

CAPÍTULOS E AUTORES

1- O CICLO DE VIDA DE UM EMPREENDIMENTO DE DUTOS

Marcelo Rennó, Nelson Lemgruber

2- ESCOAMENTO DE LÍQUIDOS E GASES EM DUTOS

Sidney Stuckenbruck

3- ANÁLISE DE TENSÕES EM DUTOS

José Luiz de F. Freire

4- AÇOS PARA DUTOS

Ivani de S. Bott, Fulvio Siciliano, Paulo Fernando Scofield de Lemos, Paulo Rangel Rios

5- PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE TUBOS

Ronaldo Domingues Vieira

6- CÓDIGOS E REGULAMENTOS

Paulo Fernando Scofield de Lemos

7- ESTUDO DE TRAÇADO

Elinaldo de Albuquerque Vasconcelos

8- ESTAÇÕES DE BOMBEAMENTO E DE COMPRESSÃO

Reinaldo de Falco

9- PROJETO MECÂNICO DE DUTOS TERRESTRES

Carlos Henrique do Canto e Mello Louzada

10- CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DE DUTOS TERRESTRES

Carlos Alberto Cardoso Manzano

11- OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DUTOS

Pedro Roncada Borges

12- AUTOMAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO

Paulo de Tarso Arruda Correia

13- CORROSÃO E PROTEÇÃO CATÓDICA

Walmar Baptista e Wilson G.C.Castinheiras

14- INSPEÇÃO DE DUTOS

Cláudio Camerini, Helio Alves de Souza Jr.

15- INTEGRIDADE DE DUTOS

José Luiz de F. Freire, Adilson C. Benjamin, Dauro B. Noronha, Luiz Meniconi, Ricardo D.Souza

16- DUTOS SUBMARINOS RÍGIDOS

Fabio Braga de Azevedo

17- PROJETO DE DUTOS FLEXÍVEIS PARA APLICAÇÃO SUBMARINA

Anderson Dolinski

18- SEGURANÇA OPERACIONAL E AGENTES REGULADORES

Carlos Valois Maciel Braga, Tito Luiz da Silveira

ÍNDICE

<i>CAPÍTULOS E AUTORES</i>	v
<i>LISTA DE TABELAS</i>	xix
<i>LISTA DE FIGURAS</i>	xxi
<i>APRESENTAÇÃO(1)</i>	xxxí
<i>APRESENTAÇÃO(2)</i>	xxxiii
<i>PREFÁCIO</i>	xxxv
1 - O CICLO DE VIDA DE UM EMPREENDIMENTO DE DUTOS	1.1
1.1 INTRODUÇÃO	1.1
1.2 HISTÓRICO	1.2
1.2.1 Os primeiros dutos	1.2
1.2.2 Histórico de dutos na Europa e Ásia	1.3
1.2.3 Dutos de Gás Natural	1.3
1.2.4 Evolução da tecnologia	1.3
1.2.5 Expansão do modal dutoviário	1.4
1.2.6 Dutos no Brasil	1.4
1.3 ETAPAS DO CICLO DE VIDA DE UM EMPREENDIMENTO DE DUTO	1.6
1.4 ETAPA DE ANÁLISE DAS OPORTUNIDADES - FEL 1	1.7
1.4.1 Fase FEL 1 aplicada a um empreendimento de duto	1.8
1.4.2 O Licenciamento Ambiental	1.9
1.4.3 Definição do traçado do duto	1.9
1.4.4 Definição do prazo de construção	1.10
1.4.5 Orçamento de um empreendimento de dutos	1.10
1.4.5.1 Tubulações	1.10
1.4.5.2 Construção e montagem do duto	1.11
1.4.5.3 Produto para enchimento da linha tronco	1.12
1.4.5.4 Custos de operação e manutenção	1.12
1.4.5.5 Custos com contrapartidas ambientais	1.12
1.4.5.6 Custos para atendimento a condicionantes da licença de operação	1.12
1.4.6 Análise de alternativas	1.13
1.5 FASE DE ENGENHARIA CONCEITUAL (FEL 2)	1.13
1.5.1 O Projeto Conceitual	1.13
1.5.2 Avaliação de Risco na Fase Conceitual	1.14
1.5.3 Plano do Projeto Preliminar	1.14
1.5.4 Fase FEL 2 aplicada a um empreendimento de duto	1.14
1.6 FASE DE ENGENHARIA BÁSICA – FEL 3	1.14
1.6.1 O Projeto Básico	1.15
1.6.2 Avaliação de Risco na Fase de Engenharia Básica	1.15
1.6.3 Plano de Projeto Final	1.16
1.7 ETAPA DE IMPLANTAÇÃO DO EMPREENDIMENTO	1.16
1.7.1 O Projeto Executivo	1.16
1.7.2 Atividades típicas da etapa de implantação de um empreendimento de dutos	1.16
1.7.2.1 Fase de Construção e Montagem	1.16
1.7.2.2 Condicionamento e Comissionamento	1.16
1.8 ETAPAS DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO (O&M)	1.17
1.8.1 Fases anteriores à entrada em regime permanente de operação	1.17
1.8.2 Fase de operação em regime permanente	1.18
1.9 ETAPA DE DESATIVAÇÃO	1.19
1.9.1 Plano de desativação	1.19
1.9.2 Aprovação do órgão ambiental	1.19
1.9.3 Condições de manutenção de duto sem previsão de retornar à operação	1.19
1.9.4 Condição básica para retorno à operação	1.20
1.10 BIBLIOGRAFIA	1.20

2 - ESCOAMENTO DE LÍQUIDOS E GASES EM DUTOS	2.1
2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS	2.1
2.1.1 Dimensões e Unidades	2.1
2.1.2 Fluido	2.1
2.1.2.1 Viscosidade	2.2
2.1.3 Velocidade e Aceleração	2.2
2.1.4 Vazão Volumétrica e de Massa	2.3
2.1.5 Energia do Sistema	2.4
2.1.6 Relações de Estado	2.4
2.1.6.1 Gases	2.4
2.1.6.2 Líquidos	2.5
2.1.6.3 Densidade Relativa	2.5
2.2 FUNDAMENTOS DE MECÂNICA DOS FLUIDOS	2.5
2.2.1 Distribuição de Pressão Hidrostática	2.5
2.2.2 Sistemas e Volumes de Controle	2.6
2.2.3 Relações Integrais para Volumes de Controle	2.7
2.2.3.1 Conservação de Massa	2.7
2.2.3.2 Conservação de Quantidade de Movimento Linear	2.7
2.2.3.3 Conservação de Energia	2.7
2.2.4 A Equação de Bernoulli	2.8
2.2.4.1 Linha Piezométrica e Linha de Energia	2.9
2.3 ESCOAMENTO VISCOZO EM DUTOS	2.11
2.3.1 Escoamento Laminar (Hagen-Poiseuille)	2.12
2.3.2 Escoamento Turbulento	2.13
2.3.2.1 Fator de Atrito em Dutos Lisos e Rugosos	2.13
2.3.2.2 Redução de Arraste pela Adição de Polímeros	2.14
2.3.2.3 Rugosidade Absoluta - Oleodutos e Gasodutos	2.15
2.3.3 Perdas Localizadas	2.16
2.3.4 Expansão Súbita e Contração Súbita	2.16
2.3.5 Curvas	2.17
2.3.6 Entradas e Saídas	2.17
2.4 ESCOAMENTO DE LÍQUIDOS	2.14
2.4.1 Cálculo da Queda de Pressão	2.19
2.4.2 Cálculo da Vazão	2.19
2.4.3 Cálculo do Diâmetro	2.19
2.4.4 Sistema com Dutos Múltiplos	2.19
2.4.4.1 Queda de Pressão para Dutos em Série	2.19
2.4.4.2 Queda de Pressão para Dutos em Paralelo	2.20
2.4.5 Escoamento Através de Orifícios	2.20
2.4.5.1 Placa de Orifício	2.21
2.4.5.2 Bocal	2.21
2.4.5.3 Venturi	2.21
2.5 ESCOAMENTO DE GASES	2.23
2.5.1 Escoamento Isentrópico em Venturis, Bocais e Orifícios	2.24
2.5.1.1 Venturis e Bocais	2.24
2.5.1.2 Placas de Orifício	2.25
2.5.1.3 Condição Crítica no Bocal (<i>Choking</i>)	2.25
2.5.2 Escoamento Isotérmico em Duto	2.26
2.5.2.1 Equações Práticas para Escoamento em Gasoduto	2.27
2.5.2.2 Segmentação de Duto - Aumento de Vazão	2.29
2.5.2.3 Energia Transportada pelo Gás	2.30
2.5.2.4 Presença de Água e Formação de Hidratos em Gás Natural	2.31
2.6 O PROBLEMA TÉRMICO	2.33
2.6.1 Leis de Transferência de Calor - Condução e Convecção	2.33
2.6.1.1 Condução	2.33
2.6.1.2 Convecção	2.33
2.6.1.3 Condução de Calor num Cilindro Composto	2.33
2.6.1.4 Coeficiente de Troca de Calor	2.34
2.6.2 Transferência de Calor em Dutos	2.34

2.6.2.1 Distribuição de Temperatura e Efeito Joule-Thomson	2.35
2.6.2.2 Duto Enterrado	2.36
2.7 REFERÊNCIAS	2.38
3 - ANÁLISE DE TENSÕES EM DUTOS	3.1
3.1 O ESTADO DE TENSÃO	3.1
3.1.1 Tensões atuantes numa barra prismática	3.3
3.1.2 Tensões atuantes numa casca cilíndrica fina submetida à pressão interna	3.4
3.1.3 Tensões atuantes numa casca cilíndrica espessa submetida à pressão interna e externa	3.6
3.2 TENSÕES E PLANOS PRINCIPAIS	3.7
3.3 ESTADO PLANO DE TENSÕES	3.9
3.4 ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES	3.12
3.5 RELAÇÕES ENTRE DEFORMAÇÕES E CAMPOS DE DESLOCAMENTOS	3.13
3.6 RELAÇÕES ENTRE TENSÕES E DEFORMAÇÕES	3.14
3.7 DEFORMAÇÕES NAS SUPERFÍCIES LIVRES DE COMPONENTES	3.17
3.8 CRITÉRIOS DE RESISTÊNCIA PARA A INTEGRIDADE ESTRUTURAL	3.18
3.8.1 Falhas estruturais sob condições estáticas	3.19
3.8.2 Critérios de resistência contra o escoamento	3.19
3.8.3 Exemplo: Aplicação dos critérios de Tresca e von Mises a um duto	3.20
3.9 INTRODUÇÃO À MECÂNICA DA FRATURA LINEAR ELÁSTICA	3.21
3.9.1 Estado de Tensão na Vizinhança da Trinca, MFLE	3.22
3.9.2 Fator de Intensificação de Tensão	3.22
3.9.3 Tenacidade à Fratura dos Materiais	3.24
3.9.4 Equação básica de projeto ou de adequação ao uso	3.24
3.9.5 Exemplo: Trinca passante em chapa tracionada e em duto sob pressão interna	3.24
3.9.6 Vazar antes de romper (“leak before break”)	3.25
3.9.7 Uso da mecânica da fratura elasto-plástica	3.26
3.10 AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL	3.26
3.10.1 Fator de segurança	3.26
3.10.2 Probabilidade de falha	3.27
3.10.3 Probabilidade de falha de um duto com perda de espessura	3.28
3.10.4 Fator de resistência remanescente	3.29
3.10.5 Diagrama de avaliação de falha (FAD), ou “Failure Assessment Diagram”	3.30
3.11 REFERÊNCIAS	3.30
4 - AÇOS PARA DUTOS	4.1
4.1 INTRODUÇÃO	4.1
4.2 HISTÓRICO	4.2
4.2.1 Desenvolvimento dos Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL)	4.3
4.2.2 A Norma API 5L [7]	4.4
4.3 ASPECTOS METALÚRGICOS FUNDAMENTAIS PARA COMPREENSÃO DA ESTRATÉGIA DO PROCESSAMENTO DOS AÇOS ARBL	4.5
4.3.1 Temperatura de transformação da austenita	4.6
4.3.2 Obtenção da austenita severamente deformada ao final da laminação	4.7
4.4 ASPECTOS METALÚRGICOS DO PROCESSAMENTO DOS AÇOS ARBL PARA APLICAÇÃO EM DUTOS	4.9
4.5 LAMINAÇÃO CONTROLADA	4.9
4.5.1 Processamento dos aços ARBL	4.11
4.5.1.1 Laminador de chapas grossas	4.11
4.5.1.2 Laminador de tiras a quente	4.12
4.5.1.3 Laminador Steckel	4.13
4.5.1.4 Laminador de placas finas e laminação direta	4.13
4.5.1.5 Processo de fabricação de tubos sem costura	4.14
4.6 SOLDABILIDADE	4.14
4.7 SUMÁRIO	4.17
4.8 REFERÊNCIAS	4.18
5 – PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE TUBOS	5.1
5.1 INTRODUÇÃO	5.1

5.2 FABRICAÇÃO DE AÇOS PARA TUBOS	5.2
5.3 PRODUÇÃO DE CHAPAS	5.3
5.3.1 Lingotamento Contínuo de Placas	5.3
5.3.2 Laminação de Chapas	5.4
5.4 SEGMENTOS DE TUBOS PARA DUTOS – LINEPIPE	5.6
5.5 TUBOS COM COSTURA	5.9
5.5.1 Tubos UOE-SAW	5.9
5.5.2 Tubos Dobrados Continuamente e Soldados por Resistência Elétrica – ERW	5.14
5.5.3 Tubos com Costura Helicoidal Contínua	5.16
5.5.4 Tubos Prensados e Tubos Calandrados	5.17
5.6 TUBOS SEM COSTURA	5.18
5.6.1 Lingotamento Contínuo de Barras Circulares	5.19
5.6.2 Laminação de Perfuração	5.20
5.6.3 Laminação com Plugue	5.21
5.6.4 Laminação com Mandril	5.23
5.6.5 Laminação Peregrina	5.25
5.7 REVESTIMENTOS ANTICORROSIVOS	5.26
5.7.1 Preparação das Superfícies	5.26
5.7.2 Revestimento Interno	5.26
5.7.3 Revestimento Externo Por Epóxi em Pó	5.27
5.7.4 Revestimento Externo Por Material Termoplástico	5.27
5.7.5 Revestimentos Externos à Base de Betume e Alcatrão	5.28
5.8 REFERÊNCIAS	5.30
6 - CÓDIGOS E REGULAMENTOS	6.1
6.1 OS CÓDIGOS NA COMUNIDADE INTERNACIONAL	6.1
6.2 COMPARAÇÃO DE REQUISITOS DOS CÓDIGOS	6.3
6.2.1 Classes de Locação	6.3
6.2.2 Espaçamento entre Válvulas	6.4
6.2.3 Curvamento de Campo	6.4
6.2.4 Cobertura	6.4
6.2.5 Afastamento	6.6
6.2.6 Proteção contra Terceiros	6.7
6.2.7 Sinalização da Faixa	6.7
6.2.8 Ensaio Hidrostático de Campo	6.8
6.2.9 Defeitos Construtivos	6.9
6.2.10 Normas Referenciadas	6.10
6.3 LEGISLAÇÃO	6.11
7 - ESTUDO DE TRAÇADO	7.1
7.1 CARTOGRAFIA	7.1
7.1.1 Cartografia com imagem aplicada a dutos	7.1
7.1.2 Tipos de produtos cartográficos	7.1
7.1.3 Cartografia por aerolevanteamento	7.2
7.1.4 Cartografia por imageamento de satélites	7.2
7.1.5 Sistema de coordenada	7.2
7.1.6 Projeção cilíndrica transversa de Mercator (Secante)	7.2
7.1.7 Características básicas do sistema UTM (Secante)	7.2
7.1.8 Conceitos do sistema UTM (Secante)	7.2
7.1.9 Requisitos para a cartografia usada em faixas de dutos	7.3
7.1.10 Comparação entre a cartografia por aerolevanteamento e por imageamento de satélites	7.3
7.2 POSICIONAMENTO E GEOREFERENCIAMENTO – SISTEMA GPS	7.3
7.2.1 Aplicabilidade do GPS em faixas de dutos	7.4
7.2.2 Características do sistema GPS	7.4
7.2.3 Princípios de funcionamento do GPS	7.4
7.2.4 Variantes do sistema GPS – GPS simples, DGPS, GPS-RTK	7.4
7.2.5 Causas de imprecisão no sistema GPS	7.5
7.3 FASES DO ESTUDO DE TRAÇADO DE DUTOS TERRESTRES	7.5
7.3.1 Traçado Preliminar	7.5

7.3.2 Traçado Básico	7.5
7.3.3 Traçado Detalhado para projeto executivo	7.6
7.4 PRINCÍPIOS PARA DEFINIÇÃO DE FAIXAS DE DUTOS	7.7
7.4.1 Evitar sempre que possível a necessidade de supressão de matas nativas	7.7
7.4.2 Entre mata nativa e reflorestamento, preferir sempre reflorestamento	7.7
7.4.3 Entre reflorestamentos e silvicultura, preferir sempre silvicultura	7.7
7.4.4 Entre silvicultura e áreas de pastagem ou agricultura, preferir estas	7.7
7.4.5 Minimizar a movimentação de terra na fase de construção	7.7
7.4.6 Diretriz ou poligonal secundária com o menor comprimento possível	7.8
7.4.7 Minimizar a quantidade de interferências	7.8
7.4.8 Proximidade de estradas vicinais	7.8
7.4.9 Situar preferencialmente a lateral da faixa junto às divisas de propriedades	7.9
7.4.10 Evitar áreas de domínio público	7.9
7.4.11 Evitar local a faixa em locais de brejos, afloramentos, terrenos de baixa suportação, encostas e terrenos susceptíveis a deslizamentos	7.9
7.4.12 Cruzamentos em locais planos, sem afloramento, longe de habitações, ortogonais com o eixo da interferência	7.10
7.4.13 Travessias com cavalotes mais curtos e ortogonais aos leitos dos rios, em áreas sem erosão ou exploração mineral	7.10
7.4.14 Evitar locais com aglomerações de edificações	7.10
7.4.15 Considerar o comprimento desenvolvido	7.10
7.4.16 Reservas minerais, ambientais, indígenas e locais de captação de águas	7.10
7.4.17 Paralelismos com linhas de transmissão	7.10
7.5 BIBLIOGRAFIA	7.10
8 - ESTAÇÕES DE BOMBEAMENTO E DE COMPRESSÃO	8.1
8.1 FLUXO DE LÍQUIDO ATRAVÉS DA ESTAÇÃO DE BOMBEAMENTO	8.1
8.1.1 Considerações básicas sobre as estações de bombeamento	8.1
8.1.2 Válvulas de entrada e auxiliares	8.2
8.1.3 Casa de amostragem	8.2
8.1.4 Medição da temperatura do líquido	8.3
8.1.5 Medição da massa específica	8.3
8.1.6 Medição da viscosidade do líquido	8.3
8.1.7 Queimador	8.3
8.1.8 Percurso pelas bombas	8.3
8.1.9 Descarga do líquido	8.4
8.1.10 Válvula de controle da pressão	8.4
8.1.11 Desvio da PCV	8.4
8.1.12 Válvula de retenção de descarga	8.4
8.1.13 Saída	8.4
8.2 BOMBAS	8.5
8.2.1 Válvula de sucção	8.5
8.2.2 Bombas da linha tronco	8.5
8.2.3 Motores elétricos	8.6
8.2.4 Motores dotados de variadores de velocidade	8.6
8.2.5 Válvula de descarga	8.7
8.3 CONFIGURAÇÕES DAS BOMBAS EM SÉRIE E EM PARALELO	8.7
8.3.1 Configurações em série	8.7
8.3.2 Configuração das bombas em paralelo	8.8
8.4 SISTEMAS AUXILIARES E DE SEGURANÇA	8.10
8.4.1 Drenos	8.11
8.4.2 Tanque de Água Oleosa	8.11
8.4.3 Subestação elétrica	8.11
8.4.4 Transformadores	8.11
8.4.5 Disjuntores	8.11
8.4.6 Válvula de alívio térmico	8.11
8.4.7 Medição de temperatura	8.11
8.4.8 Medição de Densidade	8.11
8.4.9 Detectores de Gás	8.11
8.4.10 Detectores de Incêndio	8.11

8.5 SISTEMAS DE CONTROLE EM ESTAÇÕES DE BOMBEAMENTO	8.11
8.6 ESTAÇÕES DE COMPRESSÃO	8.12
8.6.1 Introdução	8.12
9 - PROJETO MECÂNICO DE DUTOS TERRESTRES	9.1
9.1 INTRODUÇÃO	9.1
9.1.1 Algumas características do transporte de longa distância	9.1
9.1.2 Breve histórico do transporte de líquidos	9.1
9.1.3 O dimensionamento mecânico do duto e o projeto mecânico global	9.2
9.2 CONDIÇÕES E CRITÉRIOS DE PROJETO	9.2
9.2.1 Geral	9.3
9.2.2 Pressão	9.3
9.2.3 Temperatura	9.4
9.2.4 Peso próprio	9.4
9.2.5 Outros carregamentos	9.5
9.2.6 Combinação de cargas	9.5
9.2.7 Outras considerações	9.5
9.3 TUBOS E COMPONENTES DE TUBULAÇÃO	9.5
9.3.1 Tubos	9.5
9.3.2 Curvas de campo	9.6
9.3.3 Curvas em gomos	9.7
9.3.4 Curvas forjadas	9.7
9.3.5 Curvas por indução	9.7
9.3.6 Derivações boca-de-lobo	9.7
9.3.7 Flanges	9.8
9.3.8 Outros componentes	9.8
9.4 VÃO ENTRE SUPORTES	9.9
9.4.1 Geral	9.9
9.4.2 Cômputo das cargas	9.9
9.4.3 Critérios para projeto	9.10
9.4.4 Segurança no vão de projeto com o duto em operação	9.11
9.4.5 Projeto dos vãos e distribuição das linhas em uma tubovia	9.12
9.4.6 Vão para trechos com curvas	9.12
9.4.7 Vão para dutos de grande diâmetro	9.13
9.4.8 Padronização do vão máximo	9.13
9.5 SUPORTES	9.13
9.5.1 Geral	9.13
9.5.2 Tipos de Suportes	9.14
9.5.3 Cargas nos Suportes	9.14
9.5.4 Elementos metálicos de ligação entre o suporte e o duto	9.15
9.5.5 Materiais e tensões admissíveis	9.15
9.6 ESTABILIDADE À FLUTUAÇÃO	9.15
9.6.1 Geral	9.15
9.6.2 Meios de lastreamento e considerações de estabilidade nas argilas expansivas	9.16
9.6.3 Relações de peso e empuxo	9.16
9.7 DIMENSIONAMENTO PARA A PRESSÃO INTERNA E SELEÇÃO DA ESPESSURA	9.17
9.7.1 Breve histórico sobre o desenvolvimento das fórmulas para o cálculo da espessura	9.17
9.7.2 Importância econômica da seleção da espessura	9.18
9.7.3 Fórmulas para cálculo da espessura	9.18
9.7.4 Alguns comentários sobre as fórmulas de espessura	9.20
9.7.4.1 Geral	9.20
9.7.4.2 Comentários relativos ao caso (a)	9.21
9.7.4.3 Comentários relativos ao caso (b)	9.22
9.7.5 A influência da relação espessura-diâmetro na acurácia de algumas das equações	9.23
9.7.6 Seleção da espessura	9.24
9.7.6.1 Espessura em trechos retos	9.24
9.7.6.2 Espessura em curvas	9.25
9.7.6.3 Verificação da espessura de parede em trechos de cruzamentos e travessias	9.26
9.7.6.4 Valores mínimos de espessura para projeto	9.27

9.8 ANÁLISE DE FLEXIBILIDADE DE TUBULAÇÕES	9.28
9.8.1 Geral	9.28
9.8.2 Considerações	9.28
9.8.3 Métodos de análise	9.30
9.8.4 Critérios gerais para realização da análise de flexibilidade	9.30
9.8.5 Meios de prover flexibilidade	9.31
9.8.6 Resultados da análise	9.32
9.8.7 Abrangência da análise	9.32
9.8.8 Distinção entre os comportamentos das tubulações, aéreas e enterradas, com relação às tensões	9.32
9.8.9 Combinações de carregamentos	9.32
9.8.10 Cálculo das tensões para tubulações restringidas	9.33
9.8.11 Tensões admissíveis para sistemas restringidos	9.34
9.8.12 Cálculo das tensões para tubulações não-restringidas	9.34
9.8.13 Tensões admissíveis para sistemas não-restringidos	9.35
9.9 ENSAIO HIDROSTÁTICO	9.35
9.9.1 Geral	9.35
9.9.2 Pressões máxima e mínima de ensaio	9.36
9.9.3 Pressão máxima de operação admissível (PMOA)	9.36
9.10 BIBLIOGRAFIA	9.37
10 - CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DE DUTOS TERRESTRES	10.1
10.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DE DUTOS	10.1
10.2 EVOLUÇÃO DA GESTÃO DE QUALIDADE NA CONSTRUÇÃO DE DUTOS NO BRASIL	10.1
10.3 EM QUE SE APÓIA A CONSTRUÇÃO DE DUTOS	10.2
10.4 CONSTRUÇÃO E MONTAGEM - PRINCIPAIS ATIVIDADES	10.3
10.4.1 Recebimento, inspeção e armazenamento de materiais	10.3
10.4.2 Projeto executivo	10.5
10.4.3 Locação e marcação da faixa de domínio e da pista	10.5
10.4.4 Abertura de pista	10.6
10.4.5 Transporte, distribuição e manuseio de tubos	10.7
10.4.6 Curvamento	10.9
10.4.7 Revestimento com concreto	10.11
10.4.8 Soldagem	10.12
10.4.9 Inspeção de soldagem	10.14
10.4.9.1 Para gasodutos	10.15
10.4.9.2 Para oleodutos	10.16
10.4.10 Revestimento externo anticorrosivo	10.16
10.4.11 Abertura e preparação da vala	10.17
10.4.12 Abaixamento e cobertura	10.20
10.4.13 Cruzamentos e travessias	10.22
10.4.14 Sinalização	10.26
10.4.15 Proteção e restauração da pista	10.27
10.4.16 Teste hidrostático	10.28
10.4.17 Inspeção dimensional interna do duto	10.31
10.4.18 Inspeções adicionais por “pig” ultra-sônico e inercial	10.31
10.4.19 Condicionamento	10.32
10.4.20 Inspeção do revestimento externo anticorrosivo após a cobertura	10.33
10.4.21 Emissão de documentação “conforme construído”	10.34
10.5 REQUISITOS GERAIS DE SEGURANÇA, MEIO AMBIENTE E SAÚDE	10.35
11 - OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DUTOS	11.1
11.1 PROGRAMAÇÃO DAS OPERAÇÕES	11.1
11.2 EXECUÇÃO DA OPERAÇÃO	11.2
11.3 SISTEMAS DE DUTOS DE LÍQUIDOS	11.5
11.3.1 Polidutos	11.5
11.3.2 Programação	11.8
11.3.3 Execução das Operações	11.9
11.3.3.1 Recomendações Gerais	11.9

11.3.3.2 Operações de Corte e Sangria de Produtos	11.11
11.3.3.2.1 Operações de Corte	11.11
11.3.3.2.2 Operações de Sangria	11.12
11.4 SISTEMAS DE GASODUTOS	11.12
11.4.1 Programação	11.12
11.4.2 Execução das Operações	11.13
11.4.3 Tempo de Sobrevivência e Empacotamento	11.13
11.5 PASSAGEM DE RASPADORES	11.16
11.6 EFEITO “TUBO EM U”	11.16
11.7 BOLSÕES DE AR EM DUTOS	11.17
11.8 DEPÓSITO DE ÁGUA EM DUTOS	11.18
11.9 CONDICIONAMENTO E DESATIVAÇÃO DE DUTOS	11.19
11.9.1 Condicionamento	11.19
11.9.2 Desativação Permanente (abandono)	11.20
11.9.3 Desativação Temporária (hibernação)	11.20
11.9.4 Retorno de Dutos Hibernados à Operação	11.21
11.10 PERDAS NO TRANSPORTE E ARMAZENAMENTO DE PRODUTOS	11.21
11.11 GERENCIAMENTO DO FATOR HUMANO	11.23
11.12 REFERÊNCIAS	11.26
11.13 LEITURAS ADICIONAIS	11.26
12 - AUTOMAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO	12.1
12.1 PROCESSOS INDUSTRIAIS E SUA RELAÇÃO COM A AUTOMAÇÃO	12.1
12.2 COMPONENTES DE UM SISTEMA DE AUTOMAÇÃO	12.2
12.3 PRINCIPAIS TIPOS DE SISTEMA DE AUTOMAÇÃO NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO	12.3
12.3.1 SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition System ou Sistema de Controle Supervisório e Aquisição de Dados)	12.3
12.3.2 SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído ou DCS-Digital Control System)	12.3
12.4 INSTRUMENTAÇÃO PRIMÁRIA	12.4
12.4.1 Indicadores	12.5
12.4.1.1 Indicadores de Pressão	12.5
12.4.1.2 Indicadores de Temperatura	12.6
12.4.1.3 Indicadores de Nível	12.7
12.4.1.4 Indicadores de Vazão	12.8
12.4.2 Chaves	12.8
12.4.3 Sensores e Transmissores	12.13
12.4.3.1 Transmissores de Pressão	12.13
12.4.3.2 Transmissores de Vazão	12.14
12.4.4 Medição de densidade	12.23
12.4.5 Instrumentação para a medição de temperatura	12.25
12.4.6 Instrumentação para medição de nível	12.26
12.5 A MALHA DE CONTROLE	12.29
12.5.1 Estabilidade e sintonia da malha	12.31
12.6 VÁLVULAS DE CONTROLE E SEUS ATUADORES	12.33
12.6.1 Válvulas de Controle	12.33
12.6.2 Atuadores de válvulas de controle	12.37
12.7 O NÍVEL DA INTERFACE COM O PROCESSO	12.37
12.7.1 Controladores Lógicos Programáveis	12.37
12.7.2 Estção Terminal Remota – ETR	12.40
12.8 SISTEMA SCADA (SUPERVISORY CONTROL AND DATA ACQUISITION)	12.40
12.8.1 O Projeto dos Sistemas SCADA	12.42
12.8.2 Requisitos dos sistemas scadas e suas arquiteturas típicas	12.43
12.8.2.1 Requisitos	12.43
12.8.2.2 Arquiteturas	12.44
12.8.2.2.1 Estações minimestres	12.44
12.8.2.2.2 Estação mestre	12.45
12.8.3 Subsistema de comunicação de dados	12.47
12.8.3.1 Redes de Campo	12.49
12.8.4 O Software do Sistema SCADA	12.51

12.8.5	Sistemas de detecção de vazamento	12.53
13	- CORROSÃO E PROTEÇÃO CATÓDICA	13.1
13.1	INTRODUÇÃO	13.1
13.2	CORROSÃO EXTERNA	13.2
13.2.1	Agressividade específica	13.3
13.2.2	Agressividade relativa	13.4
13.2.2.1	Corrosão Eletrolítica	13.5
13.2.2.2	Corrosão por pilhas de longo alcance	13.5
13.2.2.3	Corrosão sob tensão (CST)	13.8
13.3	PROTEÇÃO CATÓDICA	13.8
13.4	CORROSÃO INTERNA	13.15
13.5	REFERÊNCIAS	13.16
14	- INSPEÇÃO DE DUTOS	14.1
14.1	TECNOLOGIA DE <i>PIGS</i>	14.1
14.2	PIGS DE LIMPEZA E DE GARANTIA DE FLUXO	14.1
14.2.1	Pigs espuma	14.2
14.2.2	Pigs Raspadores	14.2
14.2.3	Flexpigs	14.3
14.2.4	Pigs esfera	14.3
14.2.5	Pigs de limpeza magnética	14.3
14.3	PIGS PARA VERIFICAÇÃO DA GEOMETRIA DO DUTO	14.3
14.3.1	Pig de Placa Calibradora	14.4
14.3.2	Pig Geométrico	14.4
14.4	PIGS PARA DETECÇÃO DE CORROSÃO	14.6
14.4.1	Pig Magnético de Corrosão	14.6
14.4.2	Pig de ultra-som	14.9
14.4.3	Pig de Perfilagem da corrosão interna – Pig Palito	14.14
14.5	PIGS ESPECIAIS	14.14
14.5.1	Pig inercial	14.14
14.5.2	Pigs de Bloqueio	14.14
14.5.3	Pig de perfilagem	14.15
14.6	RELATÓRIOS DE INSPEÇÃO	14.16
14.7	AVALIAÇÃO DIRETA	14.17
14.8	AVALIAÇÃO DIRETA DE CORROSÃO EXTERNA (ECDA)	14.18
14.8.1	Pré-avaliação	14.19
14.8.2	Inspeção Indireta	14.20
14.8.3	Inspeção Direta	14.21
14.8.4	Pós-avaliação	14.22
14.9	AVALIAÇÃO DIRETA DE CORROSÃO SOB TENSÃO (SCCDA)	14.23
14.9.1	Pré-Avaliação	14.23
14.9.2	Inspeção Indireta	14.24
14.9.3	Inspeção Direta	14.24
14.9.4	Pós-avaliação	14.25
14.10	AVALIAÇÃO DIRETA DE CORROSÃO INTERNA PARA GÁS SECO (DG-ICDA)	14.25
14.10.1	Pré-avaliação	14.26
14.10.2	Inspeção Indireta	14.26
14.10.3	Inspeção Direta Detalhada	14.27
14.10.4	Pós-avaliação	14.28
14.11	AVALIAÇÃO DIRETA DE CORROSÃO INTERNA PARA GÁS ÚMIDO (WG-ICDA)	14.28
14.12	AVALIAÇÃO DIRETA DE CORROSÃO INTERNA PARA PETRÓLEO LÍQUIDO (LP-ICDA)	14.29
14.13	REFERÊNCIAS	14.29
15	- INTEGRIDADE DE DUTOS	15.1
15.1	NOÇÕES SOBRE A AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL	15.1
15.2	DANOS E DEFEITOS EM DUTOS	15.3

15.3 ANÁLISE DE RISCOS	15.5
15.4 SOLICITAÇÕES E TENSÕES EM DUTOS	15.7
15.4.1 Pressão interna ou externa	15.7
15.4.2 Esforços externos: flexão, torção, cortante e normal	15.8
15.4.3 Temperatura e restrição de deslocamento pelo solo	15.8
15.4.4 Carga crítica de flambagem em vãos livres de dutos	15.9
15.4.5 Tensões longitudinais causadas por flexão ou tração por acomodação ao terreno ou movimento do solo	15.9
15.5 INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE DUTOS SEM DEFEITOS	15.10
15.5.1 Fator de segurança do duto sem defeito sob pressão interna	15.10
15.5.2 Escoamento generalizado e ruptura para tubos com pressão interna	15.11
15.5.3 Flambagem localizada causada pela pressão externa e sua propagação	15.11
15.5.4 Flambagem da parede e enrugamento causado pelo curvamento de um tubo	15.12
15.5.5 Carga para provocar uma moessa ou dente	15.12
15.5.5.1 Indentação longitudinal	15.12
15.5.5.2 Outros resultados sobre carregamentos para a formação de moessas	15.13
15.5.6 Carga para provocar uma perfuração	15.15
15.5.7 Fadiga	15.15
15.5.8 Ovalização	15.17
15.5.9 Trincamento sob tensão em atmosfera corrosiva – CST	15.17
15.5.10 Outras solicitações	15.17
15.6 DUTOS COM DEFEITOS DE CORROSÃO	15.17
15.6.1 Resumo da ASME B31G [21]: “Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines”	15.20
15.6.1.1 Limitações	15.20
15.6.1.2 Metodologia	15.20
15.6.1.3 Critérios de aceitação	15.20
15.6.2 Influência da sobre-espessura de corrosão.	15.21
15.7 DUTOS COM MOSSAS	15.23
15.7.1 Mossas simples sob pressão interna - carregamento estático	15.24
15.7.2 Mossas simples sob pressão interna - carregamento cíclico	15.24
15.7.3 Mossas com vincos	15.25
15.7.4 Mossas suaves em soldas sob pressão interna – carregamento estático e carregamento cíclico	15.25
15.7.5 Mossas lisas acompanhados de sulcos	15.26
15.8 DUTOS COM SULCOS OU RANHURAS	15.26
15.8.1 Sulco longitudinal sob pressão interna	15.26
15.8.2 Sulco circunferencial em duto com pressão interna submetido à flexão e esforço normal	15.26
15.8.3 Mossas suaves com cavas sob pressão interna– carregamento estático	15.26
15.8.4 Mossas suaves com cavas sob pressão interna – carregamento cíclico	15.27
15.9 DUTOS COM DEFEITOS TIPO TRINCAS	15.27
15.10 DUTOS COM ENRUGAMENTO	15.28
15.11 DUTOS COM TRINCAMENTO SOB TENSÃO EM AMBIENTE CORROSIVO	15.29
15.12 CONSIDERAÇÕES SOBRE A INTEGRIDADE DE DUTOS COM OUTROS DEFEITOS	15.29
15.13 REPAROS EM DUTOS COM DEFEITOS	15.29
15.13.1 Esmerilhamento	15.31
15.13.2 Deposição de metal de solda	15.32
15.13.3 Luva metálica	15.32
15.13.4 Luva metálica preenchida com epóxi	15.32
15.13.5 Materiais compostos	15.33
15.13.6 Braçadeiras bi-partidas	15.33
15.13.7 Bacalhau	15.33
15.13.8 Trepanação, tamponamento, desvio e substituição	15.33
15.14 REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA	15.34
16 - DUTOS SUBMARINOS RÍGIDOS	16.1
16.1 INTRODUÇÃO	16.1
16.2 CONCEITOS DO SISTEMA DE DUTOS	16.1

16.3 PROJETO BÁSICO DE DUTO SUBMARINO	16.2
16.3.1 Dados de Projeto	16.3
16.3.2 Etapas do Projeto Básico	16.6
16.3.2.1 Avaliação de Fluxo e Fluido	16.6
16.3.2.2 Seleção de Rota	16.7
16.3.2.3 Dimensionamento Mecânico	16.8
16.3.2.4 Análise de Estabilidade	16.11
16.3.2.5 Análise Termomecânica	16.12
16.3.2.6 Revestimentos e Proteção Catódica	16.13
16.3.2.7 Análise de Vãos Livres	16.18
16.3.2.8 Análise da Instalação do Duto	16.18
16.3.2.9 Comissionamento do Duto	16.26
16.4 PROJETO DETALHADO DE DUTO SUBMARINO	16.27
16.4.1 Materiais	16.27
16.4.2 Serviços	16.27
16.4.3 Análise e Desenho da Rota do Duto	16.28
16.4.4 Análise de Instalação	16.28
16.4.5 Análise Crítica e Análise de Risco	16.29
16.4.6 Documentação e Relatório de Projeto	16.29
16.5 REFERÊNCIAS	16.29
17 - PROJETO DE DUTOS FLEXÍVEIS PARA APLICAÇÃO SUBMARINA	17.1
17.1 INTRODUÇÃO	17.1
17.2 ESTRUTURA DOS DUTOS FLEXÍVEIS	17.2
17.2.1 Função Mecânica das Camadas e Seleção dos Materiais	17.3
17.2.1.1 Carcaça	17.3
17.2.1.2 Camada de Pressão	17.5
17.2.1.3 Armadura de Pressão	17.5
17.2.1.4 Armaduras de Tração	17.6
17.2.1.5 Camada Externa	17.7
17.2.1.6 Camadas Auxiliares	17.7
17.3 RISERS	17.10
17.3.1 Análises Globais do Movimento do Riser	17.12
17.3.2 Análise Local de Tensão das Camadas	17.15
17.3.3 Projeto do Enrijecedor	17.16
17.3.4 Análises de Fadiga	17.17
17.3.5 Resumo do Projeto do Riser Flexível	17.18
17.3.6 Escolha da Configuração do Riser	17.19
17.4 FLOWLINES	17.21
17.5 FABRICAÇÃO DO DUTO FLEXÍVEL	17.22
17.5.1 Fabricação das Camadas do Flexível	17.22
17.5.1.1 Perfilagem	17.22
17.5.1.2 Camadas Plásticas	17.23
17.5.1.3 Espiralagem	17.23
17.5.1.4 Armagem	17.24
17.6 INSTALAÇÃO DO DUTO FLEXÍVEL	17.25
17.7 REFERÊNCIAS	17.31
18 – SEGURANÇA OPERACIONAL E AGENTES REGULADORES	18.1
18.1 SEGURANÇA OPERACIONAL	18.1
18.2 A LEGISLAÇÃO BRASILEIRA	18.2
18.2.1 Meio Ambiente	18.3
18.2.2 Regulamentação das Atividades Específicas da Indústria Petrolífera	18.3
18.3 A LEGISLAÇÃO AMERICANA	18.7
18.4 COMENTÁRIOS FINAIS	18.9
18.5 REFERÊNCIAS	18.9
ÍNDICE REMISSIVO	i.1
TABELA DE CONVERSÃO DE UNIDADES USUAIS	t.1

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Dimensões primárias e unidades nos sistemas SI e BG	2.1
Tabela 2.2: Viscosidade e densidade de alguns fluidos ($p = p_{atm}$; $T = 20^{\circ}C$)	2.2
Tabela 2.3: Fator de atrito vs. no. de Reynolds, dutos lisos. Fluido sem polímero (f) e com polímero (fP).	2.15
Tabela 2.4: Rugosidades para dutos novos	2.15
Tabela 2.5: Coeficientes de perda localizada em componentes	2.16
Tabela 2.6: Coeficientes para diversos modelos de escoamento - Eq. (2.89)	2.29
Tabela 3.1: Qualificação de tensão, deformação e resistência	3.18
Tabela 3.2: Tenacidade à Fratura, K_{Ic} , para alguns materiais	3.24
Tabela 4.1: Características típicas dos processos de produção de aço plano e tubo sem costura	4.14
Tabela 5.1: Resistências ao escoamento e alongamentos medidos em ensaios de tração em corpos de prova retirados na direção de laminação (axial) e na direção da largura da chapa (transversal)	5.6
Tabela 5.2: Resistências mecânicas especificadas em [5.1]	5.7
Tabela 5.3: Especificações para um segmento de tubo para duto API 5L X70 ERW, com diâmetro de 18" (457,2 mm) e espessura de parede de 0,312" (7,9 mm), com extremidades retas e comprimento nominal de 12 m.	5.8
Tabela 5.4: Tipos de tubos previstos na norma API 5L	5.8
Tabela 6.1: Panorama de adesão ao código EN 1461 pelos países europeus	6.2
Tabela 6.2: Classes de Locação e seu uso pelos diversos códigos	6.3
Tabela 6.3: Espaçamento entre válvulas	6.5
Tabela 6.4: Curvamento a frio no campo	6.5
Tabela 6.5: Cobertura	6.6
Tabela 6.6: Afastamento de outras instalações	6.6
Tabela 6.7: Proteção contra terceiros	6.7
Tabela 6.8: Sinalização da faixa	6.8
Tabela 6.9: Pressão no ensaio hidrostático	6.9
Tabela 6.10: Defeitos provenientes da fase de construção e montagem	6.10
Tabela 6.11: Principais documentos referenciados pelos códigos	6.11
Tabela 6.12: Subseções da Seção 192 – CFR/DOT-EUA	6.12
Tabela 6.13: Subseções da Seção 195 – CFR/DOT-EUA	6.12
Tabela 6.14: Portarias da ANP específicas para dutos	6.12
Tabela 8.1: Exemplo de configuração em série	8.8
Tabela 8.2: Exemplo de configuração em série	8.8
Tabela 8.3: Exemplo de configuração em série	8.9
Tabela 9.1: Parâmetros para o curvamento a frio de tubos	9.6
Tabela 9.2: Pressão máxima admissível (bar) segundo ASME B 16.5	9.8
Tabela 9.3: Pressão máxima admissível (bar) segundo MSS SP 44	9.8
Tabela 9.4: Vão máximo	9.13
Tabela 9.5: Tensões normais circunferenciais calculadas para a pressão unitária (segundo quatro das principais equações)	9.24
Tabela 9.6: Espessuras mínimas recomendadas para tubos	9.28
Tabela 9.7: Pressões e Requisitos para ensaio hidrostático de linha-tronco de duto	9.36
Tabela 10.1: Tolerância da espessura de parede – K	10.10
Tabela 10.2: Valores mínimos de cobertura segundo a norma ASME B.31.4.	10.18
Tabela 10.3: Valores mínimos de cobertura segundo a norma ABNT NBR 12712	10.18
Tabela 10.4: Fator de Temperatura - T_f	10.30
Tabela 11.1: Distribuição das Perdas - Indústria do Petróleo	11.23
Tabela 11.2: Potencial de Redução do Erro Humano	11.26
Tabela 13.1: Índices parciais de agressividade do solo	13.4

Tabela 13.2: Agressividade do solo segundo Trabanelli	13.4
Tabela 13.3: Potencial natural típico de materiais metálicos enterrados (Cu/CuSO ₄)	13.7
Tabela 13.4: Valores de densidade de corrente para a Bacia de Campos	13.13
Tabela 14.1: Especificação Básica de Pig Geométrico de 14 polegadas	14.5
Tabela 14.2: Especificação Básica de um Pig MFL de 24 polegadas	14.10
Tabela 14.3: Especificação Básica de um Pig de Ultra-som de 24 polegadas	14.13
Tabela 14.4: Determinação do número mínimo de escavações na metodologia ECDA	14.22
Tabela 15.1: Exemplo de regras para verificação da interação de alvéolos corrosão existentes na superfície de um duto	15.4
Tabela 15.2: Exemplos de meios particulares para realizações de análises qualitativas e quantitativas para equipamentos, tubulações ou dutos, desenvolvidos por empresas	15.5
Tabela 15.3: Principais causas de acidentes em dutos nos EUA	15.5
Tabela 15.4: Categorias de ameaças aos dutos segundo a ASME B31.8S	15.6
Tabela 15.5: Modelos força-deslocamento para criação de mossas	15.14
Tabela 15.6: Parâmetros para cálculo da pressão de operação em dutos com defeitos de corrosão (para $0.10 \leq d/t < 0.80$)	15.19
Tabela 15.7: Tipos de defeitos e tipos de reparos	15.31
Tabela 17.1: Tabela de Casos Dinâmicos	17.14
Tabela 17.2: Critério de Projeto para as Camadas do Duto Flexível	17.15
Tabela 17.3: Matriz de Casos Mínimos de Carregamento	17.16

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Equipe de construção de um oleoduto nos EUA, por volta de 1890	1.2
Figura 1.2: Trabalhadores abrem caminho para a construção do Oleoduto Santos-São Paulo – 1950	1.5
Figura 1.3: Traçado do gasoduto Bolívia-Brasil, o maior da América Latina	1.6
Figura 1.4: O ciclo de vida de um duto	1.7
Figura 1.5: Graus de influência e investimento das etapas do ciclo de vida do empreendimento de um duto	1.8
Figura 1.6: Imagem de satélite permitindo melhor definição do traçado ideal de duto no Amazonas	1.10
Figura 1.7: Composição típica de custos de um empreendimento de um gasoduto	1.11
Figura 1.8: Evolução da tecnologia de materiais para dutos	1.11
Figura 1.9: Variação do custo de transporte com a vazão projetada para o duto	1.13
Figura 1.10: Planta de traçado e perfil do duto em escala 1:10.000	1.15
Figura 1.11: Abaixamento de trecho de duto na vala, após soldagem dos tubos e revestimento das juntas	1.17
Figura 1.12: Diagrama esquemático de um SCADA para dutos	1.18
Figura 1.13: Centro Nacional de Controle Operacional da TRANSPETRO na cidade do Rio de Janeiro, onde é feita 24 horas por dia, a supervisão e controle operacional de todos os oleodutos e gasodutos da PETROBRAS	1.18
Figura 2.1: Distribuição de velocidade entre placas paralelas	2.2
Figura 2.2: Velocidade através de uma superfície arbitrária	2.4
Figura 2.3: Coordenada para distribuição de pressão num fluido	2.6
Figura 2.4: Volumes de controle: a) fixo - análise de tensões num bocal; b) em movimento - análise de forças de arraste; c) deformável - análise de variação de pressão dentro de um tanque	2.7
Figura 2.5: Linhas de energia e piezométrica para escoamento não viscoso num duto	2.9
Figura 2.6: Escoamento laminar num duto circular	2.12
Figura 2.7: Diagrama de Moody para dutos com paredes lisas e rugosas (Moody [5], com permissão, ASME)	2.14
Figura 2.8: Expansão (a) e contração (b) súbitas no escoamento num duto	2.17
Figura 2.9: Coeficiente de perda de carga para curva de 90° (White [13], com permissão, McGraw-Hill)	2.17
Figura 2.10: Coeficientes de perda de carga para entradas diversas	2.17
Figura 2.11: Sistema de dutos com diâmetros e comprimentos variáveis em série	2.20
Figura 2.12: Sistema de dutos em paralelo	2.20
Figura 2.13: Placa de orifício instalada em um duto	2.21
Figura 2.14: Bocal instalado em um duto	2.21
Figura 2.15: Venturi instalado em um duto	2.22
Figura 2.16: Segmentação de um duto	2.29
Figura 2.17: Fluxo de calor num cilindro composto	2.34
Figura 2.18: Perfil de temperatura ao longo de um duto com efeito Joule-Thomson	2.35
Figura 2.19: Duto enterrado num meio semi-infinito com temperatura de superfície constante, h_i é o coeficiente de película interno (convecção forçada), r_1 e r_2 os raios interno e externo do duto, r_3 o raio externo do isolante e k_a e k_b as condutividades térmicas do duto e do isolante, respectivamente	2.36
Figura 2.20: Distribuição de temperatura e pressão ao longo do duto, destacando a importância do efeito Joule-Thomson sobre a temperatura	2.37
Figura 3.1: Corpo deformável submetido a carregamentos que é virtualmente seccionado por um plano A definido pela sua normal n_A	3.1
Figura 3.2: Forças que atuam num elemento de área definido pelo plano de corte	3.1
Figura 3.3: Tetraedro representativo de um ponto material em equilíbrio e submetido a tensões totais T_i atuantes em suas faces e à força de corpo C	3.2
Figura 3.4: Notação para as tensões atuantes num plano que passa por um ponto	3.2
Figura 3.5: Representação do estado de tensão segundo dois conjuntos de eixos (quaisquer - X, Y, Z, e principais - 1, 2, e 3) para um ponto do corpo carregado	3.3
Figura 3.6: Planos de corte virtuais de uma barra prismática tracionada segundo planos definidos por suas normais X e X' que fazem um ângulo α entre si	3.4
Figura 3.7: Tubo com parede fina submetido à pressão interna com tampo ou sem tampo (a); Plano de corte diametral do cilindro mostrando pressão interna e tensões circunferenciais na parede cortada, necessárias para manter o equilíbrio de forças na direção vertical (circunferencial) (b); elemento de parede do tubo formado por dois planos de cortes radiais divergentes do ângulo $d\theta$ e pelas superfícies	3.5

interna e externa do tubo (c).	
Figura 3.8: Tubo com parede espessa submetido à pressão interna e externa	3.6
Figura 3.9: Vetores que definem as normais aos planos de referência (X,Y,Z) e principais (1,2,3)	3.9
Figura 3.10: Estado triaxial de tensões e casos particulares – estados biaxial e uniaxial	3.9
Figura 3.11: Equilíbrio do paralelepípedo elementar para o estado plano de tensões	3.10
Figura 3.12: Corpo deformável submetido a um carregamento	3.12
Figura 3.13: Deslocamentos de um corpo deformável carregado	3.13
Figura 3.14: Dimensões típicas para o paralelepípedo elementar ser considerado como homogêneo e isotrópico com a finalidade de representar a resposta macroscópica do comportamento do material quando submetido a um estado de tensão. Tensões e propriedades serão dependentes do tamanho do “ponto” considerado.	3.14
Figura 3.15: Barra tracionada e instrumentada por dois extensômetros elétricos posicionados nas direções X e Y	3.15
Figura 3.16: Comportamento elástico-plástico de um material estrutural.	3.15
Figura 3.17: Direções ortogonais para definição de deformações	3.17
Figura 3.18: Roseta extensométrica	3.18
Figura 3.19: Distribuição qualitativa de tensões para uma placa plana tracionada.	3.22
Figura 3.20: Modos de abertura de uma trinca e o estado plano de tensão localizado com relação à raiz da trinca	3.23
Figura 3.21: Fatores de intensificação de tensões para duas geometrias clássicas	3.23
Figura 3.22: Placa plana com trinca passante tracionada por tensão uniforme	3.25
Figura 3.23: Tubo sob pressão interna com trinca longitudinal passante sendo modelado por chapa plana com trinca sob tração	3.25
Figura 3.24: Probabilidade de falha e a influência das dispersões das distribuições de σ e S falha	3.28
Figura 3.25: Fator de resistência remanescente (RSF) determinado pela razão entre as cargas de colapso dos dutos com defeito (L_{DC}), e sem defeito (L_{UC})	3.29
Figura 3.26: Fator de resistência remanescente (RSF) determinado pela razão entre as cargas de colapso dos dutos com defeito-reparado (L_{RDC}), e sem defeito (L_{UC})	3.30
Figura 3.27: Diagrama para avaliação de componentes com trincas, FAD	3.30
Figura 4.1: Relação entre a tenacidade caracterizada pela temperatura de transição obtida a 27J e a tensão de escoamento [1. TMCP = “Thermomechanical Controlled Process”]	4.2
Figura 4.2: Evolução dos graus API ao longo dos anos	4.2
Figura 4.3: Efeito dos principais elementos microligantes na temperatura de recristalização	4.9
Figura 4.4: Diagrama temperatura-tempo mostrando as etapas da laminação controlada: reaquecimento, laminação de desbaste, laminação de acabamento, e resfriamento	4.10
Figura 4.5: Curva de resfriamento contínuo de um aço X80 de concepção moderna. Os campos indicados por F, P e B representam os campos da ferrita, perlita e bainita, respectivamente	4.11
Figura 4.6: Diagrama esquemático de um laminador de chapas grossas, com cadeiras de desbaste e acabamento distintas	4.12
Figura 4.7: Diagrama esquemático de um laminador de tiras a quente com um estágio de desbaste e seis cadeiras de acabamento	4.12
Figura 4.8: Representação esquemática de um laminador do tipo Steckel	4.13
Figura 4.9: Representação esquemática do equipamento de lingotamento de placas finas e laminação direta	4.13
Figura 5.1: Etapas de produção do aço até o lingotamento contínuo	5.2
Figura 5.2: Representação esquemática de um lingotador contínuo a arco circular	5.3
Figura 5.3: Lingotador de placas: (a) desenho esquemático de um lingotador de dois veios; (b) vista parcial das duas placas lingotadas na saída do lingotador. Cortesia da Usiminas.	5.4
Figura 5.4: Laminador de chapas grossas: (a) desenho esquemático de um laminador quádruplo; (b) vista geral de um laminador (cortesia da Usiminas)	5.5
Figura 5.5: Desenhos esquemáticos das quatro etapas de conformação a frio do processo UOE	5.9
Figura 5.6: Etapas do processo UOE: (a) dobramento U; (b) e (c) dobramento O; Cortesia da Tenaris Confab	5.10
Figura 5.7: Etapas de fabricação de tubos UOE-SAW. Cortesia da Tenaris Confab	5.10
Figura 5.8: Soldagem externa do tubo: arco submerso automático - processo tandem com quatro eletrodos	5.11
Figura 5.9: Macrografias em seção transversal das soldas longitudinais, (ITUC-PUC-Rio). (a) tubo API 5L X60, UOE-SAW, diâmetro 12¾”(323,9 mm), espessura de parede 9,5 mm;	5.12

(b) tubo API 5L X70, ERW, diâmetro 18”(457,2 mm), espessura de parede 7,9 mm	
Figura 5.10: Ciclo de tensionamento e efeito Bauschinger	5.13
Figura 5.11: Etapas de fabricação de tubos por dobramento contínuo e soldagem ERW. Cortesia da Tenaris Confab	5.14
Figura 5.12: Etapas de fabricação de tubos com dobramento e soldagem helicoidais. Cortesia da TenarisConfab	5.16
Figura 5.13: Soldagem helicoidal interna e externa a arco submerso – processo tandem	5.17
Figura 5.14: Etapas de conformação incremental da chapa no processo JCO	5.18
Figura 5.15: Desenho esquemático de uma calandra piramidal: (a) início do dobramento, (b) término	5.18
Figura 5.16: Vista das barras ao final do arco circular de um lingotador contínuo com quatro veios. Cortesia da V&M do Brasil	5.19
Figura 5.17: (a) barra circular sob compressão diametral; (b) cavidade axial formada no centro da barra; (c) ilustração de um laminador perfurador.	5.20
Figura 5.18: (a) Laminação de perfuração; (b) tubo primário ou lupa. Cortesia da V&M do Brasil.	5.21
Figura 5.19: Etapas da linha de laminação com plugue: (a) laminador de perfuração; (b) laminador com plugue; (c) laminador rolator; (d) laminador acabador. Cortesia da V&M do Brasil.	5.21
Figura 5.20: Etapas da laminação com plugue: (a) chegada do tubo primário; (b) laminação; (c) final da laminação; (d) retirada do tubo laminado.	5.22
Figura 5.21: Desenhos esquemáticos: (a) laminador rolator; (b) laminador acabador - conjunto de dois roletes.	5.22
Figura 5.22: Desenho esquemático do laminador retificador	5.23
Figura 5.23: Etapas da linha de laminação contínua: (a) laminador de perfuração; (b) laminador redutor; (c) laminador com mandril; (d) laminador redutor de acabamento. Cortesia da V&M do Brasil.	5.23
Figura 5.24: Laminação com mandril: desenho esquemático de dois conjuntos com dois roletes cada um. (a) roletes defasados de 90° em passes sucessivos sobre um único mandril; (b) vista com roletes alinhados apenas para visualização de passes sucessivos.	5.24
Figura 5.25: Laminação de redução - desenho esquemático: (a) vista frontal de um conjunto com três roletes; (b) vista com roletes alinhados apenas para visualização de passes sucessivos sem mandril.	5.24
Figura 5.26: Laminação peregrina - (a) rolos especiais; (b) etapas da laminação: (1) os rolos especiais colhem a porção do material a ser trabalhado; (2) redução do diâmetro externo sobre o mandril interno; (3) as regiões de menor raio dos rolos deixam de ter contato com o tubo, que é levado à frente, retornando à etapa (1)	5.25
Figura 5.27: Revestimento externo em tripla camada em polietileno extrudado	5.27
Figura 5.28: Etapas do processo de aplicação de revestimento externo em tripla camada por extrusão coaxial	5.28
Figura 5.29: Etapas do processo de aplicação de revestimento externo em tripla camada por extrusão lateral	5.29
Figura 5.30: Revestimento externo em tripla camada por extrusão lateral sendo aplicada a um tubo. Cortesia da Socotherm Brasil.	5.29
Figura 7.1: Fases de definição do traçado preliminar	7.5
Figura 7.2: Definição do traçado básico	7.6
Figura 7.3: Definição do traçado definitivo	7.6
Figura 7.4: Duto, mostrado em azul, com traçado modificado para atravessar uma mata em área de menor densidade de árvores	7.7
Figura 7.5: Duto foi desviado para evitar mata, passando em local de pastagem	7.8
Figura 7.6: Duto cruza as curvas de nível de forma perpendicular para evitar movimentação de terra	7.8
Figura 7.7: Duto (em azul) posicionado na região de influência de estrada	7.9
Figura 7.8: Duto passando em área com menor quantidade de propriedades e evitando aglomeração de edificações	7.9
Figura 8.1: Gradientes mostrando os efeitos da viscosidade e da vazão	8.1
Figura 8.2: Gradientes mostrando o uso da bomba baseado na elevação	8.2
Figura 8.3: Flare - quando a equipe de manutenção abre a válvula que leva ao queimador, o líquido é desviado para o queimador onde é inflamado e queimado de forma segura	8.3
Figura 8.4: a) Disposição das válvulas desviando de uma estação de bombeamento típica. b) Disposição das válvulas do líquido que entra em uma estação de bombeamento típica	8.5
Figura 8.5: Bomba centrífuga	8.6
Figura 8.6: Fluxo do líquido através de uma configuração das bombas em série	8.7
Figura 8.7: Configuração em paralelo simples	8.9

Figura 8.8: Configuração em série e em paralelo da estação de bombeamento	8.10
Figura 8.9: Bomba multi-estágio - Uma bomba multi-estágio usa dois ou mais conjuntos de rotores para, gradativamente, aumentar a pressão do líquido, e pode igualar a produção de pressão de duas ou mais bombas em série	8.10
Figura 8.10: Pressão em estações de compressão	8.12
Figura 8.11: a) Compressor alternativo usado em ECOMPs de pequena capacidade; b) compressor centrífugo usado em ECOMPs de grande capacidade	8.13
Figura 9.1: Momentos e flechas nas vigas-modelo	9.11
Figura 9.2: Esbeltez tubular relacionada à razão p/S_{adm} , no domínio $0,09 < p/S_{adm} < 0,25$	9.21
Figura 9.3: Razão R entre tensões <i>versus</i> esbeltez tubular e/D	9.23
Figura 9.4: Tensões circunferenciais na parede de um tubo com espessura na transição de fina para grossa	9.24
Figura 9.5: Diagrama de forças longitudinais no trecho de afloramento	9.34
Figura 10.1: Inspeção de recebimento de tubos	10.3
Figura 10.2: Área de armazenagem de tubos	10.3
Figura 10.3: Apoio para pilha de tubos	10.4
Figura 10.4a: Transporte rodoviário	10.4
Figura 10.4b: Transporte ferroviário	10.4
Figura 10.4c: Transporte fluvial	10.4
Figura 10.5: Patola para içamento de tubos	10.5
Figura 10.6: Operação de içamento	10.5
Figura 10.7: Supressão vegetal	10.6
Figura 10.8: Inventário florestal	10.6
Figura 10.9: Limpeza de pista	10.7
Figura 10.10: Cerca provisória	10.7
Figura 10.11: Construção de estivas	10.7
Figura 10.12: Pontilhão para travessia de rios	10.7
Figura 10.13: Transporte de tubos para a pista	10.8
Figura 10.14: Construção de acessos	10.8
Figura 10.15: Carregamento de “dolly”	10.8
Figura 10.16: “Pipe carrier” já carregado	10.8
Figura 10.17: Tubos desfilados	10.8
Figura 10.18: Tubos desfilados	10.8
Figura 10.19: Curvadeira para tubos DN 6 pol	10.10
Figura 10.20: Curvadeira para tubos DN 32 pol	10.10
Figura 10.21: Teste de qualificação do procedimento	10.11
Figura 10.22: Placa calibradora	10.11
Figura 10.23: Preparação para a concretagem	10.11
Figura 10.24: Concretagem de tubos	10.12
Figura 10.25: Utilização do vibrador de parede e anteparo, evitando respingos de concreto sobre o solo	10.12
Figura 10.26: Atividade soldagem de tubos	10.12
Figura 10.27: Junta soldada em 4 passes	10.12
Figura 10.28: Dupla de soldadores em ação	10.12
Figura 10.29: Acopladeira interna	10.13
Figura 10.30: Acopladeira externa	10.13
Figura 10.31: Acoplador em ação	10.13
Figura 10.32: Fechamento de tie-in	10.13
Figura 10.33: “Paywelder”	10.13
Figura 10.34: Lixadeira	10.13
Figura 10.35: Numeração sequencial das juntas soldadas	10.14
Figura 10.36: Inspetor de solda	10.14
Figura 10.37: Inspeção por ultra-som	10.15
Figura 10.38: Inspeção por gamagrafia	10.15
Figura 10.39: Isolamento de área	10.15
Figura 10.40: Controle de vazamento de radiação	10.15
Figura 10.41: Limpeza superficial por jateamento	10.16
Figura 10.42: Manta termo-contrátil	10.16
Figura 10.43: Fitas de Polietileno	10.17

Figura 10.44: Pintura à base de epóxi	10.17
Figura 10.45: Abertura de vala logo após a abertura de pista	10.17
Figura 10.46: Abertura de vala imediatamente antes do abaixamento	10.17
Figura 10.47: Desmoronamento na vala	10.18
Figura 10.48: Cobertura	10.18
Figura 10.49: Demolição mecânica de rocha	10.19
Figura 10.50: Preparação para demolição de rocha com explosivos, em terreno seco ou úmido	10.19
Figura 10.51: Detonação	10.19
Figura 10.52: Abafamento	10.19
Figura 10.53: Coluna pronta para abaixamento	10.20
Figura 10.54: Fase construtiva do abaixamento	10.20
Figura 10.55: Içamento utilizando cinta	10.21
Figura 10.56: Içamento utilizando carrinho de roletes	10.21
Figura 10.57: Cobertura com material do próprio local	10.21
Figura 10.58: Cobertura com material importado	10.21
Figura 10.59: Boring machine	10.22
Figura 10.60: Cruzamento com linha de transmissão elétrica	10.23
Figura 10.61: Cruzamento com dutos pré-existentis	10.23
Figura 10.62: Cavalote construído em terra	10.24
Figura 10.63: Cavalote pronto para o lançamento	10.24
Figura 10.64: Momento do puxamento do cavalote	10.24
Figura 10.65: Momento da retirada dos flutuadores	10.24
Figura 10.66: Margens após o lançamento da coluna	10.24
Figura 10.67: Replântio nas margens	10.24
Figura 10.68: Etapas do furo direcional	10.25
Figura 10.69: Sonda para furo direcional	10.25
Figura 10.70: Detalhe da utilização da lama bentonítica	10.25
Figura 10.71: Atividade de “pull back”	10.25
Figura 10.72: Sinalização de faixa de dutos	10.26
Figura 10.73: Marco delimitador	10.26
Figura 10.74: Marco quilométrico	10.26
Figura 10.75: Marco quilométrico para canaviais	10.26
Figura 10.76: Sinalização enterrada	10.26
Figura 10.77: Canaletas longitudinais e transversais	10.27
Figura 10.78: Diques de contenção	10.27
Figura 10.79: Muro de contenção	10.27
Figura 10.80: Amortecedor	10.27
Figura 10.81: Reposição da camada vegetal	10.28
Figura 10.82: Proteção vegetal de taludes	10.28
Figura 10.83: Rampa com proteção vegetal implantada	10.28
Figura 10.84: Viveiro de mudas	10.28
Figura 10.85: Ponto de coleta de água	10.29
Figura 10.86: Ponto de descarte de água	10.29
Figura 10.87: “Pig” raspador	10.29
Figura 10.88: “Pig” bidirecional	10.29
Figura 10.89: Equipamentos de bombeio	10.29
Figura 10.90: Ponto de armazenamento de água	10.29
Figura 10.91: Etapas do teste hidrostático	10.30
Figura 10.92: “Pig” geométrico	10.31
Figura 10.93: “Pig” espuma de baixa densidade	10.32
Figura 10.94: “Pig” magnético	10.32
Figura 10.95: Lançador de “pigs”	10.33
Figura 10.96: Recebedor de “pigs”	10.33
Figura 10.97: Válvula de bloqueio	10.33
Figura 10.98: Injeção de corrente	10.34
Figura 10.99: Inspetor em ação	10.34
Figura 10.100: Planta e perfil conforme o construído	10.34
Figura 10.101: Acidente de trânsito	10.35
Figura 10.102: Homens trabalhando dentro de vala	10.35
Figura 10.103: Acidente com máquina	10.35

Figura 10.104: Manuseio inadequado de ferramenta	10.35
Figura 10.105: Palestra de conscientização	10.35
Figura 11.1: Tempo de Sobrevivência TS e Variação do Empacotamento	11.14
Figura 11.2: Efeito “Tubo em U”	11.17
Figura 12.1: Arquitetura simplificada de um Sistema de Controle	12.3
Figura 12.2: Características de desempenho dos instrumentos	12.4
Figura 12.3: Ajuste de Zero e Span para um transmissor com saída em corrente na faixa padrão de 4 a 20 mA	12.4
Figura 12.4: Indicadores de pressão ou manômetros do tipo Bourdon	12.5
Figura 12.5: Indicador de pressão do tipo Fole. O fole, ao ser pressurizado, se dilata aumentando sua altura (sua geometria impede a dilatação axial), deslocando, assim, o ponteiro sobre a escala por meio da haste e do conjunto pinhão cremalheira	12.5
Figura 12.6: Indicador de pressão do tipo diafragma. A pressão na câmara altera e empurra o diafragma que, por sua vez, desloca a alavanca e o ponteiro sobre a escala por meio do conjunto pinhão cremalheira	12.6
Figura 12.7: Indicadores de temperatura ou termômetros utilizados na indústria (tipo capela à esq. e o petroquímico à direita).	12.6
Figura 12.8: Medição de nível através de trena	12.7
Figura 12.9: Indicador de nível tipo bóia e mola	12.7
Figura 12.10: Circuito de comando de motobomba centrífuga	12.8
Figura 12.11: Chave de nível com instalação em câmara externa tipo “stand pipe”	12.10
Figura 12.12: Gráfico de uma chave de nível com o seu ciclo de histerese	12.10
Figura 12.13: Circuito de comando de motobomba de poço com chave de seleção manual automática e chave de nível com histerese ajustável	12.10
Figura 12.14: Simbologia utilizada para representar os interruptores usados em chaves para monitorização de condições de processo	12.11
Figura 12.15: Transmissor de pressão com detalhes da sua célula sensora	12.15
Figura 12.16: Placa de orifício com cantos chanfrados a 45°	12.15
Figura 12.17: Placa de Orifício montada entre flanges com tomadas nos flanges	12.15
Figura 12.18: Esquemático de um tubo de Venturi	12.15
Figura 12.19: Tubo de Venturi	12.15
Figura 12.20: Medidor Anubar	12.15
Figura 12.21: Formação de vórtices em um medidor do tipo Vortex	12.17
Figura 12.22: Turbina com rotor helicoidal para fluidos muito viscosos	12.17
Figura 12.23: Vista de uma turbina instalada e de seu pick up	12.18
Figura 12.24: Turbina convencional com anel de pontos magnetizados	12.18
Figura 12.25: Medidor de deslocamento positivo tipo tambor com palheta rotativa	12.18
Figura 12.26: Vista medidor PDM tipo tambor com palheta rotativa instalado	12.18
Figura 12.27: Provedor tipo pipe bidirecional	12.19
Figura 12.28: Provedor tipo pipe bidirecional	12.19
Figura 12.29: Esquemático de um microprovedor balístico	12.19
Figura 12.30: Microprovedor móvel em chassi reboque	12.19
Figura 12.31: Princípio da medição de vazão pelo método de tempo de trânsito diferencial	12.21
Figura 12.32: Medidor de 5 canais para transferência de custódia	12.22
Figura 12.33: Medidor de 5 canais para transferência de custódia (cortesia da KROHNE)	12.22
Figura 12.34: Medidor de 3 canais para transferência de custódia (cortesia da KROHNE)	12.22
Figura 12.35: Medidor tipo “clamp on” em “spool” ou carretel	12.22
Figura 12.36: Medidor “clamp on” em um gasoduto (cortesia da SIEMENS)	12.22
Figura 12.37: Medidor de Vazão do tipo “Clamp On”	12.22
Figura 12.38: Princípio de operação dos medidores mássicos Coriolis	12.23
Figura 12.39: Densímetro em linha tipo tubo reto vibrante (cortesia EMERSON CONTROL)	12.24
Figura 12.40: Princípio de operação densímetro tubo “U” vibrante	12.24
Figura 12.41: Sensor Pt100 a 3 fios em circuito com ponto de Wheatstone	12.25
Figura 12.42: Visão de um sensor/transmissor de temperatura com termo resistência Pt100	12.25
Figura 12.43: Termo par	12.26
Figura 12.44: Medidor tipo Bóia e Mola	12.27
Figura 12.45: Medidor do tipo HTG	12.27
Figura 12.46: Medidor tipo servo assistido com deslocador	12.27

Figura 12.47: Medidor tipo radar	12.27
Figura 12.48: Malha de controle fechada com realimentação negativa	12.30
Figura 12.49: Representação com a simbologia da ISA de uma malha fechada	12.30
Figura 12.50: Malha de controle multivariável com limites cruzados aplicada na descarga de bombas	12.32
Figura 12.51: Malha de controle multivariável com limites cruzados na entrada de uma base de um poliduto	12.33
Figura 12.52: Curvas inerentes e efetivas típicas de válvulas de controle	12.34
Figura 12.53: Curva da Vena Contracta	12.34
Figura 12.54: Válvula Globo	12.36
Figura 12.55: Válvula Globo balanceada de sede dupla	12.36
Figura 12.56: Válvula Borboleta	12.36
Figura 12.57: Válvula de controle de fluxo axial Multijato	12.36
Figura 12.58: Representação esquemática de um CLP	12.38
Figura 12.59: Exemplo de linhas de programação Ladder	12.38
Figura 12.60: Simbologia utilizada na programação LADDER	12.38
Figura 12.61: Rede de CLP's	12.39
Figura 12.62: Vista de um bastidor com um CLP	12.39
Figura 12.63: Estrutura típica de um sistema SCADA	12.41
Figura 12.64: Estrutura básica do sistema SCADA da Unidade de Negócios de Oleodutos	12.42
Figura 12.65: Fluxograma simplificado das funções desempenhadas por um sistema SCADA	12.46
Figura 12.66: Esquemático do sistema SCADA da TRANSPETRO ressaltando o sistema FEP	12.47
Figura 12.67: Esquema que ilustra a transmissão por exceção	12.49
Figura 12.68: Ilustração da aplicação da rede de campo	12.49
Figura 12.69: Arquitetura do software de um sistema SCADA	12.51
Figura 13.1: Ciclo esquemático da produção e corrosão do aço	13.1
Figura 13.2: Representação esquemática da corrosão do aço em solo neutro aerado	13.2
Figura 13.3: Fatores que influenciam no mecanismo de corrosão	13.2
Figura 13.4: Corrosão eletrolítica causada pela fuga de corrente proveniente de estrada de ferro ou metrô	13.5
Figura 13.5: Exemplo de duto revestido com proteção catódica	13.5
Figura 13.6: Medição do potencial natural tubo-solo	13.6
Figura 13.7: Medição do potencial natural tubo-solo em ponto de teste	13.6
Figura 13.8: A corrosão eletroquímica de um duto sem revestimento	13.7
Figura 13.9: A corrosão eletroquímica de um duto revestido	13.8
Figura 13.10: A experiência de Sir Humprey David	13.9
Figura 13.11: A proteção anticorrosiva de um duto terrestre ou submarino	13.9
Figura 13.12: Exemplo de anodo de zinco com formato cilíndrico, diâmetro 50 mm e comprimento 1200 mm	13.10
Figura 13.13: Posicionamento do anodo de zinco	13.10
Figura 13.14: Posicionamento do anodo de zinco – corte AA da Figura 13.13	13.11
Figura 13.15: Circulação da corrente de proteção catódica	13.11
Figura 13.16: Polarização do duto com proteção catódica	13.12
Figura 13.17: Sistema de proteção catódica por corrente galvânica	13.13
Figura 13.18: Sistema de proteção catódica por corrente impressa	13.14
Figura 13.19: Corrosão localizada severa na parede interna do duto	13.16
Figura 14.1: Desenho esquemático de um lançador de pig	14.1
Figura 14.2: Tipos de pigs de limpeza e garantia de fluxo. (a) pigs espuma; (b) pigs raspadores; (c) flexpig; (d) pig esferas; (e) pig de limpeza magnética.	14.3
Figura 14.3: Pig de placa calibradora. A seta aponta o local onde a placa calibradora ficou deformada, indicando problema geométrico no duto	14.4
Figura 14.4: Pig geométrico. (a) representação de um pig geométrico no interior do duto. A seta indica a posição dos sensores geométricos; (b) registro gráfico do perímetro no local de uma mocha, obtido através da análise dos dados do pig geométrico; (c) verificação da mocha indicada pelo pig geométrico	14.5
Figura 14.5: Pig magnético MFL; (a) módulo de baterias; (b) juntas universais; (c) módulo de eletrônica; (d) módulo sensor; (e) módulo discriminador; (f) odômetros	14.6
Figura 14.6: Método MFL; (a) ímãs; (b) barra de aço no interior do pig, para fechamento do campo magnético; (c) escovas para acoplamento magnético; (d) parede do duto; (e) sensores Hall; (f) defeito gerador de campo de fuga; (g) representação do campo de fuga; (h) representação do módulo sensor MFL completo	14.7

Figura 14.7: Funcionamento de um sensor discriminador. Um pequeno ímã magnetiza a superfície interna; (a) caso não haja defeitos internos o fluxo será intenso; (b) na presença de corrosão interna o fluxo magnético diminui, sendo esta queda detectada pelo sensor	14.8
Figura 14.8: (a) registro de corrosão fornecido por um pig MFL, a partir dos sensores Hall principais; (b) foto dos alvéolos que deram origem ao registro. A seta (c) indica o sentido de deslocamento do pig	14.8
Figura 14.9: Método da coluna d'água; (a) transdutor de ultra-som; (b) distância fixa de líquido – percurso de água; (c) espessura do tubo; (d) representação dos sinais de ultra-som no osciloscópio; (e) sinal de emissão gerado pelo transdutor; (f) tempo relativo ao percurso na água; (g) eco da superfície interna; (h) eco da superfície externa; (i) ecos múltiplos da superfície externa	14.11
Figura 14.10: Pig de ultra-som pronto para ser lançado no duto. A seta indica o módulo sensor onde são montados os transdutores de ultra-som. O perfil do suporte dos sensores garante a distância constante em relação à superfície interna do duto. Os outros módulos transportam a eletrônica de controle e registro, bem como as baterias	14.11
Figura 14.11: Registro típico de um pig de ultra-som; a) imagem da superfície interna do duto; b) imagem obtida a partir dos valores de espessura; c) dois alvéolos de corrosão externa; d) imagem da seção do defeito selecionado pela ação do mouse	14.13
Figura 14.12: Pig palito; (a) o método consiste no controle preciso de hastes, que permanecem em contato direto com a superfície do duto. A foto mostra uma simulação, na qual o sensor mede uma corrosão usinada em disco rotativo. (b) pig palito de 16 polegadas, com 180 palitos, pronto para ser lançado no duto	14.14
Figura 14.13: Esquema básico de um pig de bloqueio. No caso de gasodutos, um colchão de líquido é utilizado para deslocar o pig até o local de bloqueio	14.15
Figura 14.14: Registro típico de um pig de perfilagem. As linhas indicadas pela seta (1) são registros de temperatura. A seta (2) indica um sensor de vibração longitudinal. A seta (3) indica um sensor de vibração no sentido radial. O eixo horizontal do gráfico representa o comprimento do duto. O eixo vertical é a grandeza de cada sensor, digitalizada pelo sistema eletrônico do pig de perfilagem	14.16
Figura 14.15: Exemplo de folha de escavação com os dados necessários para a localização precisa da descontinuidade	14.17
Figura 14.16: Exemplificação das definições de regiões de ECDA	14.20
Figura 15.1: Danos e mecanismos de danos em dutos e procedimentos para sua detecção, acompanhamento e inibição	15.4
Figura 15.2: Exemplo de defeitos de corrosão tipo alvéolos existentes na superfície de um duto e projetados segundo um corte longitudinal	15.4
Figura 15.3: Atributos ou causas de falhas em dutos e procedimentos de prevenção segundo Muhlbauer	15.6
Figura 15.4: Fluxogramas ilustrando procedimentos para gerenciamento da integridade de dutos segundo: (a) API 1160 [8] e (b) ASME B31.8S	15.7
Figura 15.5: Restrições a deslocamentos e solicitações em dutos enterrados	15.8
Figura 15.6: Vão livre de duto: P = força de ancoragem causada pela restrição que o solo oferece ao deslocamento do duto; P_{cr} = força compressiva necessária para provocar flambagem no comprimento livre L do duto; L = comprimento livre do duto, entre restrições do terreno; E = módulo de elasticidade; C = condições de ancoramento do duto no terreno nas extremidades do comprimento livre: $C = 4, 2, 1, 1/4$.	15.9
Figura 15.7: Duto acomodado ao terreno (a); duto sofrendo movimento do solo (b)	15.10
Figura 15.8: Geometria da moosa longitudinal idealizada por Francis-Liu	15.12
Figura 15.9: Força de indentação variando com a profundidade de indentação adimensional para um duto construído com aço API 5L X52, diâmetro $D=24''=609,6$ mm, espessura $t=6,35$ mm e comprimento de indentador $L = 20$ mm para pressões internas iguais a 0; 2,0 e 5,0 MPa.	15.13
Figura 15.10: Curvas força-deslocamento do indentador para a formação de mossa transversais ao eixo de um tubo de aço com resistência ao escoamento 0.2% igual a 380 MPa, com diâmetro de 76 mm e espessura de parede 2.0 mm	15.13
Figura 15.11: Resistência contra a perfuração: cálculos feitos para um duto com diâmetro 24'', espessura 6,35 mm e aço API 5L X52 em função do perímetro de contato da ferramenta com o tubo, $L_t = (L_d + w_d)$	15.15
Figura 15.12: Gráficos de vida à fadiga para espécimes não soldados, segundo a API 579-1/ASME FFS-1, curva cheia, e soldados (classe 100 da API 579 - 2001), equação (15.38). A equação (15.37) mostrada no gráfico pela linha tracejada espessa está próxima da linha para espécimes não soldados. A curva para espécimes soldados é construída para espécimes com detalhes de soldagem da classe 100. Ela leva em consideração as tensões médias e o acabamento relativo à soldagem.	15.16
Figura 15.13: Comparação entre curvas de fadiga para dutos	15.17
Figura 15.14: Duto com defeito de corrosão (perda de metal) na sua parede externa	15.18

Figura 15.15: Fluxograma do procedimento de cálculo segundo a ASME B31G	15.21
Figura 15.16: Razões de pressões e de espessuras para tubos com corrosão variando com o tempo	15.22
Figura 15.17: Mossa em um tubo. H é a profundidade genérica da mossa. H_p é a profundidade máxima da mossa durante a indentação. H_r é a profundidade da mossa após a retirada do indentador, mantida a pressão interna. H_o é a profundidade da mossa após a retirada do indentador e o alívio da pressão interna.	15.23
Figura 15.18: Tubo com enrugamento	15.29
Figura 15.19: Verificação da necessidade de reparo	15.30
Figura 15.20: Esboço do processo de retirada de um defeito superficial na parede externa do tubo (a) por esmerilhamento, gerando perda de espessura metálica que deverá ser tratada como dano por corrosão	15.31
Figura 15.21: Reparo usando enchimento por solda	15.32
Figura 15.22: Reparo usando luvas metálicas	15.32
Figura 15.23: Dois tipos diferentes de reparos usando camadas de materiais compostos	15.33
Figura 15.24: Dois exemplos de braçadeiras bi-partidas	15.33
Figura 15.25: Reparo por troca de segmento de duto danificado, em fluxo, pelo método de trepanação, tamponamento, desvio e substituição (Catálogo 70-219-04-00 TDW Services, Inco., www.tdwilliamson.com – Typical Sopple Line Procedure).	15.34
Figura 16.1: Batimetria ao longo da rota de um duto submarino (cortesia PETROBRAS/ENGENHARIA/IEEPT)	16.4
Figura 16.2: Movimentos de solo imprevistos causando acidentes catastróficos	16.5
Figura 16.3: Área congestionada por dutos e cabos próxima a uma plataforma	16.6
Figura 16.4: Corredor para dutos submarinos	16.8
Figura 16.5: Forças em duto submetido à pressão interna	16.8
Figura 16.6: Duto colapsado em laboratório (cortesia PETROBRAS/CENPES/TMEC)	16.9
Figura 16.7: Diversos tipos de <i>Buckle Arrestors</i> .	16.10
Figura 16.8: Forças atuantes em duto submarino	16.11
Figura 16.9: Diversas posições do duto no solo marinho sob a ação de vórtices	16.12
Figura 16.10: Efeitos da expansão térmica horizontal e vertical em um duto submarino	16.13
Figura 16.11: Tubos revestidos com Polietileno e Polipropileno em 3 camadas (cortesia da SOCOTHERM BRASIL).	16.14
Figura 16.12: Tubos revestidos com concreto (cortesia da SOCOTHERM BRASIL).	16.15
Figura 16.13: Tubo com revestimento térmico de polipropileno sintático (cortesia da SOCOTHERM BRASIL)	16.16
Figura 16.14: Tubos do tipo Pipe-in-Pipe (cortesia PETROBRAS/ENGENHARIA/IEEPT)	16.17
Figura 16.15: Esquema do método <i>S-Lay</i> para instalação de dutos e modelo de <i>stinger</i>	16.19
Figura 16.16: Balsa (BGL-1) para instalação de dutos pelo método <i>S-Lay</i> (cortesia da PETROBRAS/ENGENHARIA/IEEPT)	16.19
Figura 16.17: Embarcação (<i>Castoro Sei</i>) para instalação de dutos pelo método <i>S-Lay</i> (cortesia da SAIPEM)	16.19
Figura 16.18: Esquema do método <i>J-Lay</i> para instalação de dutos	16.21
Figura 16.19: Embarcações (<i>Saipem-7000 e FDS</i>) para instalação de dutos pelo método <i>J-Lay</i> (cortesia da SAIPEM).	16.21
Figura 16.20: Esquema do método <i>Reel</i> para instalação de dutos e ciclo de deformação típico	16.22
Figura 16.21: Embarcação (<i>Deep Blue</i>) para instalação de dutos pelo método <i>Reel</i> (cortesia da TECHNIP)	16.23
Figura 16.22: Instalação de dutos pelo método arraste, pelo fundo, sem bóias	16.24
Figura 16.23: Instalação de dutos pelo método arraste, pelo fundo, com bóias	16.24
Figura 16.24: Arraste de duto afastado do fundo	16.25
Figura 16.25: Arraste de duto pelo método CDTM	16.25
Figura 16.26 Arraste de duto na superfície, com bóias	16.25
Figura 17.1: Evolução da profundidade de exploração de petróleo no Brasil	17.1
Figura 17.2: Tipos de unidades de produção e layout de campo	17.2
Figura 17.3: Típica estrutura flexível (Rough Bore)	17.3
Figura 17.4: Perfil da carcaça e forma de travamento	17.3
Figura 17.5: Tipos de colapso de um duto flexível	17.4
Figura 17.6: Armadura de pressão (Perfil Zeta e Teta)	17.5
Figura 17.7: Perfil do fio chato das armaduras de tração	17.7
Figura 17.8: Dano das armaduras devido à gaiola de passarinho	17.8

Figura 17.9: Seção transversal típica de um umbilical, ISU e IPB	17.10
Figura 17.10: Riser flexível para altas pressões e armadura de pressão no perfil Teta (aplicação dinâmica)	17.11
Figura 17.11: Definição dos casos dinâmicos para a análise do riser (FPSO)	17.12
Figura 17.12: Arranjo esquemático de um riser em configuração free-hanging	17.13
Figura 17.13: Movimentos de uma embarcação (RAOs)	17.15
Figura 17.14: Enrijecedor de extremidade do riser	17.17
Figura 17.15: Análise de Fadiga	17.17
Figura 17.16: Fluxograma do projeto do riser flexível	17.18
Figura 17.17: Catenária do riser durante instalação e operação	17.19
Figura 17.18: Possíveis configurações de riser	17.20
Figura 17.19: Fluxograma do projeto do flowline flexível	17.21
Figura 17.20: Figura esquemática de uma máquina Espiraladora	17.22
Figura 17.21: Cabeça de extrusão e resfriamento da camada	17.23
Figura 17.22: Figura esquemática de uma máquina extrusora	17.23
Figura 17.23: Figura esquemática de uma máquina de espiralagem	17.24
Figura 17.24: Figura esquemática de uma máquina de armagem	17.24
Figura 17.25: Foto de uma máquina de armagem	17.25
Figura 17.26: Operação de transferência do duto flexível (cesta de armazenamento)	17.26
Figura 17.27: Cesta de um navio de lançamento e bobinas no convés do navio	17.27
Figura 17.28: Tensionadores de três e quatro lagartas e roda para passagem do duto	17.27
Figura 17.29: Seqüência de instalação com primeira extremidade no poço/ manifold	17.28
Figura 17.30: Seqüência de instalação com primeira extremidade na unidade flutuante	17.29
Figura 17.31: Módulo de conexão e duto com restritor de curvaturas e lançamento de um ROV	17.30
Figura 17.32: Operação de pré-condicionamento do duto	17.30

APRESENTAÇÃO (1)

É com enorme prazer que a Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas – ABCM – apresenta à comunidade científica e tecnológica do Brasil este livro sobre Engenharia de Dutos, produzido em parceria com a TRANSPETRO.

O Prof. José Luiz F. Freire, organizador da obra, realizou excelente trabalho, juntamente com os demais autores, aproveitando a formação e a experiência acumulada de todos os participantes. Deve-se ressaltar que esta publicação trata de uma área de importância fundamental para o avanço de tecnologias de ponta, com ampla repercussão na engenharia brasileira naquilo que se refere ao transporte de óleo e gás.

O livro, de caráter didático, tem por finalidade principal servir de referência a estudantes e a profissionais de engenharia, permitindo-lhes colher informações seguras, levando-os a uma prática profissional atualizada em engenharia de dutos.

A ABCM é grata à TRANSPETRO, cujo apoio foi determinante para a realização deste trabalho. Exemplos dessa natureza devem ser buscados com insistência, uma vez que caracterizam parcerias de sucesso entre a academia e a indústria brasileira.

Valder Steffen Jr
Presidente da ABCM (biênio 2008/2009)

APRESENTAÇÃO (2)

A elaboração do livro sobre Engenharia de Dutos foi proposta e entusiasticamente levada à frente pelo visionário Eng. Marcelino Guedes. A proposição foi logo apoiada por engenheiros da Petrobras e da Transpetro, e por professores do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. A Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, ABCM, de imediato prontificou-se a editar o livro. Como se trata de uma associação de engenharia e ciências, enquadram-se em suas missões a promoção, o desenvolvimento, e a difusão de conhecimento científico e tecnológico, nas áreas de Engenharia e Ciências Mecânicas.

Coube a mim, como professor do Curso de Engenharia de Dutos da PUC-Rio e membro da ABCM, executar a tarefa. Desde o início, persegui a meta de organizar um livro-texto, com 400 a 500 páginas, que proporcionasse uma visão ampla do estado da arte para atender aos iniciantes, e ao mesmo tempo fosse útil aos especialistas na área. Para os primeiros, o material é mais do que suficiente para um começo, com forte embasamento em conceitos teóricos já testados pelas aplicações práticas. Para os especialistas, uma ou outra citação ou informação, por menor que seja, abrirá um ponto para debate e discussão, o qual, unido ao conhecimento prévio, lhes será útil no encaminhamento e aperfeiçoamento das soluções dos seus problemas específicos.

Com este propósito, solicitei a vários especialistas que enviassem listas de capítulos e assuntos que cobrissem o tema em questão. Sou grato a todos. A partir das listas recebidas, preparei a sequência dos 18 capítulos que hoje compõem o livro. Para cada um deles convidei engenheiros com notório saber em suas áreas e respeitados por seus pares, os quais viveram ou vivem a prática do dia a dia de seus campos de conhecimento.

É por estes autores que começo a minha lista de agradecimentos. Por experiência própria, sei que cada um trabalhou muito mais do que qualquer um de nós poderia imaginar. Descobrimos que escrever sobre aquilo que sabemos e convivemos no dia a dia é empreitada árdua e penosa. Formalizar o saber por meio de palavras exatas, quando este versa sobre várias opções de boas e ótimas soluções, não constitui tarefa fácil. Assim, por sua colaboração, competência e disponibilidade para partilhar com a comunidade de dutos os seus conhecimentos, meu muitíssimo obrigado.

Estendo meu reconhecimento e meus agradecimentos a todos aqueles que exerceram papéis importantes para que o livro fosse concluído. Assim, meu muito obrigado à Ana Lucia Froés de Souza, da ABCM, pelo apoio logístico; ao Carlúcio Souza e ao mestrando Guillermo Jordan, pela dedicação e trabalho na edição de um dos capítulos; à Márcia Magalhães, pela organização do *site* do livro; à Eliane Correia da Rocha, pelo projeto da capa, pelas informações técnicas sobre edição e publicação e pelos orçamentos levantados entre as gráficas, e às diligentes, competentes, e muitas vezes pacientes revisoras de Português: Anna Maria Moura Costa de Castro Santos, Valéria Gomes Lopes e Natércia Rossi. Faço um agradecimento especial ao Eng. Leonardo Dantas Rodrigues, pelas muitas horas trabalhadas na uniformização da edição, incluindo a distribuição de marcadores, parágrafos, figuras, citações, digitação de não poucas equações, e compatibilização de conversões, nem sempre fáceis, de textos escritos em diferentes *softwares*.

Agradeço também às instituições e empresas que tornaram este livro possível: a Transpetro e a ABCM, que o produziram sob termos especificados no Convênio 4600004255; o DEM da PUC-Rio, que cedeu pessoal e recursos materiais; a Gráfica Barbieri, pelo interesse e competência na impressão do livro, o IBP e o CTDUT, Instituto Brasileiro do Petróleo, Gás e Biocombustíveis e Centro de Tecnologia em Dutos, pelo seu apoio incondicional ao lançamento e divulgação desta edição.

Desejo ainda, nesta apresentação do livro, lembrar que existem outras fontes de informações extremamente úteis a todos que quiserem dedicar-se ao assunto Engenharia de Dutos. Um artigo relevante, recentemente publicado no periódico *Journal of Pipeline Engineering*¹, trata da necessidade da presença de engenheiros na área de Dutos, de treinamento dirigido para estes engenheiros, dos investimentos futuros, além de citar os tópicos que

¹ Hopkins, P. "The Skills Crisis in the Pipeline Sector of the Oil and Gas Business", *The Journal of Pipeline Engineering*, v. 7, n. 3, Third Quarter, 149-172, 2008.

necessitarão de desenvolvimento técnico e científico. Informações técnicas, amplas, profundas e variadas, encontram-se na literatura corrente², e nos Anais de Publicações de diversas conferências sobre dutos, destacando-se aí a Rio Pipeline Conference, promovida pelo IBP e realizada nos anos ímpares no Rio de Janeiro, e a International Pipeline Conference, promovida pela ASME e realizada nos anos pares, na cidade de Calgary.

Por último, em meu nome, dos autores, e de todos que auxiliaram e participaram da sua elaboração, dedico este livro aos antigos e novos alunos do Curso de Engenharia de Dutos da PUC-Rio e a todos aqueles que dele tirarem proveito para sua formação nesta área de ciência e engenharia.

José Luiz de França Freire
Departamento de Engenharia Mecânica
PUC-Rio

² Lista de algumas publicações na área de Engenharia de Dutos

- [1]. Pipeline Design & Construction – A Practical Approach, 3^a ed., M. Mohitpour, H. Golshan, A. Murray, ASME-Press, The American Society for Mechanical Engineers—ASME, Three Park Avenue, New York, NY 10016, 2007.
- [2]. Pipeline Operation & Maintenance – A Practical Approach, 1^a ed., M. Mohitpour, J. Szabo, T. Van Hardeveld, ASME-Press, The American Society for Mechanical Engineers—ASME, Three Park Avenue, New York, NY 10016, 2005.
- [3]. Marine Pipelines – Design and Installation, M.W. Braestrup, J.B. Anderson, L.W. Anderson, M.B. Bryndum, C.J. Christensen, Niels Rishøj, ASME – Blackwell Publishing, 2005.
- [4]. Subsea Pipeline Engineering, A.Palmer, R.A. King, PennWell Corporation, 2^a ed., 2008.
- [5]. Mechanics of Offshore Pipelines vol. 1: Buckling and Collapse, S. Kyriakides, E. Corona, Elsevier, 2007.
- [6]. Energy Supply and Pipeline Transportation: Challenges and Opportunities, ASME Press, The American Society for Mechanical Engineers—ASME, Three Park Avenue, New York, NY 10016, M. Mohitpour, 2008.
- [7]. Pipeline Pumping and Compression Systems: A Practical Approach, M. Mohitpour, k.K. Brotos, T. Van Hardeveld, ASME Press, The American Society for Mechanical Engineers—ASME, Three Park Avenue, New York, NY 10016, 2007.
- [8]. Pipeline System Automation and Control, M. Yoon, C.B. Warren, S. Adam, ASME Press, The American Society for Mechanical Engineers—ASME, Three Park Avenue, New York, NY 10016, 2007.
- [9]. Marine Structural Design, Yong Bai, Elsevier, 2003.
- [10]. Peabody's Control of Pipeline Corrosion, A.W. Peabody, NACE International, 2^a Ed., 2000.
- [11]. Pipeline Risk Management Manual, W.K. Muhlbauer, Gulf Professional Publishing, 3^a Ed., 2004.
- [12]. Pipeline Rules of Thumb Handbook, McAllister, 6th Edition, Gulf Professional Publishing, 2005.
- [13]. Subsea Pipelines and Risers, Yong Bai, Elsevier, 2^a Ed., 2005.

PREFÁCIO

O sistema dutoviário de um país é estratégico por garantir a movimentação de grandes volumes de petróleo e derivados.

Os dutos desempenham papel crucial no dia-a-dia, e muitas vezes não se tem a verdadeira dimensão da importância destes sistemas na sociedade. Olhando em volta é possível comprovar que os dutos estão indiretamente presentes em todas as atividades: nos automóveis, com a gasolina; nos caminhões, locomotivas e embarcações, com o diesel; nos aviões, com o querosene; nas residências, com o gás de cozinha; nas fábricas, com a geração de energia; e nas indústrias, no suprimento de matéria-prima. Duto constitui a forma mais segura e eficiente de transportar os produtos de petróleo; ainda não foi disponibilizada para a sociedade outra forma mais otimizada.

O primeiro duto de petróleo foi construído em 1865, nos Estados Unidos, no estado da Pensilvânia, para substituir o transporte de barris, realizado com utilização de charretes puxadas por mulas. Estima-se que, somente na indústria de petróleo, existam hoje mais de 1.500.000 km de dutos de transporte em operação no mundo. A indústria de dutos movimenta algo próximo a US\$ 60 bilhões por ano apenas em manutenção e construção.

Apesar de todos os avanços em segurança operacional, do desenvolvimento de novas tecnologias e da aplicação de possíveis penalidades e sanções, a sociedade ainda se mostra bastante condescendente com os acidentes causados pela indústria de petróleo e gás no transporte de seus produtos. Normas mais rigorosas, novas regulamentações e maiores demandas por segurança por parte da sociedade com certeza virão. A indústria de dutos não pode ser passiva na busca de soluções mais inovadoras.

Não há mais espaço em nosso planeta para atividades não verdadeiramente comprometidas com a garantia de um ambiente cada vez mais seguro e saudável para a humanidade. A indústria de dutos no mundo permanece uma atividade muito conservadora. Os dutos são construídos com praticamente as mesmas técnicas há 50 anos. Os materiais e os processos de construção e instalação empregados apresentam pouca evolução tecnológica. Os dutos que hoje estão sendo construídos estarão em operação nos próximos 30, 40, talvez 50 anos.

O duto do futuro está sendo concebido hoje, será construído amanhã, e operado nas próximas décadas. A busca por mais eficiência e segurança operacional constitui o objetivo de toda a indústria. Muitas tecnologias básicas já existem para suportar os desafios das operadoras de dutos, mas ainda não encontramos estes conhecimentos aplicados nas instalações atuais. Desta forma, como justificar o fato que ainda não terem sido disponibilizados tubos com coeficiente de atrito mínimo para diminuir o consumo de energia nos sistemas de bombeamento? Como ainda não foram eliminados os processos corrosivos tão presentes nos dutos? Como, apesar de todo o avanço da eletrônica, ainda não existem em atividade sistemas inteligentes, totalmente automatizados para a supervisão e controle? E como ainda não existem sistemas eficientes de detecção de vazamentos? Todos esses desafios tecnológicos estão maduros, e assim é fundamental a busca de soluções que se transformarão em novos processos, novos materiais e novos equipamentos.

Há mais de dez anos, alguns profissionais idealistas e sonhadores, procedentes de diversos países e reunidos no Canadá, criaram a divisão de dutos PSD (Pipeline Systems Division) da ASME International (American Society of Mechanical Engineers). Como ponto de partida foi decidida a organização de uma conferência internacional de dutos, denominada IPC - International Pipeline Conference, sempre na cidade de Calgary, no Canadá, em anos pares. O crescente número de participantes desse evento já ultrapassou 1.500 profissionais, de mais de 35 países. Independente de outras iniciativas importantes, como o PRCI, IPLOCA, PIPE, etc., a formação da PSD representou um dos movimentos mais importantes para viabilizar a formação de uma integrada comunidade internacional de dutos. Muitos resultados concretos já são oriundos dessa iniciativa, como: o próprio IPC; o Offshore Pipeline Forum; incentivos para cursos de dutos em Universidades (como em Newcastle, Calgary e PUC-Rio); o GPA (Global Pipeline Award); diversos tutoriais, workshops e outros. O IPC é verdadeiramente o momento de encontro de especialistas de dutos do mundo todo.

O fenômeno globalização não é recente; encontra-se em curso há séculos e vem sendo cada vez mais fortemente praticado por todos os países. Até a década de 80, por diferentes razões, alguns países ainda estavam fechados, isolados ou mesmo excluídos desse movimento global. Em função de suas inserções, surgem bilhões de novos consumidores, demandando mais alimentos, mais conforto, mais lazer, mais máquinas, mais transporte, mais infra-estrutura, mais energia e, conseqüentemente, muitos novos dutos.

Para atender a toda essa demanda de mais tecnologia e mais dutos, estão sendo criadas novas empresas, são necessários mais fornecedores de equipamentos e materiais, mais prestadores de serviços; portanto, é maior a demanda por profissionais qualificados.

É sabido que uma excelente qualificação profissional é a via prioritária para garantir os objetivos de qualquer indústria; a Comunidade Brasileira de Dutos acredita muito no desenvolvimento de competências. Nos últimos anos muitas iniciativas nesse sentido foram desenvolvidas, tais como: Comissão de Dutos do IBP; PRODUT – Programa Tecnológico de Dutos da Petrobras; Prêmio Petrobras de Tecnologia de Dutos; CTDUT – Centro de Tecnologia em Dutos; Curso de Especialização em Engenharia de Dutos – PUC - Rio; Quem é Quem na Indústria de Dutos no Brasil (ONIP-IBP); RIO PIPELINE – Conference & Exposition (IBP); Participações no IPC – Internacional Pipeline Conference em Calgary; Parcerias com a ASME (American Society of Mechanical Engineers); Participação no PRCI (Pipeline Research Council International); Centro Nacional de Reparos em Dutos – CREDUTO; dentre outras. Como pode ser visto, todos esses programas fazem parte de um processo permanente de disseminação do conhecimento pela indústria de dutos no Brasil. Como resultado desse trabalho, é inquestionável o crescimento do número de artigos técnico-científicos brasileiros publicados em congressos da área.

O Brasil é um país de dimensões continentais; mesmo assim, possui poucos dutos de transporte, quando comparado a outros países. Atualmente, existem nos Estados Unidos mais de 440.000 km de dutos; na Rússia, aproximadamente 300.000 km; no Canadá, 240.000 km; no México, 48.000 km; na Argentina, 29.000 km; e no Brasil, apenas 21.000 km. Alguns fatores contribuíram para a pequena malha brasileira: a concentração histórica da população ao longo da costa e, conseqüentemente, a instalação de refinarias e terminais junto a estes centros; o uso de outros modais de transporte como a cabotagem; a definição estratégica governamental de investimento em hidroelétricas para a geração de energia elétrica; e as reservas de petróleo pelo fato de estarem localizadas junto aos principais centros consumidores. Recentemente, com o desenvolvimento do centro-oeste brasileiro; a maior participação do gás natural na matriz energética nacional; a exploração das novas reservas de petróleo e gás; e o aumento da produção de biocombustíveis em regiões distantes dos mercados consumidores, serão necessários muitos novos dutos. Assim, a indústria de dutos no Brasil viverá nos próximos anos um promissor momento de crescimento com a construção de aproximadamente 10000 km de dutos, movimentando valores no entorno de 10 bilhões de dólares. A demanda atual por mais dutos não é prerrogativa somente do mercado brasileiro, mas também da China, da Índia, da Rússia, do Canadá e dos Estados Unidos. Somente nesses países, aproximadamente 45.000 km de novos dutos terrestres serão construídos nos próximos 5 anos.

Os desafios em relação a dutos não estão localizados somente em terra. Produzir petróleo e gás em águas profundas sempre se mostrou desafio especial. No Brasil, a descoberta de megapoços de petróleo, localizados a grandes profundidades de água e solo e abaixo de camadas de sal, com seis mil metros de profundidade – dos quais dois mil metros de lâmina d'água, dois mil metros de sedimentos e outros dois mil metros de sal –, leva os profissionais de desenvolvimento tecnológico ao delírio total na busca da inovação e da criatividade. O sistema de dutos submarinos representa grande parte desse desafio e será capítulo importante da nova jornada na busca de materiais mais leves, no desenvolvimento de sistemas especiais de lançamento, na fabricação de risers com múltiplos materiais, e na concepção de sistemas automatizados para manutenção e reparos.

Tornou-se evidente a necessidade de conferir melhor uso à larga experiência acumulada ao longo das últimas décadas na construção, operação e manutenção de todos esses dutos no Brasil, bem como a exigência de levar mais longe e partilhar esses conhecimentos em uma duradoura obra, consolidada em um único e simples livro que reunisse as bases necessárias e suficientes a serem utilizadas por estudantes, técnicos, engenheiros, gerentes, e outros profissionais do setor.

A escassez de livros sobre dutos e a completa inexistência de material escrito em português dificultam a formação de novos profissionais. Assim, este livro tem por objetivo auxiliar, como material complementar, o ensino de dutos no Brasil. São 18 capítulos, elaborados por profissionais brasileiros, nos quais são cobertas todas as áreas dessa atividade. Certamente este livro é mais uma contribuição para a disseminação do conhecimento

sobre dutos no Brasil, para a capacitação de novos profissionais e para o fortalecimento da Comunidade Brasileira de Dutos, garantindo assim futuras e promissoras conquistas.

Aos profissionais que escolheram a área de dutos como sua atividade, fica o registro da necessidade de buscar a capacitação e a inovação, de forma permanente. Estejam preparados e disponíveis o tempo todo para aprender. Saber aprender é fundamental. Se possível, participem de seminários, congressos e eventos, como o IPC e o RIO Pipeline. Frequentem cursos de especialização, exposições e feiras, identificando assim referências profissionais. Participem também de associação técnica relacionada com dutos, assinem revistas do setor, e identifiquem fontes de informação para a sua atualização. Dediquem tempo à leitura de trabalhos, revistas técnicas e internet.

E ... tenham este livro sempre à mão.

Marcelino Guedes Ferreira Mosqueira Gomes