

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESCOAMENTO EM DUTOS

Professor

Sidney Stuckenbruck, PhD

2024

ESCOAMENTO EM DUTOS

por

Sidney Stuckenbruck, PhD

stuckenbruck@gmail.com

2024

CONTEÚDO

Prefácio

1- Conceitos Básicos

- 1.1 Fluidos Reais e Perfeitos
- 1.2 Dimensões e Unidades
- 1.3 Propriedades de Campo de Velocidade
 - 1.3.1 Descrição Euleriana e Lagrangeana
 - 1.3.2 Campo de Velocidade
 - 1.3.3 Aceleração de uma Partícula
 - 1.3.4 Vazão Volumétrica e de Massa
- 1.4 Propriedades Termodinâmicas de um Fluido
 - 1.4.1 O Conceito de Pressão em Hidrodinâmica
 - 1.4.2 Energia do Sistema
 - 1.4.3 Relações de Estado para Gases
 - 1.4.4 Relações de Estado para Líquidos
 - 1.4.5 Coeficiente de Viscosidade
 - 1.4.6 Fluidos Não-Newtonianos
 - 1.4.7 Coeficiente de Compressibilidade
 - 1.4.8 Coeficiente de Expansão Volumétrica Térmica
 - 1.4.9 Coeficiente de Condutividade Térmica
 - 1.4.10 Pressão de Saturação e Cavitação
 - 1.4.11 Condições na Fronteira Sólida
- 1.5 Não-Idealidade das Propriedades Físicas de um Fluido
 - 1.5.1 Condições Críticas e Além (Superfluidos ou Fluidos Densos)
 - 1.5.2 Comportamento de Fase para Substância Pura
 - 1.5.3 Processo isotérmico
 - 1.5.4 Processo isobárico
 - 1.5.5 Diagrama de volume-pressão para substância pura
 - 1.5.6 Ponto de bolha e ponto de orvalho
 - 1.5.7 Misturas de Dois Componentes (Binários)
 - 1.5.8 Diagrama de Fase para Misturas de Dois Componentes
 - 1.5.9 Propriedades na Região Crítica (Fluidos Densos)

2- Introdução à Mecânica dos Fluidos

- 2.1 Distribuição de Pressão num Fluido
 - 2.1.1 Pressão e Gradiente de Pressão
 - 2.1.2 Condição de Equilíbrio
 - 2.1.3 Pressões Absolutas e Relativas
 - 2.1.4 Distribuição de Pressão Hidrostática
 - 2.1.5 Pressão Hidrostática em Líquidos
 - 2.1.6 Pressão Hidrostática em Gases
 - 2.1.7 Manômetros
- 2.2 Relações Integrais para um Volume de Controle
 - 2.2.1 As Leis de Conservação – Sistemas e Volumes de Controle
 - 2.2.2 O Teorema de Transporte de Reynolds
 - 2.2.2.a Volume de Controle Fixo
 - 2.2.2.b Volume de Controle Móvel, Não-Deformável
 - 2.2.3 Aproximação para escoamento Unidimensional
 - 2.2.4 Conservação de Massa

- 2.2.5 Conservação de Quantidade de Movimento Linear
- 2.3 As Equações de Euler e Bernoulli
 - 2.3.1 Linha Piezométrica e Linha de Energia
- 2.4 A Equação de Energia
 - 2.4.1 Aproximação para Escoamento Unidimensional
 - 2.4.2 Equação de Energia e Equação de Bernoulli
 - 2.4.3 Equação de Pressão de Bernoulli
- 2.5 Equações de Conservação – Relações Diferenciais
 - 2.5.1 A Equação de Continuidade
 - 2.5.2 A Equação de Quantidade de Movimento
 - 2.5.3 A Equação de Energia
- 3- Escoamento Viscoso em Dutos
 - 3.1 Força de Resistência e Dissipação de Energia
 - 3.2 Regimes de Escoamento
 - 3.2.1 Escoamento Laminar - Hagen -Poiseuille
 - 3.2.2 Escoamento Laminar - Couette
 - 3.2.3 Escoamento Turbulento
 - 3.2.4 Dutos Lisos
 - 3.2.5 Dutos Rugosos
 - 3.2.6 Fator de Atrito em Dutos Lisos e Rugosos
 - 3.2.7 Redução de Arraste pela Adição de Polímeros
 - 3.2.8 Rugosidade Absoluta - Oleodutos e Gasodutos
 - 3.3 Diâmetro Hidráulico
 - 3.4 Equações de Conservação – Soluções Numéricas
 - 3.4.1 Hipóteses Simplificadoras
 - 3.4.2 Equações de Conservação
 - 3.4.3 Regime Permanente
- 4 Perdas Localizadas
 - 4.1 Perda de Carga
 - 4.2 Expansão Súbita
 - 4.3 Expansão Gradual -- Difusor
 - 4.4 Contração Súbita
 - 4.5 Curvas e Junções em Dutos
 - 4.6 Entradas e Saídas de Dutos
 - 4.7 Válvulas
 - 4.8 Comprimento Equivalente
- 5- Bombas Centrífugas
 - 5.1 Transferência de Energia em Máquinas de Fluxo Rotativas
 - 5.2 Desempenho Teórico de Máquinas Rotativas
 - 5.3 Velocidade Específica
 - 5.4 Características de Bombas Centrífugas
 - 5.5 Altura de Pressão de Segurança à Cavitação (NPSH)
 - 5.6 Curvas Características Reais de Bombas
 - 5.7 Curvas Características do Sistema e Bomba
 - 5.8 Efeito da Rotação na Curva Característica da Bomba
 - 5.9 Controle de Vazão por Válvula ou Velocidade

- 6 Aplicações de Escoamento Viscoso
 - 6.1 Três Problemas para Dutos
 - 6.1.1 Problema-1 – Cálculo da Perda de Carga
 - 6.1.2 Problema-2 – Cálculo da Vazão
 - 6.1.3 Problema-3 – Cálculo do Diâmetro
 - 6.2 Sistemas com Dutos Múltiplos
 - 6.2.1 Queda de Pressão para Dutos em Série
 - 6.2.2 Queda de Pressão para Dutos em paralelo
 - 6.2.3 Reservatórios Interconectados por uma Junção
 - 6.3 Escoamento por Orifícios
 - 6.3.1 Placa de Orifício
 - 6.3.2 Bocal
 - 6.3.3 Venturi
 - 6.4 Drenagem de Tanques e Dutos
 - 6.4.1 Sifão
 - 6.4.2 Drenagem de Tanque
 - 6.4.3 Drenagem de Duto
 - 6.5 Ruptura de Duto Transportando Líquido
 - 6.5.1 Relação entre Massa de Líquido e Pressão no Interior do Duto
 - 6.5.1.1 Fluxo por Trinca
 - 6.5.1.2 Fluxo por Fissura
 - 6.6 Assentamento e Ancoragem de Dutos
 - 6.6.1 Esforços e Estabilidade de Blocos de Ancoragem
- 7- Escoamento Compressível
 - 7.1 Introdução
 - 7.2 A Velocidade do Som – Número de Mach
 - 7.3 Estados de Estagnação
 - 7.4 Escoamento Isentrópico com Variação de Área
 - 7.5 Operação de Bocais Convergentes e Divergentes
- 8- Escoamento Compressível em Dutos
 - 8.1 Escoamento Adiabático em Duto com Atrito
 - 8.2 Escoamento Isotérmico em Duto com Atrito
 - 8.3 Escoamento Isotérmico de um Fluido Real
 - 8.4 Expressões Práticas para Escoamento em Gasoduto
(Teórico, Weimouth, Panhandle-A, Panhandle-B, IGT, Mueller, Frizsche, AGA-A, AGA-B)
 - 8.5 Medida de Vazão em Escoamento Compressível
 - 8.5.1 Medidores de Vazão
 - 8.5.2 Tubo de Estagnação (Pitot)
 - 8.6 Análise de Sensibilidade
 - 8.6.1 Vazão vs Pressão
 - 8.6.2 Vazão vs Diâmetro
 - 8.6.3 Pressão vs Diâmetro
 - 8.7 Blowdown
 - 8.7.1 Escoamento no Sistema de Descarga
 - 8.7.2 Soluções Analíticas
 - 8.8 Presença de Água e Formação de Hidratos em Gás Natural
 - 8.8.1 Vapor de Água em Gás Natural

- 8.8.2 Processo de Desidratação
- 8.8.3 Hidratos em Gás Natural
- 8.9 Mistura de Gases
 - 8.9.1 Mistura de Gases Ideais
 - 8.9.2 Mistura de Gases Reais
 - 8.9.3 Mistura de Gases no Escoamento em Gasodutos Convergentes
- 9- Problema Térmico – Garantia de Escoamento
 - 9.1 Transferência de Calor
 - 9.2 Leis Fundamentais de Transferência de Calor
 - 9.3 Transferência de Calor por Mecanismos Combinados
 - 9.4 Parâmetros Adimensionais em Convecção Forçada
 - 9.4.1 Correlações
 - 9.5 Transferência de Calor em Dutos
 - 9.5.1 Dutos Enterrados
 - 9.5.2 Distribuição de Temperatura e Efeito Joule-Thomson
 - 9.5.3 Garantia de Escoamento – Isolamento Térmico de Oleodutos e Gasodutos
- 10- Escoamento Multifásico
 - 10.1 Conceitos e Definições
 - 10.2 Padrões de Escoamento
 - 10.3 Métodos de Solução
 - 10.3.1 Modelos Empíricos
 - 10.3.1.1 Escoamento Vertical - Ascendente
 - 10.3.1.2 Escoamento Horizontal
 - 10.3.1.3 Escoamento Inclinado
 - 10.3.2 Modelos Matemáticos
 - 10.3.2.1 Modelo Homogêneo
 - 10.3.2.2 Modelo Separado
 - 10.3.2.3 Modelo de Dois Fluidos
 - 10.3.2.4 Modelo de Deslizamento (*Drift Flux*)
- 11- Projetos Aplicados
 - 11.1 Operação de um *Flare*
 - 11.2 Esforço sobre Coluna de Descarga Durante Blowdown
 - 11.3 Ruptura com Término Duplo em Linha de Gás - *Pipe Whip*
 - 11.4 Sistema de Transmissão de Gás
 - 11.5 Distribuição de Temperatura em Gasoduto - Efeito Joule-Thomson
 - 11.6 Análise de Ruptura em um Gasoduto - *Carbon Footprint*
 - 11.7 Projeto de um Longo Gasoduto - São Carlos-Brasília
 - 11.8 Análise de Escoamento entre Estações de Compressão - Gasoduto GASBOL

APÊNDICES

- A- Relações Vetoriais
- B- Comportamento de Gases Reais
- C- Escoamento Adiabático de Ar em Dutos (Tabela)
- D- O Coeficiente Joule-Thomson
- E- Fatores de Conversão de Unidades
- F- TRANSLIQ - Código para Transientes em Líquidos
- G- Transientes em Gasodutos
- H- Artigos sobre Escoamento em Dutos (Anexo no site do curso)

Referências Bibliográficas

Versão Eletrônica do Curso

Indicado a seguir o site onde você encontrará em versão pdf todo o material deste curso. O material eletrônico é uma cópia atualizada da versão impressa.

Site de acesso: <http://engdutos.usuarios.rdc.puc-rio.br/>

Referências Bibliográficas

A seguir algumas referências que podem auxiliar neste curso. Aquelas indicadas com asterisco estão (ou já estiveram) disponíveis em português. É altamente recomendável o acompanhamento das aulas com pelo menos um livro texto em Mecânica dos Fluidos e uma, ou duas, referências sugeridas para Dutos. Os números entre colchetes indicam o nível de dificuldade do texto: [1]= básico; [2]= intermediário-avançado.

1- Mecânica dos Fluidos - Básico

- 1.1 *Introduction to Fluid Mechanics, R.W. Fox, A.T. McDonald, J.Wiley & Sons [1]
- 1.2 *Fluid Mechanics, V.L. Streeter, E.B. Wylie, McGraw-Hill Co. [1].
- 1.3 Fluid Mechanics, F.M. White, McGraw-Hill Co. [2].
- 1.4 *Mechanics of Fluids, I.H. Shames, McGraw-Hill Co. [2].
- 1.5 Fundamentals of Temperature, Pressure and Flow Measurements, R.B. Benedict, John Wiley & Sons [1].

2- Mecânica dos Fluidos - Regime Transiente

- 2.1 Fluid Transients in Systems, E.B. Wylie, V.L. Streeter, Prentice Hall [2].
- 2.2 Applied Hydraulic Transients, M.H. Chaudry, Van Nostrand Reinhold Co. [2].

3- Engenharia de Petróleo e Gás

- 3.1 Applied Reservoir Engineering, B.C. Craft, M.F. Hawkins, Prentice Hall, Inc. [1].
- 3.2 Multiphase Flow in Wells, J.P. Brill; H. Mukherjee, SPE Monograph, Vol 17, [2].
- 3.3 Natural Gas Engineering - Production and Storage, D.L.Katz, R.L. Lee, McGraw-Hill Co. [2].
- 3.3 The Properties of Petroleum Fluids, W.D. McCain Jr., PennWell Books [2].

4- Termodinâmica e Transferência de Calor

- 4.1 *Fundamentals of Thermodynamics, R.E. Sonntag, C.Borgnakke, G.J. Van Wylen, John Wiley & Sons [1].
- 4.2 *Engineering Thermodynamics, W.C. Reynolds, H.C. Perkins, McGraw-Hill [1].
- 4.3 *Termodinâmica para Engenheiros, Braga, Fo. W., LTC - Livros Técnicos e Científico Editora, Ltda., RJ, 2020.
- 4.4 *Fundamentals of Heat and Mass Transfer, F.P. Incropera, D.P. DeWitt. John Wiley & Sons [2].

5- Dutos

- 5.1 Pipeline Design & Construction, M.Mohitpour, H.Golshan, ASME Press, [1].
- 5.2 Pipeline Rules of Thumb Handbook, Ed. E.W. Allister, 5a. Ed., Gulf. P. Co. [1].
- 5.3 Pipeline Pumping and Compression Systems, M. Mohitpour, K. K. Botros, and T. Van Hardeveld, ASME Press, 2008 [1].
- 5.4 Gas Pipeline Hydraulics, E.S. Menon, The Taylor & Francis Group, 2005 [1].
- 5.5 Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipe, Crane Co., 1999 [1].

6- Métodos Numéricos & Computacionais

- 6.1 Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional, C.R. Maliska, ABDR, 1995 [2].
- 6.2 Computational Fluid and Heat Transfer, J.C. Tannehill, D.A. Anderson, R.H. Pletcher, The Taylor & Francis Group, 1997 [2].
- 6.3 Numerical Recipes - The Art of Scientific Computing, W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P., Flannery, Cambridge University Press, 2nd. Ed., 1992 [2].
- 6.4 Numerical Computation of Internal & External Flows - Fundamentals of Computational Fluid Mechanics, C. Hirsch, Elsevier, 2nd. Ed., 2007 [2].

7- Escoamento Multifásico

- 7.1- Multiphase Flow Handbook, Eds: E. Michaelides, C. T. Crowe, J. D. Schwarzkopf, CRC Press; 2nd Edition, 2017 [2].
- 7.2 Multiphase Flow in Wells, James P. Brill, Hemanta Mukherjee, Soc. Petroleum Engineers Inc., 1999 [1].
- 7.3 Fluid Flow and Heat Transfer in Wellbores, Hasan, A.R, Kabir, C.S., Soc. of Petroleum Engineers, 2002 [1].
- 7.4 Handbook of Multiphase Systems, Ed. Gad Hetsroni, Hemisphere Publishing Corp., 1982 [2].
- 7.5 The Flow of Complex Mixtures in Pipes, G. W. Govier, Khalid Aziz, Robert E. Grieger Publishing Co., 1982 [2].
- 7.6 Modeling and Experimentation in Two-Phase Flow, Volfango Bertola, Ed. Springer-Verlag, 2003 [2].

Alguns Sites Úteis

Nos *sites* indicados podem ser encontradas informações sobre engenharia em geral e tópicos específicos em energia como: entidades profissionais, instituições governamentais nacionais e estrangeiras, instituições de pesquisas, petróleo, energia, gás e outros. Em geral é necessário navegar um pouco para encontrar algum tema de interesse particular. Boa sorte!

No.	Portal	Descrição
1	www.abcm.org.br	Associação Brasileira de Ciências Mecânicas
2	www.spe.org	Society of Petroleum Engineers
3	www.asme.org	American Society of Mechanical Engineers
4	www.mme.gov.br	Ministério de Minas e Energia
5	www.anp.gov.br	Agência Nacional de Petróleo
6	www.petrobras.com.br	Petrobras
7	www.transpetro.com.br	Transpetro/Petrobras
8	www.tbg.com.br	TBG - Gasoduto Brasil-Bolívia
9	www.ctdut.com.br	CTDUT
10	www.wikidutos.org.br	Glossário web sobre dutos em geral
11	www.wikipipeline.org/	Glossário web sobre dutos em geral
12	www.onip.org.br	Organização Nacional da Indústria do Petróleo
13	www.ibp.org.br	Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás
14	www.ie.ufjf.br	Instituto de Economia - UFRJ
15	www.fe.doe.gov	US Dept. of Energy - DOE (front page)
16	www.energy.gov	US Dept. of Energy (energia)
17	www.eia.doe.gov	US Dept. of Energy (energy inf. administration)
18	www.epa.gov	US Environmental Protection Agency
19	www.fe.doe.gov/index.html	US- DOE - fossil energy web site
20	www.igt.org	Institute of Gas Technology
21	www.ifp.fr	Institut Français du Pétrole
22	www.aga.org	The American Gas Association
23	www.api.org	The American Petroleum Institute
24	www.api.org/links/	Am. Petroleum Institute - muitos links em energia
25	www.naturalgas.org	Informações sobre gás natural
26	www.erc.uic.edu	U. of Chicago - Energy Resource Center
27	www.oilonline.com	Informações sobre a indústria de óleo
28	www.iaee.org	International Association for Energy Economics
29	www.iea.org	International. Energy Agency
30	www.iso.org	ISO - Int.. Organization for Standardization
31	www.vesuite.org	Software - informações sobre Virtual Engineering
32	www.majorpipeline.com	Informações diárias sobre dutos em todo mundo
334	www.twi.co.uk	Welding Institute - UK

Programação de Aulas, Provas e Nota Final
MEC2373-Escoamento em Dutos - 2024.1
Aulas On-Line - via Zoom

Aula	Dia/Mês	Parágrafos
1	19/03	1.1 - 1.4.4
2	26/03	1.4.4 - 1.4.11
--	28-31/03	Feriado - Semana Santa / Páscoa
3	02/04	2.1 - 2.2.2
4	09/04	2.2.2 - 2.5 — 3.1 - 3.2
5	16/04	3.2 - 3.4.3
--	22-23/04	Feriado - São Jorge
6	30/04	4.1 - 4.8 — 5.4 - 5.7
7	07/05	6.1 - 6.3.3 - exec.
8	14/05	7.1 - 7.4 (Prova-1)
9	21/05	7.5 - exes
10	28/05	8.1 - 8.4
--	30-31/05	Feriado - Corpus Christi
11	04/06	8.5 - 8.6 - exec.
12	11/06	8.7 - 8.8
13	18/06	9.1 - 9.5 - exec.
14	25/06	11.1 - 11.4 (Prova-2)
15	02/07	11.5 - 11.8
16	09/07	Anexo - Apêndice -F

PROVAS

Fique atento para datas das provas. Não é possível conceder “segundas chamadas”

Nota Final:

- Calculada pela média aritmética de duas provas, mais nota de exercícios e conceito final.
- Conceito Final: Avaliação do desempenho e participação em aula, progresso nas provas e exercícios e presença nas aulas. Variável de aluno para aluno.
- Nota mínima por disciplina no curso de Engenharia de Dutos é 6 (seis).
- Frequência mínima no curso, por disciplina, é 75%.

Prefácio

Este livro constitui a principal referência para a disciplina *Escoamento em Dutos*, oferecida pela PUC-Rio no programa de Pós-Graduação de *Engenharia de Dutos*.

O curso tem como objetivo propiciar ao aluno a oportunidade de: i- compreender conceitos básicos de mecânica dos fluidos, termodinâmica e transferência de calor aplicados ao escoamento em dutos; ii- conhecer os princípios físicos fundamentais do escoamento viscoso compressível e incompressível em dutos; iii- familiarizar com a análise e modelagem de escoamentos em dutos e iv- capacitar para a operação e projeto de instalações industriais, com ênfase especial, embora não exclusiva, para o setor de petróleo e gás.

A matéria cobre tanto os aspectos teóricos quanto práticos de escoamento de fluido no interior de dutos. Ênfase é dada aos fundamentos dos processos, sempre visando a aplicação de problemas reais, numa breve introdução ao tema de *garantia de escoamento* (*flow assurance* em inglês), ou seja, garantia de que o fluido escoará tão próximo quanto possível das condições de projeto. O tópico vem se desenvolvendo rapidamente nos últimos anos tendo por base o conhecimento científico de várias disciplinas como mecânica dos fluidos, termodinâmica, matemática, física, engenharia mecânica, química, elétrica, computação e utilização de sofisticados simuladores numéricos. Enfim, do engenheiro projetista e de operação envolvido com escoamento de fluido é exigido cada vez mais conhecimentos básicos numa ampla área da física-matemática.

Iniciamos com uma revisão geral sobre propriedades físicas no Capítulo 1, incluindo alguns detalhes sobre não-idealidade de propriedades de fluidos em geral até o comportamento na região crítica (fluidos densos), seguido de uma apresentação no Capítulo 2 de estática e dinâmica dos fluidos, assim como das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e de energia, tanto na formulação integral quanto diferencial. No Capítulo 3 são analisadas as bases teóricas do escoamento viscoso para regime laminar e turbulento, incluindo algumas expressões clássicas para o coeficiente de atrito viscoso e noções sobre definições e conceitos associados aos escoamentos hidraulicamente liso e rugoso e uma introdução à redução de arraste por adição de polímeros. É igualmente feita uma breve apresentação da modelagem numérica para as equações de conservação. No Capítulo 4 são revistos os principais conceitos de perdas localizadas em elementos construtivos utilizados em dutos como, expansões, contrações,

curvas e difusores, assim como de escoamento por válvulas. O Capítulo 5 é dedicado aos conceitos fundamentais das características de bombas centrífugas e seu comportamento operacional. São consideradas algumas análises para a variação da rotação de bombas e a resposta do sistema. Diversas aplicações são consideradas para o escoamento incompressível viscoso no Capítulo 6, incluindo soluções para o problema hidráulico de dutos em série, em paralelo ou múltiplos, fluxo por orifícios, bocais e venturis, problemas associados à drenagem de líquidos em tanques e dutos, uma análise temporal de vazamento de líquido por trincas envolvendo ruptura de dutos e uma breve apresentação sobre assentamento, estabilidade e esforços atuantes sobre pilares de apoio e blocos de ancoragem.

Na segunda parte é apresentada uma detalhada revisão de escoamento compressível e transferência de calor e suas aplicações em dutos. No Capítulo 7 são introduzidos os fundamentos termodinâmicos de escoamento de gases em geral, incluindo bocais convergentes e divergentes. Aplicações desses conceitos são feitas no Capítulo 8, incluindo escoamento de gases sob condições adiabáticas e isotérmicas. Uma série de expressões utilizadas em projetos de gasodutos são consideradas, assim como aplicações práticas, incluindo o cálculo de estocagem em dutos. Uma descrição e análise temporal é feita para a operação de descarga de gás para a atmosfera (*blowdown*) e introduzidos conceitos sobre as dificuldades da presença de água e formação de hidratos em gás natural, incluindo o processo de desidratação. A análise de sensibilidade envolvendo pressão, vazão e diâmetro é apresentada brevemente neste capítulo, assim como um estudo sobre mistura de gases quando esta ocorre como consequência da convergência de dutos transportando gases com composição química distintas. O Capítulo 9 inclui uma breve revisão dos conceitos básicos de transmissão de calor. Correlações para cálculo dos coeficientes de transmissão de calor são apresentadas para diversas configurações geométricas, inclusive para dutos enterrados. Bases sobre os fundamentos do efeito Joule-Thomson são introduzidas com implicações do fenômeno em problemas reais. Diversas técnicas atuais de isolamento térmico de oleodutos e gasodutos são apresentadas e suas implicações na *garantia de escoamento* consideradas. Uma breve introdução ao escoamento multifásico em dutos é feita no Capítulo 10, com definição de conceitos básicos, padrões de escoamento, métodos de solução empíricos e matemáticos, incluindo os modelos homogêneo, separado, de dois fluidos e de deslizamento (*drift flux*). O último Capítulo 11 é dedicado à análise detalhada de oito problemas práticos relativamente complexos envolvendo o escoamento de fluidos reais; especificamente: i- análise de

escoamento num *flare*; ii- cálculo de esforço estrutural devido ao escoamento numa operação de *blowdown* em gasoduto; iii- análise de ruptura com término duplo de uma linha de gás; iv- estudo termo-hidráulico de um gasoduto; v- análise do efeito Joule-Thomson na distribuição de temperatura num gasoduto de grande extensão; vi- uma extensa análise de ruptura e vazamento de gás em um gasoduto; vii- análise de projeto de um longo gasoduto entre as cidades de São Carlos e Brasília e viii- uma breve análise das condições do escoamento entre duas estações de compressão no gasoduto Bolívia-Brasil, GASBOL.

Os Apêndices contêm detalhamento de alguns aspectos teóricos sobre cálculo vetorial, gases reais e cálculo de fator de compressibilidade Z , efeito Joule-Thomson, conceitos sobre escoamento transiente em líquidos – golpe de ariete – associado à operação de equipamentos como válvulas e bombas centrífugas, assim como uma breve introdução aos transientes em gasodutos e algumas Tabelas.

Ao longo do curso são considerados alguns problemas envolvendo aspectos financeiros típicos encontrados na fase de projeto de instalações industriais. O livro inclui também uma considerável lista de problemas voltados para aplicações práticas, todos com as respectivas soluções. Como parte do treinamento, sugere-se que o aluno procure resolver todos os exercícios antes de analisar as soluções.

Para melhor desempenho e aproveitamento da matéria é recomendável, embora não necessário, que o aluno tenha cursado pelo menos uma disciplina de graduação em mecânica dos fluidos e termodinâmica.

Na maior parte do texto o Sistema Internacional de Unidades SI é empregado, utilizando as unidades básicas de massa (kg), comprimento (m), tempo (s) e temperatura absoluta (K), embora, para esta, seja também utilizado o usual grau Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

Uma coletânea de artigos encontra-se igualmente disponível em versão pdf no *site* do curso, relacionados no Apêndice-H, ou <http://engdutos.usuarios.rdc.puc-rio.br/>

O livro é resultado de muitos anos de vida acadêmica e atividade profissional na área de petróleo e gás. Tem sido um privilégio poder compartilhar essa experiência com colegas na Universidade, assim como tantos alunos talentosos e dedicados. Muitos dos tópicos resultaram de sugestões e discussões com alunos em sala de aula e profissionais do setor trabalhando na indústria, a todos sou muito grato.

S. Stuckenbruck

Março de 2024

Nomenclatura

A	Área	m ²
A _v	Área de válvula (orifício)	m ²
a	Aceleração	m/s ²
B	Fator volume de formação	-
bar	Pressão relativa	10 ⁵ Pa
bara	Pressão absoluta	10 ⁵ Pa
c _p , c _v	Calor específico à pressão e volume constante	J/kg-K
c	Velocidade acústica (som)	m/s
C	Constante genérica	-
C _a	Número de cavitação	-
C _c	Coefficiente de contração - <i>vena contracta</i>	-
C _d	Coefficiente de descarga de orifício, bocal, Venturi	-
C _v	Coefficiente de descarga de válvula	-
D, d	Diâmetro	m
D _h	Diâmetro hidráulico	m
e	Espessura de parede de duto	m
e	Energia específica total	J/kg
E	Módulo de elasticidade	N/m ²
f	Fator de atrito de Darcy	-
F	Força	N
F	Coefficiente adimensional - bomba centrífuga	-
g	Aceleração local da gravidade	m/s ²
G	Vazão de massa por unidade de área	kg/s-m ²
G	Peso de duto, fluido ou de corpo qualquer	N
G	Constante	-
h	Distância entre placas	m
h	Entalpia específica	J/kg
h _c	Coefficiente de filme de troca de calor	W/m ² -K
H, h	Altura de energia	m
i,j,k	Vetor unitário nas direções x,y,z	-
k	Condutividade térmica	W/m-K
K	Constante	-
K	Coefficiente de compressibilidade isotérmica	N/m ²
K _i	Coefficiente de resistência-i (i= genérico)	-
K _d	Coefficiente local de perda de carga	-
L, l	Comprimento	m
ln _e	Logaritmo natural	-
m, M	Massa	kg
<i>m</i>	Vazão de massa	kg/s

M_g, M_w	Massa molecular de gás	kg/kmol
Ma	Número de Mach	-
n	Vetor unitário normal à superfície	-
N	Potência	Watts
N	Rotação	s^{-1}
N_s	Velocidade específica - bomba centrífuga	-
Nu	Número de Nusselt	-
p	Pressão	N/m^2
Pa	Pressão - Pascal	N/m^2
Pr	Número de Prandtl	-
q	Quantidade de calor por unidade de massa	J/kg
q	Quantidade de calor por unidade de área	J/m^2
Q	Vazão volumétrica	m^3/s
Q,q	Quantidade de calor transferido para o sistema (fluido)	J
r	Distância radial	m
r	Razão de pressões	-
R	Raio do duto	m
R_g	Constante de gás	m^2/s^2-K
R_{so}	Razão gás-óleo	-
Re	Número de Reynolds	-
Re_c	Número de Reynolds crítico (= 2300)	-
Re_ε	Número de Reynolds de transição, Eq. 2.55	-
R	Força	N
s	Entropia específica	J/kg-K
S	Fator de forma de condução de calor	-
S	Força	N
t	Tempo	s
T	Temperatura absoluta	K
T^*	Temperatura (Eq. 9.50)	K ou C
T	Força	N
\hat{u}	Energia interna específica	J/kg
u,v,w	Componentes da velocidade nas direções x,y,z	m/s
u^*	Velocidade de atrito	m/s
V	Velocidade	m/s
V	Volume	m^3
x,y,z	Direção (ou distância) das coordenadas cartesianas	-
Y	Fator de expansão para orifício (gases)	-
Z	Fator de compressibilidade de gás	-
w	Trabalho por unidade de massa realizado pelo sistema	J/kg
W	Trabalho realizado pelo sistema (fluido)	J

Índices inferior/superior

abs	Absoluto	-
atm	Condição atmosférica	-
c	Condição de fluxo de calor por convecção	-
c	Convecção	-
ext	Externo	-
eq	Equivalente	-
f	Atrito	-
fin	Final	-
ini	Inicial	-
g	Gás	-
k	Condição de fluxo de calor por condução	-
k	Condução	-
m	Mistura, valor numérico ou valor médio	-
min	Mínimo	-
max	Máximo	-
n	Direção normal à superfície, ou valor numérico	-
n	Índice de comportamento reológico	-
o	Óleo	-
o	Condição de estagnação	-
os	Óleo - condição padrão	-
og	Gás - condição padrão	-
p	Duto	-
p	Polímero, ou global	-
r	Condição de fluxo de calor por radiação	-
rel	Condição relativa	-
res	Condições de reservatório	-
std	Condição padrão (pressão e temperatura)	-
s	Máquina (bomba, compressor, turbina)	-
s	Ao longo da linha-s	-
s	Condição de entropia constante	-
s	Solo	-
s	Direção-s	-
T	Temperatura constante	-
T, t	Total	-
x,y,z	Direções x, y, z	-
w	Água	-
w	Condição na parede do duto	-
1,2,...	Ponto 1, 2,	-
θ	Direção circunferencial na parede do duto	-
*	Condição crítica - gases	-
+	Variável adimensional	-

Grego

β	Razão de diâmetros, ou de áreas	-
ε	Rugosidade absoluta	m
ε_t	Abertura de fissura (trinca)	m
ε	Constante exponencial	s ⁻¹
ε	Deformação	-
ε	Emissividade por radiação térmica	-
ε	Fator geométrico (Eq. 9.50)	m ⁻¹
Γ	Poder calorífico de gás	J/m ³
γ	Peso específico (= ρg)	N/m ³
γ	Expoente isentrópico (= c_p/c_v)	-
$\dot{\gamma}$	Taxa de cisalhamento	s ⁻¹
δ	Incremento de variável	-
λ	Densidade relativa	-
λ_t	Comprimento de fissura (trinca)	m
Λ	Constante	-
μ	Viscosidade absoluta	Pa-s
μ	Coefficiente de Joule-Thomson	K/Pa
μ	Coefficiente de atrito de Coulomb	-
η	Eficiência	-
θ	Ângulo com a horizontal	Rad
ν	Viscosidade cinemática	m ² /s
ν	Razão de Poisson	-
ρ	Massa específica	kg/m ³
σ	Tensão normal	N/m ²
σ	Constante de Stefan-Boltzman (= $5,6 \times 10^{-8}$)	W/m ² -K
Σ	Somatório	-
τ	Tensão cisalhante	N/m ²
φ	Pressão total	N/m ²
ψ	Constante	-
ω	Constante	-

Abreviações

NPS	Nominal Pipe Size
DN	Nominal Diameter
ID	Inside Diameter
OD	Outside Diameter
SCH	Schedule (Wall Thickness)
XS	Extra Strong Wall Thickness
XSS	Double Extra Strong Wall Thickness

“Carpe diem”