia contida no sistema durante um determinado intervalo de tempo, Q é a quantidade líquida de energia transferida através da fronteira do sistema por transferência de calor durante um intervalo de tempo e W é a quantidade líquida de energia transferida através da fronteira do sistema por trabalho durante um intervalo de tempo, ou seja, o balanço de energia diz que a quantidade de energia contida em um sistema fechado somente pode aumentar ou diminuir se uma quantidade de energia for transferida através da fronteira do sistema, na forma de calor ou trabalho.

Considerando a energia cinética, a energia potencial e a energia interna, temos que o balanço de energia pode ser reescrito como:

$$\Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U = Q - W$$

O balanço de energia pode ser escrito de várias formas, dependendo da situação. O balanço de energia na forma diferencial pode ser escrito como:

$$dE = \delta Q - \delta W$$

Em que dE é um diferencial de energia, ou seja, é uma propriedade, e δQ e δW são diferenciais inexatas, pois Q e W não são propriedades.

O balanço de energia na forma de taxa temporal pode ser escrito como:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$

Em que, para os sinais algébricos utilizados, dE/dt é a taxa de variação da energia contida no sistema no tempo t , \dot{Q} é a taxa líquida na qual a energia é transferida para dentro do sistema por transferência de calor no tempo t e \dot{W} é a taxa líquida na qual a energia é transferida para fora do sistema por trabalho no tempo t .

Temos que taxa temporal de variação da energia contida no sistema é dada por:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dE_c}{dt} + \frac{dE_p}{dt} + \frac{dU}{dt}$$

Finalmente, o balanço de energia na forma de taxa temporal pode ser reescrito como:

$$\frac{dE_c}{dt} + \frac{dE_p}{dt} + \frac{dU}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$



Pesquise mais

Qual é a aplicação da primeira lei da termodinâmica em problemas de engenharia? Para ilustrar exemplos de utilização do balanço de energia, sugerimos que você estude os exemplos 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6 do livro de Moran et al. (2014), páginas 46-53.

Fonte: MORAN, M. J. et al. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

Balanço de energia para ciclos de potência

A aplicação dos conceitos de energia, a fim de analisarmos um sistema sujeito a um ciclo termodinâmico, é de suma importância. Tem-se que um ciclo termodinâmico é uma sequência de processos que tem o seu início e seu término no mesmo estado, ou seja, os processos se repetem continua e periodicamente, como o sistema de vapor que circula ao longo de uma termoelétrica. Resumindo,

no início e ao final do ciclo, as propriedades termodinâmicas têm o mesmo valor.

O balanço de energia para um sistema submetido a um ciclo termodinâmico é escrito por:

$$\Delta E_{ciclo} = Q_{ciclo} - W_{ciclo}$$

Em que Q_{ciclo} e W_{ciclo} são as quantidades líquidas de transferência de energia por calor e trabalho, respectivamente, para o ciclo. Para um ciclo, como os estados inicial e final são os mesmos, temos que a variação de energia líquida do ciclo é nula. Portanto:

$$Q_{ciclo} = W_{ciclo}$$

Isso é válido para um ciclo de potência, um ciclo de refrigeração ou um ciclo de bomba de calor.



Refletir

Quais são as principais diferenças que definem o que é um ciclo de potência, o que é um ciclo de refrigeração e o que é um ciclo de bomba de calor? Para cada caso temos um sistema percorrendo um ciclo, enquanto se comunica termicamente com dois corpos, um frio e um quente, localizados na vizinhança do sistema submetido ao ciclo.

A Figura 4.6 ilustra o princípio de funcionamento de um ciclo de potência e de um ciclo de refrigeração ou bomba de calor. Nota-se que existe, além da transferência de energia por calor, uma transferência de energia na forma de trabalho. Além disso, percebe-se que o sentido das transferências de energia do ciclo de potência é o inverso do que ocorre nos ciclos de refrigeração ou bomba de calor.

Os ciclos de potência são conhecidos por fornecerem uma quantidade de trabalho líquido para a sua vizinhança a cada ciclo. Para os ciclos de potência, temos que o balanço de energia é escrito como:

$$W_{ciclo} = Q_{entra} - Q_{sai}$$

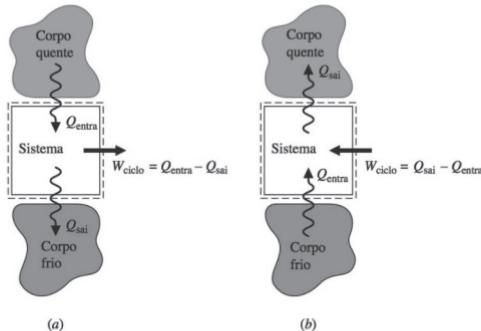
Em que Q_{entra} é a transferência de calor do corpo quente para o sistema, Q_{sai} é a transferência de calor do sistema para o corpo frio, sendo que Q_{entra} é maior que Q_{sai} .

O desempenho de um ciclo de potência é dado em termos da

quantidade de energia adicionada por calor, Q_{entra} , que é convertida em trabalho líquido disponível na vizinhança, W_{ciclo} . Portanto, a eficiência térmica η é dada por:

$$\eta = \frac{W_{\text{ciclo}}}{Q_{\text{entra}}} = \frac{Q_{\text{entra}} - Q_{\text{sai}}}{Q_{\text{entra}}} = 1 - \frac{Q_{\text{sai}}}{Q_{\text{entra}}}$$

Figura 4.6 | Desenho esquemático de um ciclo de potência (a) e de um ciclo de refrigeração ou bomba de calor (b)



Fonte: Moran et al. (2014, p. 54).

Balanço de energia para ciclos de refrigeração e bomba de calor

Analogamente ao desenvolvido para ciclos de potência, a partir da Figura 4.6, temos que, para ciclos de refrigeração e bomba de calor, o balanço de energia pode ser escrito pela equação a seguir, em que Q_{sai} é maior que Q_{entra} , e o trabalho é utilizado para realizar as transferências de energia.

$$W_{\text{ciclo}} = Q_{\text{sai}} - Q_{\text{entra}}$$

Como os ciclos de refrigeração e bomba de calor têm objetivos diferentes, seus desempenhos são definidos de maneira diferente. O objetivo de um ciclo de refrigeração é retirar calor de um corpo frio e o objetivo de uma bomba de calor é inserir calor em um corpo quente.

O coeficiente de desempenho β de um ciclo de refrigeração é dado pela equação a seguir, definida como a razão entre a quantidade de calor que é retirada do corpo frio e entra no sistema e o trabalho utilizado pelo sistema para produzir esse efeito.

$$\beta = \frac{Q_{\text{entra}}}{W_{\text{ciclo}}} = \frac{Q_{\text{entra}}}{Q_{\text{sai}} - Q_{\text{entra}}}$$

O coeficiente de desempenho γ de um ciclo de uma bomba de calor é dado por:

$$\gamma = \frac{Q_{sai}}{W_{ciclo}} = \frac{Q_{sai}}{Q_{sai} - Q_{entra}}$$

Sem medo de errar

Retomando o contexto de aprendizagem, temos uma empresa fabricante de máquinas térmicas que contratou você, aluno, como engenheiro responsável pelo projeto e desenvolvimento de sistemas térmicos.

A proposta dessa SP2 é que você realize um balanço de energia para um ciclo termodinâmico, que pode ser dado por um ciclo de potência, um ciclo de refrigeração ou um ciclo de bomba de calor.

Vamos supor que $W_{ciclo} = 300 \text{ kJ}$, $Q_{sai} = 1.000 \text{ kJ}$ e $Q_{entra} = 700 \text{ kJ}$. Primeiramente, precisamos fazer um balanço de energia, a fim de descobrir qual é o tipo de ciclo termodinâmico proposto e calcular o seu desempenho.

Para um ciclo de potência, temos que o balanço de energia é dado por:

$$W_{ciclo} = Q_{entra} - Q_{sai}$$

Portanto,

$$300 \text{ kJ} \neq 700 \text{ kJ} - 1.000 \text{ kJ}$$

Para ciclos de refrigeração e bomba de calor, temos que o balanço de energia é dado por:

$$W_{ciclo} = Q_{sai} - Q_{entra}$$

Portanto,

$$300 \text{ kJ} = 1.000 \text{ kJ} - 700 \text{ kJ}$$

Se o ciclo for um ciclo de refrigeração, temos que o seu coeficiente de desempenho β será:

$$\beta = \frac{Q_{entra}}{W_{ciclo}} = \frac{700 \text{ kJ}}{300 \text{ kJ}} = 2,33$$

Nota-se que o coeficiente de desempenho β é maior que a unidade.

Se o ciclo for um ciclo de uma bomba de calor, o seu coeficiente

de desempenho γ é dado por:

$$\gamma = \frac{Q_{sai}}{W_{ciclo}} = \frac{1.000 \text{ kJ}}{300 \text{ kJ}} = 3,33$$

Nota-se novamente que o coeficiente de desempenho γ é maior que a unidade. Tem-se que, quanto maior forem os valores desses coeficientes, mais eficientes serão os ciclos de refrigeração e bomba de calor.

Já a eficiência térmica de um ciclo de potência nunca é maior que a unidade, ou seja, a eficiência térmica de um ciclo de potência pode ser dada em valores percentuais, sendo que, quanto mais próximo da unidade forem os valores de eficiência térmica, mais eficientes serão os ciclos de potência.

Avançando na prática

Balanço de energia em um conjunto cilindro-pistão

Descrição da situação-problema

Um conjunto cilindro-pistão contém $0,5 \text{ kg}$ de um gás que está submetido a um processo em que a relação pressão-volume é dada por $p \cdot V = \text{constante}$. Determine a transferência de calor para o processo, em kJ, sendo que a pressão inicial é 3 bar, o volume inicial é $0,1 \text{ m}^3$, o volume final é $0,2 \text{ m}^3$ e a variação da energia interna específica do gás no processo é $u_2 - u_1 = -50 \text{ kJ/kg}$. Despreze a variação da energia cinética e da energia potencial do sistema.

Resolução da situação-problema

Aplicando a primeira lei da termodinâmica para um sistema fechado, temos:

$$\Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U = Q - W$$

Desprezando a variação da energia cinética e da energia potencial do sistema e considerando que $U = m \cdot u$, o balanço de energia fica:

$$\Delta U = m(u_2 - u_1) = Q - W$$

A transferência de calor para o processo é dada por:

$$Q = m(u_2 - u_1) + W$$

O trabalho é calculado por:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

Se $n = 1$, temos que $p = \text{constante}/V$. Portanto, o trabalho será:

$$W = \text{constante} \cdot \int_{V_1}^{V_2} \frac{1}{V} dV = \text{constante} \cdot \ln(V_2 / V_1) = p_1 \cdot V_1 \cdot \ln(V_2 / V_1)$$

Finalmente, a transferência de calor para o processo é dada por:

$$Q = m(u_2 - u_1) + p_1 \cdot V_1 \cdot \ln(V_2 / V_1)$$

$$Q = 0,5 \text{ kg} \cdot (-50 \text{ kJ/kg}) + 3 \text{ bar} \cdot 0,1 \text{ m}^3 \cdot \left| \frac{10^5 \text{ N/m}^2}{1 \text{ bar}} \right| \cdot \left| \frac{1 \text{ kJ}}{10^3 \text{ N/m}} \right| \cdot \ln(0,2 \text{ m}^3 / 0,1 \text{ m}^3)$$

$$Q = -25 \text{ kJ} + 20,79 \text{ kJ} = -4,21 \text{ kJ}$$

Temos que o sinal negativo no valor da transferência de calor significa que a quantidade líquida de energia foi transferida do sistema para a vizinhança, como mostra a convenção de sinais.

Faça valer a pena

1. Tem-se que um ciclo termodinâmico é uma sequência de processos que se repetem contínua e periodicamente. Avalie as afirmações a seguir:

I- Para um ciclo, os estados inicial e final são os mesmos, dessa forma, temos que a variação de energia líquida do ciclo é nula.

II- O balanço de energia para um sistema submetido a um ciclo termodinâmico é escrito por $\Delta E_{\text{ciclo}} = W_{\text{ciclo}} - Q_{\text{ciclo}}$, em que W_{ciclo} e Q_{ciclo} são as quantidades líquidas de transferência de energia por trabalho e calor, respectivamente, para o ciclo.

III- O sentido das transferências de energia do ciclo de potência são o inverso do que ocorre nos ciclos de refrigeração ou bomba de calor.

É correto o que se afirma em:

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

2. Um ciclo termodinâmico é uma sequência de processos que começa e termina no mesmo estado. No final do ciclo, todas as propriedades têm os mesmos valores que possuíam no início.

Analise as afirmações a seguir e julgue-as como verdadeiras (V) ou falsas (F):

() Os ciclos de potência são conhecidos por fornecerem uma quantidade de trabalho líquido para a sua vizinhança a cada ciclo.

() O objetivo de um ciclo de refrigeração é retirar calor de um corpo frio.

() O ciclo de bomba de calor é utilizado para inserir calor em um corpo frio.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência correta:

a) V, V, V.

b) V, V, F.

c) V, F, V.

d) F, F, V.

e) F, V, F.

3. Tem-se que um ciclo termodinâmico é uma sequência de processos que se repetem contínua e periodicamente. O objetivo de um ciclo de refrigeração é retirar calor de um corpo frio.

Considere que um clico de refrigeração remove da fonte fria 700 kJ de calor, enquanto cede para a fonte quente 1000 kJ de calor.

O coeficiente de desempenho β para esse ciclo de refrigeração é aproximadamente?

a) 1,2.

b) 1,7.

c) 2,3.

d) 2,8.

e) 3,1.

Seção 4.3

Avaliação de propriedades e modelo de gás ideal

Diálogo aberto

Caro aluno, para aplicarmos o balanço de energia em um sistema fechado, devemos conhecer as propriedades desse sistema e como essas propriedades relacionam-se. O conhecimento dos conceitos fundamentais e das relações entre as propriedades relevantes para se resolver um problema de engenharia se torna vital para o sucesso da análise termodinâmica de um sistema. Tem-se que a avaliação das propriedades a partir do diagrama $p-v-T$, a obtenção dos dados de propriedades a partir das tabelas termodinâmicas e a aplicação do modelo de gás ideal fazem parte da modelagem de um sistema termodinâmico, seja no projeto ou na operacionalização e seu controle.

Assim, o contexto de aprendizagem utilizado como situação da realidade profissional (SR) proposta nesta unidade é focado em uma empresa fabricante de máquinas térmicas, que contratou você, aluno, como engenheiro responsável pelo projeto e desenvolvimento de sistemas térmicos.

Assim, na situação-problema (SP) desta seção, você analisará o comportamento de um gás ideal submetido a um ciclo termodinâmico, sujeito a uma compressão politrópica, a fim de calcular o trabalho e o calor transferidos nesse processo. Quais são as considerações e quais são os modelos utilizados para se resolver essa situação-problema? Quais são as variáveis relevantes nos cálculos?

Para isso, devemos conhecer e compreender os conceitos de fase e substância pura; de estado termodinâmico, a relação $p-v-T$; a equação de estado de gás ideal e as relações de processos politrópicos, a fim de aplicá-los na solução da situação-problema proposta.

Está preparado para esse novo desafio? Bons estudos!

Não pode faltar

Fase e substância pura; estado termodinâmico

Fase é o termo que designa uma quantidade de matéria homogênea, levando-se em consideração sua composição química e sua estrutura física. Entende-se por estrutura física homogênea que a matéria em estudo ou é sólida, ou é líquida, ou é gasosa, em sua totalidade. Tem-se que um sistema pode apresentar uma ou mais fases, como um sistema que contém água líquida e vapor d'água, que apresenta duas fases. Outro exemplo seria um sistema que contém dois gases, como o nitrogênio e o oxigênio, que apresentam uma única fase gasosa. Tem-se que uma mistura de líquidos miscíveis forma uma única fase líquida e uma mistura de líquidos imiscíveis forma duas fases líquidas. Finalmente, durante um processo de mudança de fase, como a vaporização, a fusão, a condensação, a sublimação etc., temos que duas fases coexistem ao longo desse processo.

Uma substância pura é uma substância na qual sua composição química é uniforme e invariável, ou seja, ela pode existir em mais de uma fase, porém sua composição química é a mesma em todas as fases.



Exemplificando

Um exemplo típico de uma substância pura é o sistema que contém água líquida e vapor d'água, que apresenta duas fases, porém, uma única composição química.

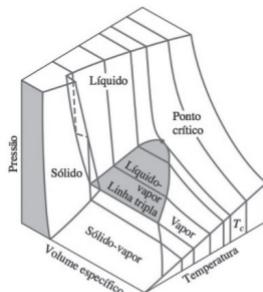
Para um sistema fechado e em equilíbrio, temos que o estado termodinâmico intensivo é descrito pelos valores das propriedades termodinâmicas intensivas. O princípio dos estados equivalentes mostra que, para sistemas compressíveis simples, ou seja, sistemas formados por substâncias puras, duas propriedades termodinâmicas intensivas independentes definem o estado termodinâmico do sistema. Isso significa que, se soubermos os valores de duas propriedades termodinâmicas intensivas independentes, os valores de todas as outras propriedades intensivas estarão fixados, ou seja, serão uma função das duas propriedades.

Relação p-v-T

Ainda no estudo das propriedades de substâncias puras simples compressíveis, temos que análises experimentais mostram que a temperatura e o volume específico, duas propriedades intensivas de um sistema, podem ser consideradas independentes entre si. A pressão, que é outra propriedade intensiva, é uma função da temperatura e do volume específico, portanto temos que $p = p(T, v)$. O gráfico dessa função é uma superfície, que é chamada de superfície p-v-T. Estudaremos o comportamento dessas superfícies p-v-T para sistemas de interesse.

A Figura 4.7 mostra a superfície p-v-T tridimensional para uma substância que se expande durante a solidificação, como a água. As coordenadas de um ponto na superfície p-v-T indicam os valores da temperatura, do volume específico e da pressão quando a substância se encontra em equilíbrio. É possível notar que a figura apresenta regiões denominadas de sólido, líquido e vapor. Nessas regiões, por serem regiões monofásicas, o estado em qualquer ponto interior a elas é definido por duas quaisquer seguintes propriedades: temperatura, volume específico e pressão, pois todas as três propriedades são independentes entre si quando existe somente uma fase.

Figura 4.7 | Superfície p-v-T e projeções para uma substância que se expande durante a solidificação



Fonte: Moran et al. (2014, p. 72).

Para as regiões bifásicas, que apresentam duas fases coexistindo em equilíbrio, como é o caso das regiões denominadas de líquido-vapor; sólido-vapor e sólido-líquido, tem-se que, no interior dessas regiões, a pressão e a temperatura não são independentes entre si, ou seja, uma propriedade não pode ser alterada sem que tenhamos uma alteração na outra propriedade. Portanto, o estado não pode ser definido por essas duas propriedades, sendo definido, portanto, pelo volume específico e uma outra propriedade: ou a temperatura, ou a pressão.

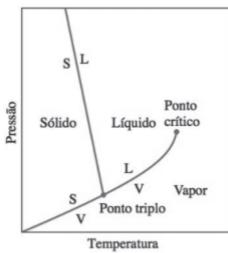
Uma região trifásica é definida como uma região na qual três fases coexistem em equilíbrio. A linha tripla, mostrada na Figura 4.7, ilustra essa região.

O estado de saturação denomina o estado na qual uma mudança de fase ocorre, desde seu início até o seu término. A região de líquido-vapor, delimitada pelas linhas de saturação (de líquido e de vapor), que tem um formato de “sino”, é chamada de domo de vapor. No topo do domo, onde as linhas de líquido saturado (à esquerda) e de vapor saturado (à direita) se encontram, temos o ponto crítico. A temperatura crítica T_c de uma substância pura indica a máxima temperatura na qual as fases líquido e vapor podem coexistir em equilíbrio. A título de informação, o termo vapor é utilizado em termodinâmica para denominar um gás que está em uma temperatura na qual a mesma substância pode existir nos estados sólido e líquido, abaixo da temperatura crítica.

O diagrama de fases é utilizado para relacionar duas propriedades, sendo, portanto, uma projeção da superfície p - v - T tridimensional sobre o plano pressão-temperatura, como mostra a Figura 4.8, que exemplifica o diagrama de fases de uma substância que se expande durante a solidificação. Tem-se que as regiões bifásicas se reduzem a linhas e a linha tripla se reduz a um ponto, denominado ponto triplo, que para a água é dado pela temperatura de **273,16 K** e pressão de **611,3 Pa ou 0,00602 atm**.

A pressão de saturação indica a pressão na qual se inicia a mudança de fase, para uma determinada temperatura, que é chamada de temperatura de saturação, que é única para cada pressão de saturação e vice-versa.

Figura 4.8 | Diagrama de fases



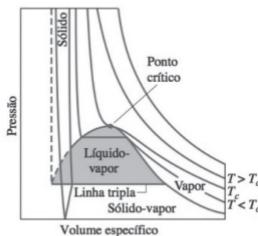
Fonte: Moran et al. (2014, p. 72).

O diagrama p - v , muito utilizado para resolução de problemas, ilustra a projeção da superfície p - v - T tridimensional sobre o plano

pressão-volume específico, como mostra a Figura 4.9, que exemplifica o diagrama de fases de uma substância que se expande durante a solidificação.

Observando o comportamento das linhas de temperatura constante, chamadas de isotermas, tem-se que a pressão se mantém constante na região de líquido-vapor, em que ocorre a mudança de fase. Além disso, nas regiões monofásicas, a pressão diminui com um aumento do volume específico. Para temperaturas iguais ou superiores à temperatura crítica, a pressão decresce continuamente com um aumento de volume específico, para uma dada temperatura.

Figura 4.9 | Diagrama p- v



Fonte: Moran et al. (2014, p. 72).

O diagrama $T\text{-}v$, também muito utilizado para resolução de problemas, ilustra a projeção da superfície $p\text{-}v\text{-}T$ tridimensional sobre o plano temperatura-volume específico, como mostra a Figura 4.10, que ilustra o diagrama $T\text{-}v$ da água.

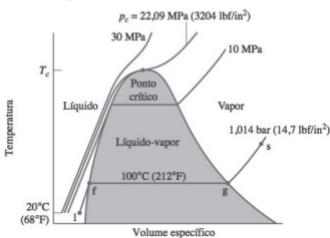


Refletir

Para uma mudança de fase, observando o comportamento da linha isobárica na região de líquido-vapor, qual é o comportamento da temperatura? A temperatura é constante? Aumenta com um aumento no volume específico? Diminui com um aumento no volume específico?

Observando o comportamento das linhas de pressão constante, chamadas de isobáricas, tem-se que, para pressões inferiores à pressão crítica, a temperatura aumenta com um aumento no volume específico para uma dada pressão, nas regiões monofásicas de líquido e de vapor.

Figura 4.10 | Diagrama T-v da água



Fonte: Moran et al. (2014, p. 73).

Utilizando a Figura 4.10, temos os pontos *i*, *f*, *g* e *s*, todos na mesma linha de pressão. Para o trecho que liga os pontos *i* e *f*, temos um aumento de temperatura significativo para um aumento de volume específico, em que o líquido é chamado de líquido comprimido ou sub-resfriado, pois sua temperatura está abaixo da temperatura de saturação para a pressão especificada. O ponto *f* indica o ponto de líquido saturado, pois qualquer acréscimo de calor que for inserido no sistema resulta na formação de vapor em qualquer mudança de temperatura. Para o trecho que liga os pontos *f* e *g*, temos uma mistura bifásica de líquido-vapor, na qual ocorre a mudança de fase, que ocorre até o ponto *g*, onde a última porção de líquido é vaporizada, chamada de estado de vapor saturado. Nessa região, é importante sabermos o título *x* da mistura bifásica líquido-vapor, que indica a razão entre a massa de vapor presente e a massa total da mistura:

$$x = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{líquido}} + m_{\text{vapor}}}$$

Finalmente, para o trecho que liga os pontos *g* e *s*, temos um aumento de temperatura para um aumento de volume específico, em que o vapor é chamado de vapor superaquecido, pois sua temperatura está acima da temperatura de saturação para a pressão especificada.

Pesquise mais

Para saber como obtemos as propriedades termodinâmicas de um estado, a partir das tabelas termodinâmicas de líquido comprimido, de vapor superaquecido, e de saturação, além de exemplos práticos de utilização dessas tabelas, sugerimos a leitura do livro de Moran et al. (2014), páginas 76-81.

Fonte: MORAN, M. J. et al. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

Avaliação da entalpia e da energia interna

Nas análises termodinâmicas, é comum encontrarmos nas equações a soma $U + (p \cdot V)$. Por convenção, nomeou-se essa soma de entalpia, que é uma propriedade representada por H :

$$H = U + (p \cdot V)$$

Sendo que sua unidade é a mesma da energia interna. A entalpia específica é dada por:

$$h = u + (p \cdot v)$$

A energia interna específica para uma mistura bifásica líquido-vapor é calculada para um dado título, como sendo:

$$u = (1 - x)u_f + x \cdot u_g = u_f + x(u_g - u_f)$$

Em que u_f é a energia interna específica para o líquido saturado e u_g é a energia interna específica para o vapor saturado.

Analogamente, o volume específico e a entalpia específica para uma mistura bifásica líquido-vapor também são calculados respectivamente para um dado título, como sendo:

$$v = (1 - x)v_f + x \cdot v_g = v_f + x(v_g - v_f)$$

$$h = (1 - x)h_f + x \cdot h_g = h_f + x(h_g - h_f)$$

Finalizando, os calores específicos, também chamados de capacidades térmicas, são propriedade que relacionam a quantidade de energia adicionada a um sistema por transferência de calor com a temperatura do sistema. Os calores específicos ao volume constante e à pressão constante, respectivamente, são dados por:

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$$

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

Para o modelo de substância incompressível, no qual o volume específico da água líquida é praticamente constante e a energia

interna específica varia principalmente com a temperatura, temos que $c_v = c_p$. Além disso, para calor específico c constante, temos:

$$u_2 - u_1 = c(T_2 - T_1)$$
$$h_2 - h_1 = c(T_2 - T_1) + v(p_2 - p_1)$$

Equação de estado de gás ideal

O fator de compressibilidade Z é dado por uma razão adimensional como:

$$Z = \frac{p\bar{v}}{\bar{R}T} = \frac{pv}{RT}$$

Em que \bar{v} é o volume específico dado em mol; \bar{R} é denominado de constante universal dos gases, que vale 8,314 kJ/kmol·K e; R é a constante para um gás particular, com peso molecular (ou atômico) igual a M .



Valores típicos da constante R são mostrados na Tabela 3.1 do livro de Moran et al. (2014), página 94. Valores de R para outras substâncias são obtidas a partir da relação $R = \bar{R}/M$, em que o peso molecular M é encontrado a partir da Tabela mA-1 do livro de Moran et al. (2014), página 709.

Fonte: MORAN, M. J. et al. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

Para os estados nos quais o fator de compressibilidade Z é igual a um, temos que a equação de estado de um gás ideal pode ser escrita como:

$$pv = RT$$

Formas alternativas podem ser escritas, como na base mássica:

$$pV = mRT$$

Na base peso molecular:

$$p\bar{v} = \bar{R}T$$

E na base molar:

$$pV = n\bar{R}T$$

Além da equação de estado de um gás ideal, o modelo de gás ideal apresenta mais duas equações, derivadas das seguintes conclusões:

a energia interna específica depende somente da temperatura e a entalpia específica depende também somente da temperatura, ou seja:

$$u = u(T)$$

$$h = h(T) = u(T) + RT$$

Relações de processos politrópicos

Tem-se que um processo politrópico é um processo de quase equilíbrio, dado por:

$$pV^n = \text{constante}$$

Para um processo politrópico entre dois estados, temos:

$$p_1 V_1^n = p_2 V_2^n$$

Para qualquer valor do expoente que seja diferente de 1 ($n \neq 1$), segue que:

$$\int_1^2 pdV = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1-n}$$

E para $n = 1$:

$$\int_1^2 pdV = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Para um processo politrópico em que o gás tem um comportamento de gás ideal, temos:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1}$$

Para $n \neq 1$:

$$\int_1^2 pdV = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1-n}$$

E para $n = 1$:

$$\int_1^2 pdV = mRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$



Assimile

Finalmente, a energia interna específica de um gás que pode ser modelado com um gás ideal depende somente da temperatura.

Portanto, temos:

$$u(T_2) - u(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_v(T) dT$$

Analogamente, a entalpia específica, que também depende somente da temperatura, será:

$$h(T_2) - h(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT$$

Para calores específicos constantes, temos:

$$u(T_2) - u(T_1) = c_v(T_2 - T_1)$$

$$h(T_2) - h(T_1) = c_p(T_2 - T_1)$$

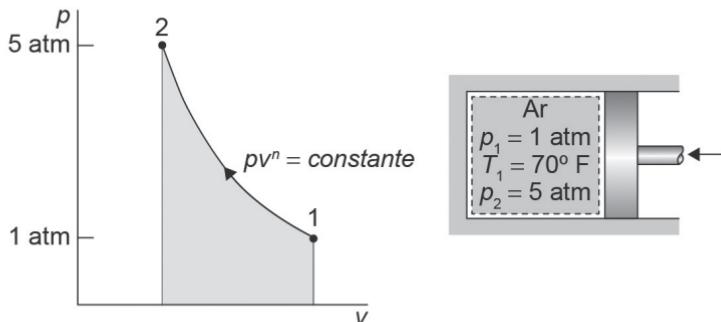
Sem medo de errar

Retomando o contexto de aprendizagem, temos uma empresa fabricante de máquinas térmicas, que contratou você, aluno, como engenheiro responsável pelo projeto e desenvolvimento de sistemas térmicos.

Na situação-problema (SP) desta seção, você, aluno, analisará o comportamento de um gás ideal submetido a um ciclo termodinâmico, sujeito a uma compressão politrópica, a fim de calcular o trabalho e o calor transferidos nesse processo.

Consideremos que a compressão politrópica é dada pelo gráfico apresentado na Figura 4.11. Além disso, as variações de energia potencial e energia cinética são consideradas nulas no processo.

Figura 4.11 | Diagrama esquemático e dados fornecidos para o problema proposto



Fonte: adaptada de Moran et al. (2014, p. 109).

Considerando os calores específicos constantes e a constante do processo politrópico $n = 1,3$, temos que o trabalho para um gás ideal é dado por:

$$W = \int_1^2 pdV = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1-n}$$

Na base mássica, temos que o trabalho será:

$$\frac{W}{m} = \frac{R(T_2 - T_1)}{1-n}$$

A partir de um balanço de energia, o calor trocado será:

$$\frac{Q}{m} = \frac{W}{m} + (u_2 - u_1)$$

Como os calores específicos foram considerados como sendo constantes, temos que a equação do calor pode ser reescrita como:

$$\frac{Q}{m} = \frac{W}{m} + c_v(T_2 - T_1)$$

Para $n = 1,3$, podemos calcular a temperatura T_2 a partir da relação:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} = 70 \text{ } ^\circ F \left(\frac{5 \text{ atm}}{1 \text{ atm}} \right)^{(1,3-1)/1,3} = 308 \text{ } ^\circ F$$

Sabendo o valor da temperatura T_2 , podemos calcular o trabalho na base mássica:

$$\frac{W}{m} = \frac{R(T_2 - T_1)}{1-n} = \left(\frac{1,986 \text{ Btu}}{28,97 \text{ lb}^\circ R} \right) \left(\frac{768^\circ R - 530^\circ R}{1-1,3} \right) = -54,39 \text{ Btu / lb}$$

A partir das tabelas termodinâmicas, utilizando como valor de entrada a temperatura T_1 , encontramos o valor do calor específico c_v . Com o valor de c_v em mãos, calculamos o valor do calor trocado nesse processo:

$$\frac{Q}{m} = \frac{W}{m} + c_v(T_2 - T_1) = -54,39 \text{ Btu / lb} + \left(0,171 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}^\circ R} \right) (768^\circ R - 530^\circ R) = -13,69 \text{ Btu / lb}$$

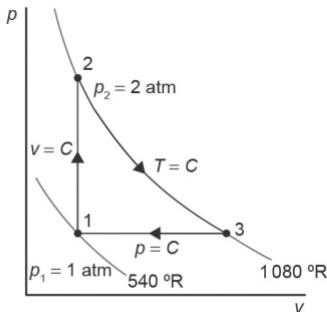
Avançando na prática

Análise de um gás ideal submetido a um ciclo termodinâmico

Descrição da situação-problema

Analise o comportamento de um gás ideal submetido ao ciclo termodinâmico mostrado na Figura 4.12, sujeito a uma compressão e uma expansão, a fim de calcular as propriedades nos estados termodinâmicos de interesse: a temperatura do ar no estado 2 e o volume específico do ar no estado 3. Considere que o processo 1-2 é um processo ao volume específico constante, o processo 2-3 é uma expansão à temperatura constante e o processo 3-1 é uma compressão à pressão constante.

Figura 4.12 | Diagrama esquemático e dados fornecidos para o problema proposto



Fonte: adaptada de Moran et al. (2014, p. 98).

Resolução da situação-problema

Utilizando a equação de estado de um gás ideal, $pv = RT$, temos que a temperatura no estado 2 será: $T_2 = p_2 v_2 / R$.

Para obtermos o volume específico no estado 2, temos que $v_1 = v_2$. Portanto: $v_2 = v_1 = RT_1 / p_1$.

Combinando as equações, temos:

$$T_2 = T_1(p_2 / p_1) = 540 \text{ }^{\circ}\text{R} (2 \text{ atm} / 1 \text{ atm}) = 1080 \text{ }^{\circ}\text{R}$$

O volume específico no estado 3 é dado por: $v_3 = RT_3 / p_3$. Observando a Figura que $T_3 = T_2$, $p_3 = p_1$ e $R = \bar{R} / M$, temos:

$$v_3 = \frac{\bar{R} T_2}{M p_1} = \left(\frac{1545 (\text{ft} \cdot \text{lbf}) / (\text{lbmol} \cdot \text{R})}{28,91 \text{ lb} / \text{lbmol}} \right) \frac{1080 \text{ }^{\circ}\text{R}}{14,7 \text{ lbf} / \text{in}^2} \cdot \frac{1 \text{ ft}^2}{144 \text{ in}^2} = 27,2 \text{ ft}^3 / \text{lb}$$

Em que o peso molecular do ar é obtido a partir das tabelas termodinâmicas.

Faça valer a pena

1. Qual o título de uma mistura bifásica líquido-vapor, cuja a massa de líquido representa 30% da mistura total?

Com base no texto, assinale a alternativa correta:

- a) 0,3.
- b) 0,7.
- c) 0,42.
- d) 2,3.
- e) 0,5.

2. Considere um sistema formado por água líquida em equilíbrio com uma mistura gasosa de ar e vapor d'água. Avalie as afirmações a seguir:

- I- O sistema é composto por duas fases.
- II- O sistema consiste em uma substância pura.
- III- O sistema é uma estrutura física homogênea.

É correto o que se afirma em:

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

3. Uma mistura bifásica líquido-vapor de uma substância possui uma pressão de 50 bar e ocupa um volume de $0,2\text{ m}^3$. As massas de líquido e vapor saturados presentes são 3,8 kg e 4,2 kg, respectivamente. Determine o volume específico da mistura.

Assinale a alternativa correta:

- a) $0,012\text{ m}^3 / \text{kg}$.
- b) $0,025\text{ m}^3 / \text{kg}$.
- c) $0,032\text{ m}^3 / \text{kg}$.
- d) $0,041\text{ m}^3 / \text{kg}$.
- e) $0,018\text{ m}^3 / \text{kg}$.

Referências

MORAN, M. J. et al. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.



The background of the page features a minimalist abstract design. It consists of several large, overlapping triangles in shades of blue and grey. A solid white rectangular base supports the bottom-left triangle. The triangles overlap each other, creating a sense of depth and geometric complexity against a plain white background.

ISBN 978-85-522-0202-8



9 788552 02028 >