COPPE/UFRJ

VERIFICAÇÃO DE CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE DE DUTOS APOIADOS NO LEITO MARINHO

Mauro Henrique Alves de Lima Junior

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Breno Pinheiro Jacob

Rio de Janeiro
Março de 2010

VERIFICAÇÃO DE CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE DE DUTOS APOIADOS NO LEITO MARINHO

Mauro Henrique Alves de Lima Junior

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Breno Pinheiro Jacob, D.Sc.

Prof.ª Beatriz de Souza Leite Pires de Lima, D.Sc.

Dr. Carl Horst Albrecht, D.Sc.

Dr. Carlos de Oliveira Cardoso, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2010

Lima Jr, Mauro Henrique Alves de

Verificação de Critérios de Estabilidade de Dutos Apoiados no Leito Marinho / Mauro Henrique Alves de Lima Junior. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XIX, p 130.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Breno Pinheiro Jacob

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 113-116.

1. Sistemas Offshore. 2. Critérios de Estabilidade. 3. Dutos Submarinos. I. Jacob, Breno Pinheiro. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Titulo.

A minha esposa Bianca,

aos meus pais, Mauro e Luzia,

e aos meus irmãos Danusa e Felipe.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela oportunidade de mais essa encarnação, pela plenitude de condição física e apoio familiar, os quais foram imprescindíveis em toda minha caminhada.

Dedico este trabalho à minha família: meus pais Mauro e Luzia, que sempre incentivaram e investiram na minha educação, tanto moral quanto intelectual; minha esposa Bianca, que esteve ao meu lado durante todo este trajeto e vibrou imensamente com todas as minhas conquistas; meus irmãos Danusa e Felipe, que sempre encheram nossas vidas com muita alegria e companheirismo.

Agradeço ao meu orientador Breno, pela orientação dada à minha formação acadêmica durante quase toda a graduação e, agora, ao meu ensino superior.

Agradeço a todos os meus amigos do LAMCSO, que me ajudaram com dúvidas e incentivaram este trabalho.

Agradeço a CAPES, pelo fundo de amparo concedido durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

VERIFICAÇÃO DE CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE DE DUTOS APOIADOS NO LEITO MARINHO

Mauro Henrique Alves de Lima Junior

Março/2010

Orientador: Breno Pinheiro Jacob

Programa: Engenharia Civil

O principal objetivo desta dissertação é estudar métodos de análise e critérios de verificação de estabilidade de dutos submarinos apoiados no leito marinho, sob ação de carregamentos hidrodinâmicos de onda e correnteza. Neste trabalho são desenvolvidos modelos bidimensionais que auxiliam o cálculo estático da estabilidade. Os métodos de análise e verificação da estabilidade foram implementados em planilha *Mathcad*. As rotinas desenvolvidas foram utilizadas para analisar exemplos reais, cujos resultados foram comparados com os disponíveis na literatura a fim de verificar a consistência e eficiência das rotinas implementadas.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

VERIFICATION OF STABILITY OF CRITERIA OF ON-BOTTOM PIPELINES IN THE SEABED

Mauro Henrique Alves de Lima Junior

March/2010

Advisor: Breno Pinheiro Jacob

Department: Civil Engineering

The main objective of this dissertation is to study and to implement analysis methods and stability verification criteria for underwater pipelines lying on the seabed, under the action of hydrodynamic loads of wave and current. At this work, some two-dimensional models were developed to assist the static calculation of the stability. The analysis methods and stability verification were implemented in Mathcad worksheets. The developed routines were used to analyze real examples and the results were compared with the available ones in the literature in order to verify the consistence and efficiency of the implemented routines.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS XII

ÍNDICE DE TABELAS XV

NOMENCLATURA XVI

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 CONTEXTO 1

1.2 MOTIVAÇÃO 3

1.3 OBJETIVO 4

1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4

1.5 METODOLOGIA 6

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 7

2 DUTOS SUBMARINOS 8

2.1 INTRODUÇÃO 8

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS DUTOS 9

2.3 COMPOSIÇÃO DOS DUTOS 11

3 PROJETO E ANÁLISE DE DUTOS SUBMARINOS 12

3.1 INTRODUÇÃO 12

3.2 PARÂMETROS DE PROJETO 15

3.3 MATERIAL, DIÂMETRO INTERNO E ESPESSURA DE PAREDE 16

3.4 PROTEÇÃO ANTICORROSIVA (CATÓDICA) 17

3.5 DEFINIÇÃO DA ROTA 18

3.6 INTERVENÇÕES NO SOLO 20

3.6.1 Escavação Mecânica 20
3.6.2 Jetting 21
3.6.3 Rock Dumping 22
3.7 Tensões no Duto 23
3.7.1 Tensão Longitudinal 23
3.7.2 Tensão Circunferencial 24
3.7.3 Tensão Devido à Carga Térmica 25
3.8 Análise de Colapso 26
3.9 Análise de Vãos Livres 27
3.10 Estabilidade Hidrodinâmica 29
3.11 Instalação de Dutos Submarinos 30
3.11.1 S-Lay 30
3.11.2 J-Lay 32
3.11.3 Reel Lay 34
4 Interação Solo Duto 36
4.1 Introdução 36
4.2 Direção Axial 37
4.3 Direção Transversal 38
4.3.1 Força de Atrito de Coulomb 38
4.3.2 Força de Resistência Passiva do Solo 39
4.4 Interação Solo-Duto: Sob Carregamentos Cíclicos 42
4.5 Direção Vertical 45
4.5.1 Reação Vertical Ascendente 45
4.5.2 Reação Vertical Descendente 45
4.6 Penetração Inicial 47
4.7 Formação de Trincheiras / Movimentos Cíclicos Verticais 48
4.8 Penetração Devido ao *Piping* 49

4.9 PENETRAÇÃO TOTAL 51

5 ESTABILIDADE DE DUTOS APOIADOS NO SOLO MARINHO 52

5.1 INTRODUÇÃO 52

5.2 RESUMO DOS MÉTODOS E CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE LATERAL 53

5.3 MÉTODO DE ESTABILIDADE ESTÁTICA ABSOLUTA 55

5.4 MÉTODO DE ESTABILIDADE GENERALIZADA 58

5.4.1 DESCRIÇÃO 58

5.4.2 OBTENÇÃO DO PESO REQUERIDO: CURVAS DE PROJETO 59

5.4.3 RECOMENDAÇÕES PARA UTILIZAÇÃO DAS CURVAS DE PROJETO 61

5.4.4 CURVAS DE PROJETO PARA SOLOS ARENOSOS 62

5.4.5 SOLOS ARGILOSOS 65

5.5 ANÁLISE DINÂMICA DE ESTABILIDADE 66

5.6 CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE VERTICAL 67

6 CÁLCULO DAS FORÇAS HIDRODINÂMICAS, CONSIDERANDO A INTERAÇÃO SOLO X DUTO 68

6.1 INTRODUÇÃO 68

6.2 CORRENTE 69

6.3 ONDAS: TEORIA LINEAR DE AIRY 70

6.4 CÁLCULO DAS FORÇAS HIDRODINÂMICAS: FÓRMULA DE MORISON 73

6.4.1 FORMULAÇÃO BÁSICA 73

6.4.2 FATORES DE REDUÇÃO DE CARGA DEVIDO À INTERAÇÃO SOLO-DUTO 75

6.4.3 CÁLCULO DAS FORÇAS HIDRODINÂMICAS ACRESCIDAS DOS FATORES DE REDUÇÃO 78

7 IMPLEMENTAÇÃO 81

7.1 INTRODUÇÃO 81

7.2 MÉTODO DE ESTABILIDADE ESTÁTICA ABSOLUTA 82

7.3 MÉTODO DE ESTABILIDADE GENERALIZADA 84

7.4 CÁLCULO DO PESO SUBMERSO DO DUTO 86

8 ESTUDOS DE CASO 89

8.1 INTRODUÇÃO 89

8.2 DADOS DO PROBLEMA 90

8.3 MÉTODO DE ESTABILIDADE ESTÁTICA ABSOLUTA 91

8.3.1 ANÁLISE COMPARATIVA: AGA X PLANILHA DE CÁLCULO 91

8.3.2 ESTUDOS PARAMÉTRICOS DE SENSIBILIDADE 96

8.4 MÉTODO DE ESTABILIDADE GENERALIZADO 106

9 CONCLUSÃO 110

9.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS 110

9.2 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS 112

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 113

APÊNDICE A: DETALHAMENTO DA PLANILHA DE CÁLCULO: ESTABILIDADE ESTÁTICA ABSOLUTA 117

APÊNDICE B: DETALHAMENTO DA PLANILHA DE CÁLCULO: ESTABILIDADE GENERALIZADA 125

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – RECORDES DE PROFUNDIDADE DE EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO DA PETROBRAS. [1] 1

FIGURA 1.2 – COMPOSIÇÃO DA CAMADA PRÉ-SAL.[2] 2

FIGURA 2.1 – ARRANJO DE DUTOS SUBMARINOS NO LEITO MARINHO. [7] 8

FIGURA 2.2 – ARRANJO TÍPICO DE DUTOS SUBMARINOS.[8] 9

FIGURA 2.3 – ARRANJO TÍPICO DE DUTOS DE IMPORTAÇÃO/INJEÇÃO. [8] 10

FIGURA 2.4 – ARRANJO TÍPICO DE DUTOS DE EXPORTAÇÃO. [9] 10

FIGURA 2.5 – SEÇÃO TRANSVERSAL DO DUTO. [10] 11

FIGURA 3.1 – PROJETO DE DUTOS SUBMARINOS 13

FIGURA 3.2 – ANÁLISE DE DUTOS SUBMARINOS. 14

FIGURA 3.3 – PROTEÇÃO ANTICORROSIVA [12]. 17

FIGURA 3.4 – EXEMPLO DO TRAÇADO DA ROTA DE UM DUTO. [13] 19

FIGURA 3.5 – TÍPICA ESCAVADORA MECÂNICA. [16] 20

FIGURA 3.6 – TÍPICO EQUIPAMENTO DE *JETTING*. [17] 21

FIGURA 3.7 – *ROCK DUMPING*. [11] 22

FIGURA 3.8 – TENSÃO LONGITUDINAL. [11] 23

FIGURA 3.9 – TENSÃO CIRCUNFERENCIAL. [11] 24

FIGURA 3.10 – TENSÃO DEVIDO À CARGA TÉRMICA [11]. 25

FIGURA 3.11 – COLAPSO DE DUTOS SUBMARINOS.[18] 26

FIGURA 3.12 – VÃOS LIVRES. [19] 27

FIGURA 3.13 – VÃO LIVRE. [11] 27

FIGURA 3.14 – DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES. [11] 28

FIGURA 3.15 – CARGAS ATUANTES EM UMA SEÇÃO TÍPICA DE DUTO SUBMARINO. 29

FIGURA 3.16 – CONFIGURAÇÃO S-LAY [7]. 30

FIGURA 3.17 – TÍPICA OPERAÇÃO S-LAY [12]..... 31

FIGURA 3.18 – FORÇAS ATUANTES NO DUTO DURANTE O LANÇAMENTO *S-LAY* [24]..... 31

FIGURA 3.19 – CONFIGURAÇÃO *J-LAY* [7]..... 32

FIGURA 3.20 – FORÇAS ATUANTES NO DUTO DURANTE O LANÇAMENTO J-LAY [24]. 33

FIGURA 3.21 – CONFIGURAÇÃO REEL LAY [24]. 34

FIGURA 3.22 – CHICKASAW (GLOBAL INDUSTRIES) [25]. 35

FIGURA 4.1 – TÍPICAS DEFORMAÇÕES DE SOLO PROVENIENTES DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE INTERAÇÃO SOLO-DUTO [26]. 36

FIGURA 4.2 – RESISTÊNCIA PASSIVA. [3] 39

FIGURA 4.3 – IMAGEM ESQUEMÁTICA DE TÍPICO CARREGAMENTO CÍCLICO ATUANTE EM DUTOS. [4] 42

FIGURA 4.4 – REAÇÃO LATERAL DO SOLO SOB CARREGAMENTOS CÍCLICOS DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO: (A) COMPORTAMENTO GENERALIZADO, COM BASE NA LEI DE ATRITO DE COULOMB E (B) COMPORTAMENTO REAL TÍPICO. [26] 43

FIGURA 4.5 – TRINCHEIRAS [30]..... 48

FIGURA 4.6 – *PIPING* [3]. 49

FIGURA 5.1 – EQUILÍBRIO DE FORÇAS. 55

FIGURA 5.2 – PESO MÍNIMO, $\frac{L_{STABLE}}{(2+M)^2}$, PARA DUTOS EM AREIA 63

FIGURA 5.3 – PESO MÍNIMO, $\frac{L_{10}}{(2+M)^2}$, PARA DUTOS EM AREIA 64

FIGURA 6.1 – CARGAS AMBIENTAIS ATUANTES EM UM DUTO SUBMARINO. [31] 68

FIGURA 6.2 – DESENHO ESQUEMÁTICO DE UMA ONDA REGULAR. 70

FIGURA 6.3 – DIAGRAMA DO PROCESSO ITERATIVO PARA OBTENÇÃO DO NUMERO DE ONDA K 71

FIGURA 6.4 – DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DA PENETRAÇÃO. [3] 76

FIGURA 6.5 – FATOR DE REDUÇÃO DEVIDO À PENETRAÇÃO. [3] 76

FIGURA 6.6 - DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO ENTRINCHEIRAMENTO. [3] 77

FIGURA 6.7 – FATOR DE REDUÇÃO DEVIDO AO ENTRINCHEIRAMENTO. [3] 77

FIGURA 6.8 – GRÁFICO RELATIVO AO COEFICIENTE DE PICO DE CARGA HORIZONTAL. [3] 79

FIGURA 6.9 – GRÁFICO RELATIVO AO COEFICIENTE DE PICO DE CARGA VERTICAL. [3] 80

FIGURA 7.1 – FLUXOGRAMA DA PLANILHA DE CÁLCULO DE ESTABILIDADE ESTÁTICA ABSOLUTA. [4] 83

FIGURA 7.2 – FLUXOGRAMA DA PLANILHA DE CÁLCULO DE ESTABILIDADE GENERALIZADA. [4] 85

FIGURA 7.3 – SEÇÃO TRANSVERSAL DO DUTO [10]..... 86

FIGURA 8.1 – GRÁFICO DO FATOR DE SEGURANÇA HORIZONTAL COM BASE NA VARIAÇÃO DA FASE DA ONDA. 93

FIGURA 8.2 – GRÁFICO DO FATOR DE SEGURANÇA VERTICAL COM BASE NA VARIAÇÃO DA FASE DA ONDA. 94

FIGURA 8.3 – GRÁFICO DO FATOR DE SEGURANÇA VERTICAL (ÂNGULO DE FASE DA ONDA 0^{o}). 95

FIGURA 8.4 – GRÁFICO FATOR DE SEGURANÇA X PESO SUBMERSO DO DUTO. 98

FIGURA 8.5 – GRÁFICO PESO SUBMERSO MÍNIMO X LÂMINA D'ÁGUA. 100

FIGURA 8.6 – GRÁFICO PESO SUBMERSO MÍNIMO X ALTURA DA ONDA DE PROJETO.... 101

FIGURA 8.7 – GRÁFICO PESO SUBMERSO MÍNIMO X PERÍODO DA ONDA DE PROJETO. .. 103

FIGURA 8.8 – GRÁFICO PESO SUBMERSO MÍNIMO X FATOR DE ATRITO DO SOLO. 105

FIGURA 8.9 – GRÁFICO FATOR DE SEGURANÇA X PESO SUBMERSO. 108

FIGURA 8.10 – GRÁFICO FATOR DE SEGURANÇA X ESPESSURA DO REVESTIMENTO DE CONCRETO (COMPARAÇÃO ENTRE AS METODOLOGIAS). 109

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 5.1 - FATOR DE SEGURANÇA: TEMPESTADE DE INVERNO NO MAR DO NORTE. .. 56

TABELA 5.2 - FATOR DE SEGURANÇA: TEMPESTADE DE INVERNO NO GOLFO DO MÉXICO E NO MAR DO SUL. 57

TABELA 5.3 – PESO MÍNIMO, $\frac{L_{STABLE}}{(2+M)^2}$, PARA DUTOS EM AREIA, $K \geq 10$. 62

TABELA 5.4 – PESO MÍNIMO, $\frac{L_{STABLE}}{(2+M)^2}$, PARA DUTOS EM AREIA, $K \leq 5$. 62

TABELA 5.5 – PESO MÍNIMO, $\frac{L_{10}}{(2+M)^2}$, PARA DUTOS EM AREIA..... 63

TABELA 6.1 – RUGOSIDADE DO SOLO DO LEITO MARINHO. [3]..... 69

TABELA 6.2 – COEFICIENTE DE PICO DE CARGA HORIZONTAL. [3] 79

TABELA 6.3 – COEFICIENTE DE PICO DE CARGA VERTICAL. [3] 80

TABELA 8.1 – DADOS DE ENTRADA DO PROBLEMA. 90

TABELA 8.2 – TABELA COMPARATIVA ENTRE OS RESULTADOS DO PRCI (DESTACADOS EM AMARELO) E PLANILHA DE CÁLCULO DE ESTABILIDADE (ESTABILIDADE ESTÁTICA ABSOLUTA). 92

TABELA 8.3 – ESTUDO PARAMÉTRICO: PESO SUBMERSO DO DUTO. 97

TABELA 8.4 – ESTUDO PARAMÉTRICO: LÂMINA D'ÁGUA. 99

TABELA 8.5 – ESTUDO PARAMÉTRICO: ALTURA DA ONDA DE PROJETO. 101

TABELA 8.6 – ESTUDO PARAMÉTRICO: PERÍODO DA ONDA DE PROJETO. 102

TABELA 8.7 – ESTUDO PARAMÉTRICO: FATOR DE ATRITO DO SOLO. 104

TABELA 8.8 – ESTUDO PARAMÉTRICO: PESO SUBMERSO. 107

NOMENCLATURA

Letras Romanas Maiúsculas

A_{lat} - Área Lateral do duto

B - Empuxo do duto por unidade de comprimento

C_a - Coeficiente de massa adicionada

C_D - Coeficiente de Arraste ou *Drag*

C_L - Coeficiente de *Lift*

C_M - Coeficiente de Inércia

D, D_{sp} - Diâmetro externo do duto incluindo os revestimentos

D_{max} - Maior dimensão interna devido à ovalização ou diâmetro externo

D_{min} - Menor dimensão interna devido à ovalização ou diâmetro externo

E - Módulo de Elasticidade Longitudinal

F_{axi} - Resistência axial máxima do solo

F_C - Força de contato vertical solo-duto

F_D - Força de *Drag*

F_I - Força de Inércia

F_{lat} - Resistência Lateral do solo

F_L– Força de *Lift*

F_R – Resistência Passiva do solo

F_μ - Força de Atrito de Coulomb

F_{va} - Reação vertical do solo

F_y- Somatório das forças hidrodinâmicas horizontais (drag + Inércia)

F_Z - Força de *Lift*

G_C - Parâmetro de densidade do solo (argila)

G_S - Parâmetro de densidade do solo (areia)

H - Enterramento referente ao centro do duto

K - Número de Keulegan-Carpenter

L - Peso significativo

L_{stable} - Peso significativo estável

L_Y - Peso significativo requerido

L_{10} - Peso significativo referente ao deslocamento de 10D

$M = \frac{V}{U_s}$ - Relação entre velocidades

$N = \frac{U_s}{g \cdot T_u}$ - Fator de aceleração espectral

N_{qv} , N_{cv} , N_c , N_q , N_γ - Fatores de capacidade de carga

P_e - Pressão externa ao duto

P_i - Pressão interna ao duto

S_g - Gravidade Específico do duto

S_t - Número de *Strouhal*

S_u - Resistência não drenada do solo

T_u - Período de cruzamento zero

U_s - Velocidade oscilatória da onda

U - Velocidade da correnteza

V - Velocidade de correnteza

W_s - Peso submerso do duto por unidade de comprimento

Y - Deslocamento requerido

Letras Romanas Minúsculas

c - Coesão do solo

f_s - Freqüência de *Shedding*

f_y - Tensão de escoamento do duto

f_0 - Ovalização da seção do duto

p_c - Pressão de colapso característica

p_1 , p_2 - Pressões hidrodinâmicas devido ao *piping*

p_{el} - Pressão de colapso elástica

p_p - Pressão de colapso plástica

$r_{perm,z}$ - Fator de redução de carga vertical

$r_{pen,y}$ - Fator de redução de carga devido à penetração (componente horizontal)

$r_{pen,z}$ - Fator de redução de carga devido à penetração (componente vertical)

$r_{tr,y}$ - Fator de redução de carga devido à formação de trincheiras (componente horizontal)

$r_{tr,z}$ - Fator de redução de carga devido à formação de trincheiras (componente vertical)

r_{tot} - Fator total de redução de carga

t - Espessura nominal da parede de aço do duto

w_s - Peso submerso do duto por unidade de comprimento

z_p - Penetração total do duto

z_{pi} - Penetração inicial do duto

z_{pm} - Penetração devido ao movimento do duto

z_{pt} - Penetração equivalente da trincheira

z_t - Profundidade da trincheira

z_{pp} - Penetração devido ao *piping*

Letras Gregas Maiúsculas

ΔT **-** Gradiente da temperatura

Letras Gregas Minúsculas

α - Coeficiente de expansão térmica do material

α_{fab} - Fator de fabricação

γ_s' - Peso específico submerso

γ_s - Peso específico total

γ_{sc} - Fator de segurança horizontal

γ_W - Fator de segurança vertical

θ - Ângulo da parede da trincheira

μ_L , μ_{lat} - Coeficiente de atrito Lateral solo-duto

μ_{axi} - Coeficiente de atrito axial solo-duto

ν **-** Coeficiente de Poisson

ρ_w , ρ_{sw} - Massa específica da água

σ_b - Tensão devido à flexão

σ_{ec} - Tensão devido à extremidade

σ_h - Tensão circunferencial

σ_l - Tensão longitudinal

σ_n - Tensão normal

σ_t - Tensão devido à variação de temperatura

τ - Tensão tangencial

$\tau = \frac{T}{T_u}$ - Número de ondas do estado de mar

φ - Ângulo de atrito

φ_c - Ângulo de atrito da argila

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

Nos últimos anos, a Petrobras[1] tem intensificado suas atividades de perfuração exploratória no território nacional em águas cada vez mais profundas.

Na Figura 1.1, são apresentados os recordes de profundidade de exploração de petróleo atingidos pela Petrobras.

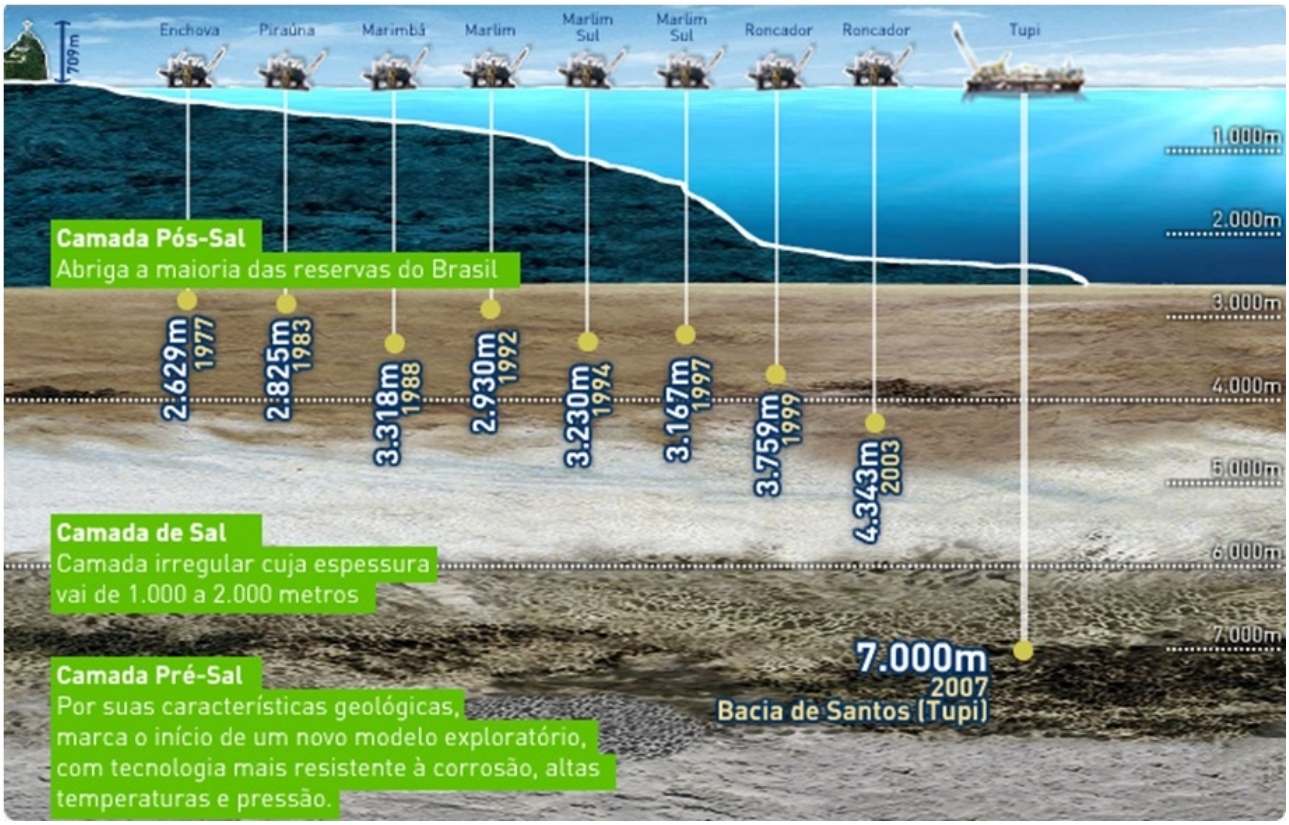


Figura 1.1 – Recordes de profundidade de exploração de petróleo da Petrobras. [1]

O ano de 2007 marcou profundamente a história da exploração de petróleo no Brasil, com a descoberta das reservas de óleo de média e alta qualidade, segundo a escala API[2], na camada Pré-sal. Esta região compreende uma faixa que se estende por 800 km entre os estados do Espírito Santo e Santa Catarina, cujo óleo encontra-se em profundidades de perfuração de mais de 5 mil metros, em lâminas d'água de cerca de 2 mil metros e sob uma camada pré-sal de até 700 metros de espessura, como ilustrado na Figura 1.2.

[1] Empresa líder do setor petrolífero nacional, cujo acionista majoritário é o governo brasileiro.
[2] Escala utilizada para medir a densidade relativa de líquidos.

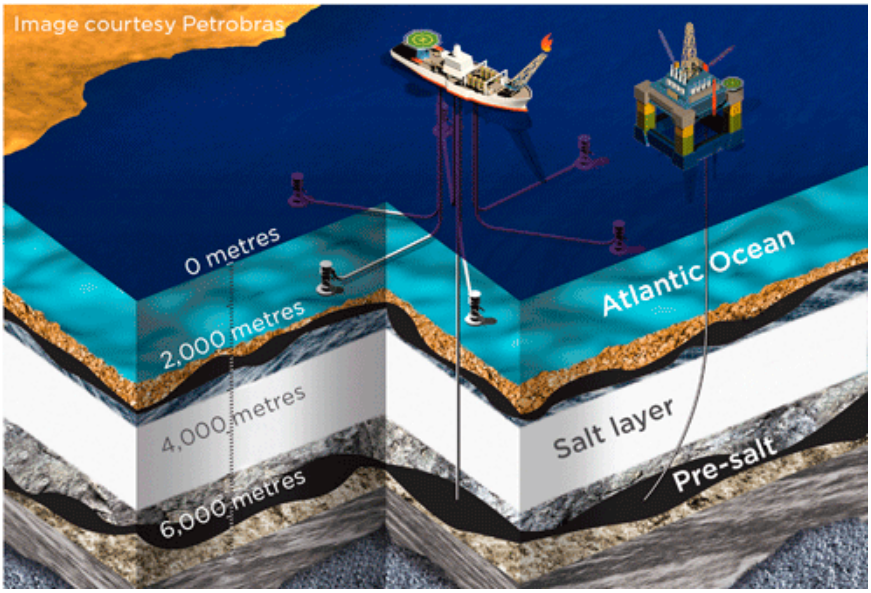


Figura 1.2 – Composição da camada Pré-sal.[2]

Este cenário favorável tem mantido a pesquisa o*ffshore* nacional bastante aquecida, haja visto, a necessidade de desenvolvimento de tecnologias mais eficientes para tornar a exploração em regiões de difícil acesso viável tanto técnica, quanto economicamente.

1.2 MOTIVAÇÃO

A exploração de petróleo em águas cada vez mais profundas tem fomentado uma crescente demanda pela instalação de dutos submarinos, responsáveis pelo escoamento da matéria-prima entre o poço e o continente, e pela interligação entre as plataformas produtoras.

Como não poderia deixar de ser, o sucesso de novas tecnologias provém do aprendizado com os insucessos, que no caso de dutos submarinos podem surgir tanto na fase de instalação quanto na de operação. O alto custo da instalação, recuperação e reparo, associado ao alto risco de danos ambientais, exigem que o dimensionamento de dutos rígidos submarinos seja realizado de forma segura e coerente, minimizando possíveis acidentes.

Um dos possíveis modos de falha de um duto submarino está diretamente ligado a sua estabilidade hidrodinâmica, que pode ser definida como a capacidade do duto permanecer na posição de instalação durante o período de instalação e operação. Dependendo do critério de projeto adotado pode-se admitir a ocorrência de deslocamentos obedecendo às boas práticas de projeto.

Este fato motivou o desenvolvimento de estudo sobre os principais critérios de estabilidade de dutos existentes, cujas recomendações se encontram em DNV-RP-F109 [3] e PRCI[3] [4].

[3] *Pipeline Research Council International* [PRCI 2002]; os métodos ali propostos correspondem a evoluções de metodologias de projeto originalmente estabelecidas pela AGA – *American Gas Association*

1.3 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo analisar os critérios de estabilidade de dutos apoiados no leito marinho através de critérios estáticos[4], para dutos com diferentes diâmetros, sob diferentes coeficientes de atrito solo. Tais metodologias correspondem aos métodos de projeto referidos na norma DNV-RP-F109 [3], os quais apresentam certa equivalência aos métodos propostos pelo PRCI [4].

1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como dito anteriormente, os princípios de engenharia aplicados neste documento norteiam as recomendação de projeto PRCI [4] e DNV-RP-F109 [3], a qual vem substituir a norma DNV-RP-E305 [5].

A norma DNV-RP-E305 [5] não sofria alterações desde outubro de 1988, e apesar de todos esses anos continuou bastante atual, servindo de referência para a indústria offshore. Umas das características mais marcantes desta norma é a sua fácil interpretação.

Os principais objetivos da norma DNV-RP-F109 [3] são:

- Conciliar a abordagem do cálculo de estabilidade de dutos submarinos com a metodologia de projeto de dutos recomendada pela norma DNV-OS-F101 [6];
- Apresentar uma metodologia de projeto para o cálculo de estabilidade com base em fatores de segurança calibrados a fim de assegurar a estabilidade absoluta;
- Ampliar a janela de aplicabilidade de areias e argilas nos *seabeds* permitindo um deslocamento de até 10 vezes o diâmetro do duto;
- Apresentar com mais detalhes os requisitos necessários ao projeto de estabilidade de dutos submarinos com base em análises dinâmicas.

As diferenças mais evidentes entre as recomendações DNV-RP-E305 [5] e DNV-RP-F109 [3] são:

- DNV-RP-E305 [5] considera um deslocamento lateral máximo de 20 D, enquanto a DNV-RP-F109 [3] admite até 10 D;

[4] Os parâmetros de análise não são avaliados ao longo do tempo.

- Ambas apresentam curvas de deslocamento baseadas em análises dinâmicas, porém a DNV-RP-F109 [3] não considera a flexão e a rigidez axial do duto, admitindo que as seções de cálculo estejam muito afastadas das restrições de extremidade.

1.5 METODOLOGIA

Com o intuito de auxiliar o estudo e compreensão dos critérios de estabilidade de dutos, foram implementados em planilha *Mathcad* dois dos três critérios recomendados pela norma DNV-RP-F109 [3], a saber:

i. *"Absolute Lateral Static Stability Method"* ou Estabilidade Estática Absoluta;

ii. *"Generalized Lateral Stability Method"* ou Estabilidade Generalizada.

uma completa descrição dos critérios de estabilidade é apresentada no capítulo 5.

Para atingir os objetivos propostos são realizados estudos comparativos e de sensibilidade através das planilhas *Mathcad* desenvolvidas utilizando dados reais de dutos em ambientes *offshore*.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para atender os objetivos descritos na seção anterior, e de maneira a facilitar a compreensão do leitor, esta dissertação foi estruturada como descrito a seguir:

O capítulo 2 apresenta uma breve descrição dos diferentes tipos de dutos e sua composição.

O capítulo 3 aborda os fundamentos de projeto, análise e instalação de dutos submarinos.

O capítulo 4 aborda os aspectos relativos à interação solo-duto, apresentando uma revisão das principais expressões utilizadas.

O capítulo 5 apresenta os critérios de estabilidade de dutos apoiados no leito marinho, que foram implementados em planilha *Mathcad*.

O capítulo 6 apresenta as formulações utilizadas para o tratamento das cargas ambientais e forças hidrodinâmicas.

O capítulo 7 apresenta uma descrição a respeito das implementações realizadas em planilha *Mathcad*, incluindo as metodologias adotadas e os fluxogramas associados a cada planilha.

No capítulo 8 são apresentados os estudos dos casos analisados, bem como os resultados encontrados.

Finalmente, no capítulo 9 são apresentados os comentários finais e as propostas para os trabalhos futuros.

2 DUTOS SUBMARINOS

2.1 INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, utilizam-se sistemas de dutos para se transportar petróleo e seus derivados entre as regiões produtoras, plataformas, refinarias, parques de estocagem e os centros consumidores de maneira segura e econômica. Os sistemas de dutos submarinos (*offshore pipelines* ou simplesmente *pipelines*) tem sido um dos meios mais eficientes para se transportar fluidos (óleo, gás ou água). A Figura 2.1 apresenta um arranjo típico de dutos submarinos apoiados no leito marinho.

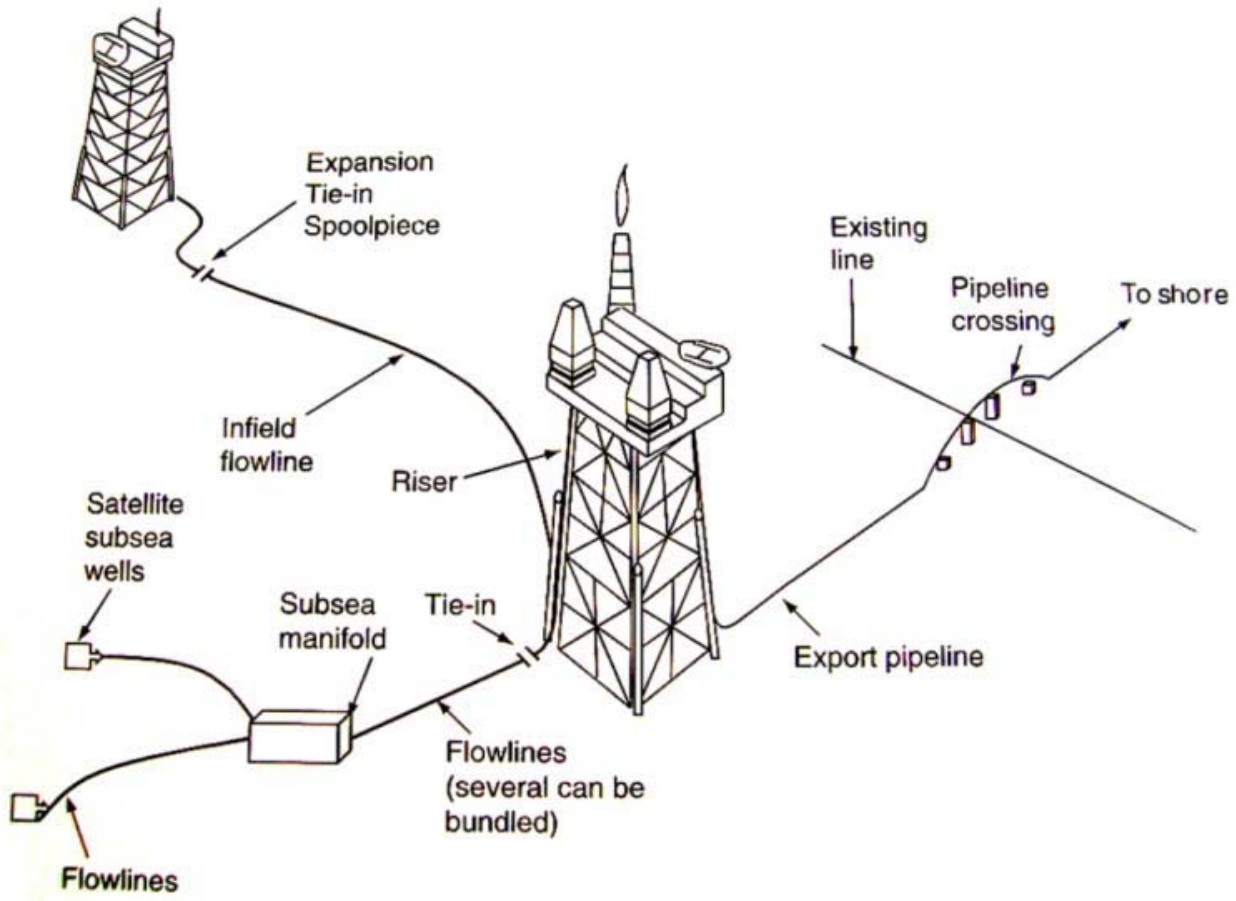


Figura 2.1 – Arranjo de dutos submarinos no leito marinho. [7]

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS DUTOS

De acordo com sua função, os dutos submarinos podem ser classificados da seguinte forma:

- *Flowlines* ou simplesmente Dutos Submarinos – transportam fluidos (água, óleo ou gás) a grandes distâncias horizontais; transportam óleo e/ou gás dos poços até os *manifolds*; transportam água e outras substâncias das plataformas de produção, através de *manifolds* de injeção, até a cabeça de poços de injeção;

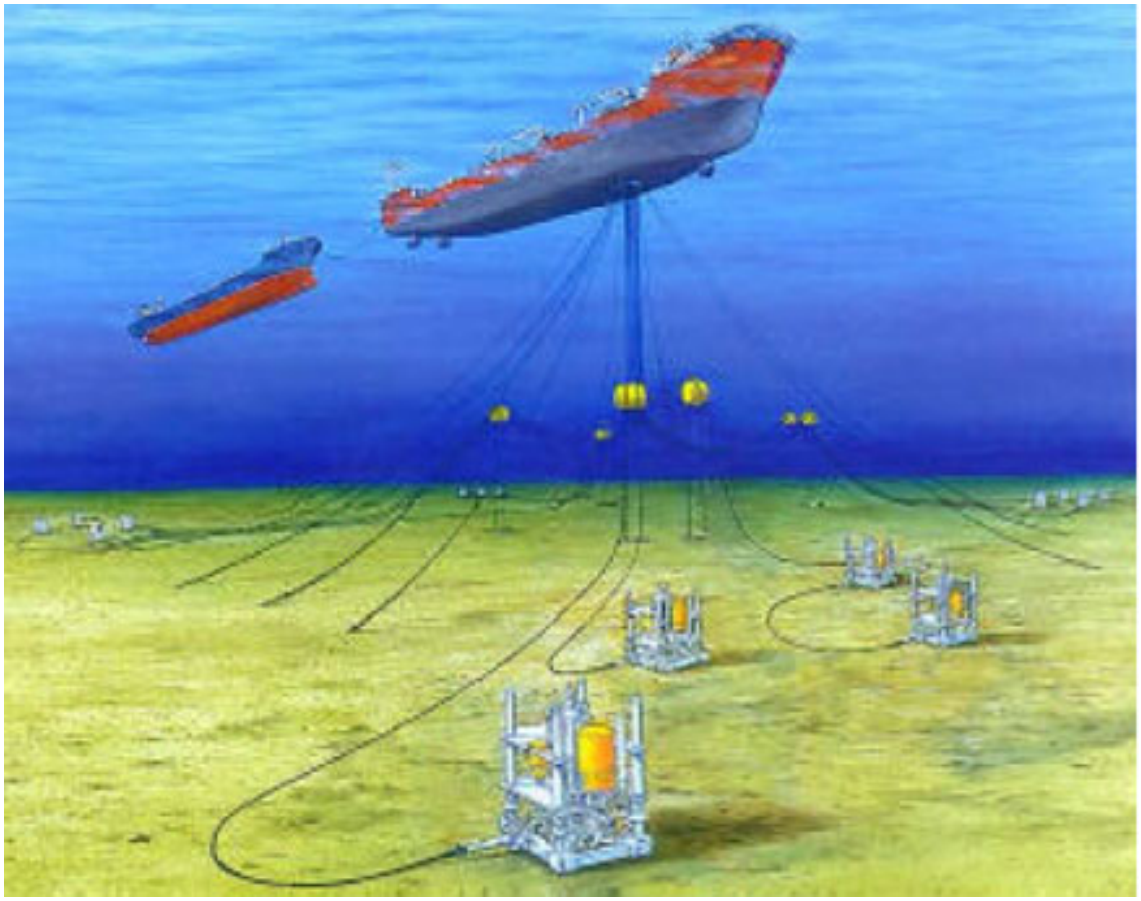


Figura 2.2 – Arranjo típico de dutos submarinos.[8]

- *Infield Flowline* ou Dutos de Importação/Injeção - transportam óleo e/ou gás entre plataformas;

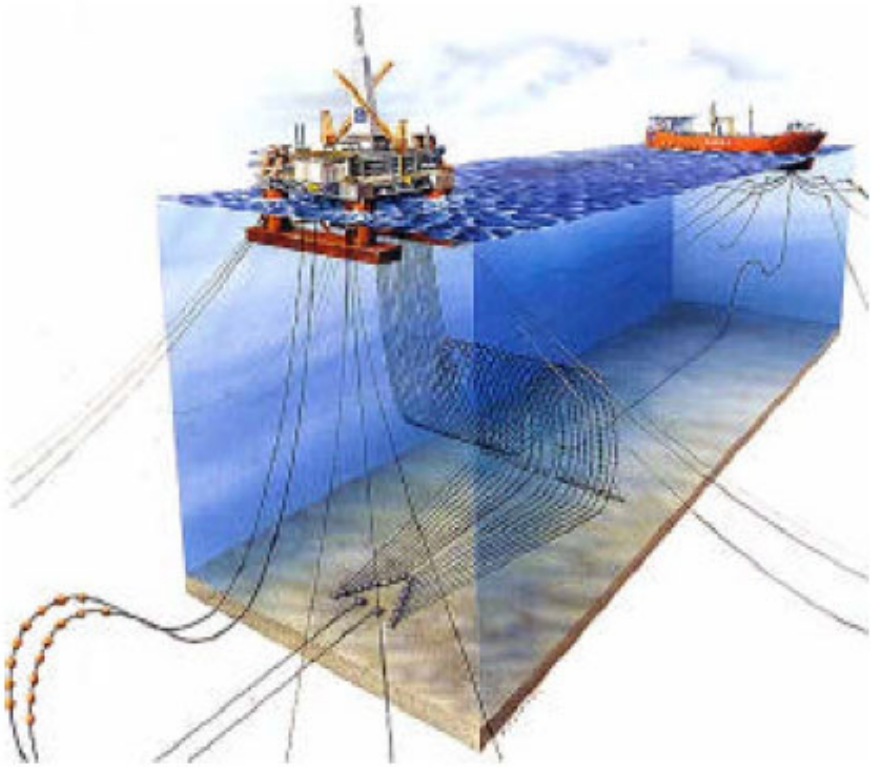


Figura 2.3 – Arranjo típico de dutos de importação/injeção. [8]

- *Export Pipelines* ou Dutos de Exportação - transportam óleo e/ou gás das plataformas de produção até a costa.

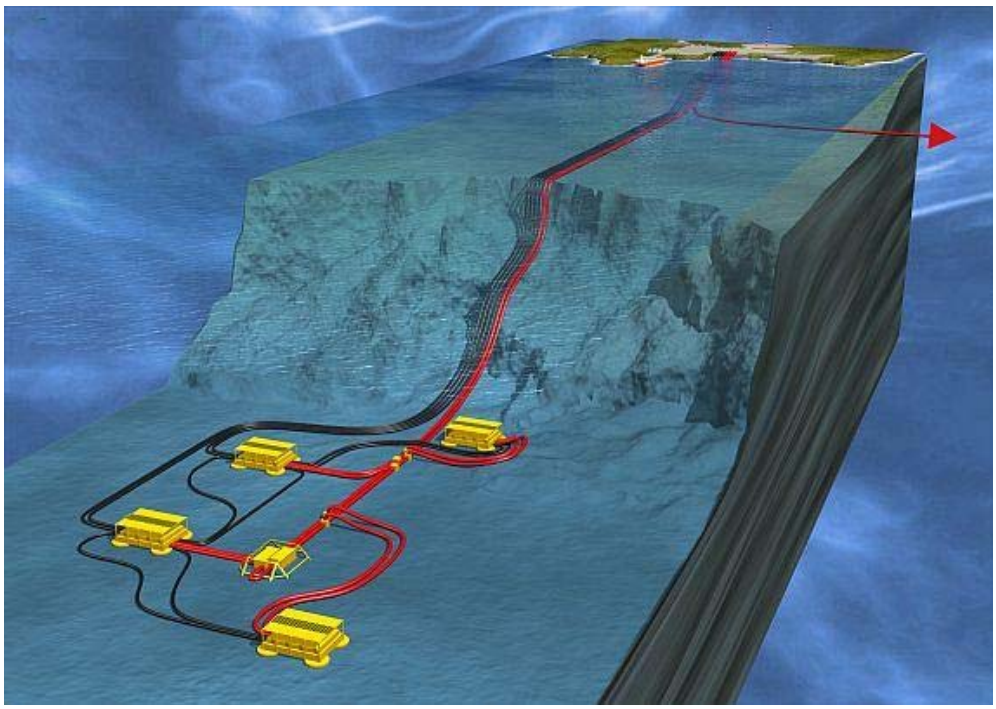


Figura 2.4 – Arranjo típico de Dutos de Exportação. [9]

2.3 COMPOSIÇÃO DOS DUTOS

Dutos submarinos são geralmente fabricados em aço e podem ser envolvidos por camadas de outros materiais a fim de lhe conferir as propriedades descritas abaixo.

i. Revestimento de Aço: sua função é conferir resistência a tubulação, principalmente durante a fase de operação. Quando dimensionado de forma correta evita a flambagem e o colapso progressivo;

ii. Revestimento anticorrosivo interno: sua função é conferir proteção contra corrosão interna durante toda vida útil do duto;

iii. Revestimento anticorrosivo externo: sua função é conferir proteção contra corrosão externa durante toda vida útil do duto. Pode ser auxiliado por uma proteção catódica através de anodos de sacrifício, como apresentado no item 3.4;

iv. Revestimento isolante: sua função é conferir proteção térmica durante toda vida útil do duto;

v. Revestimento de concreto: sua função é conferir lastro ao duto, evitando sua flutuação aumentando a estabilidade;

vi. Área interna: região onde efetivamente ocorre o transporte de óleo, gás e etc.

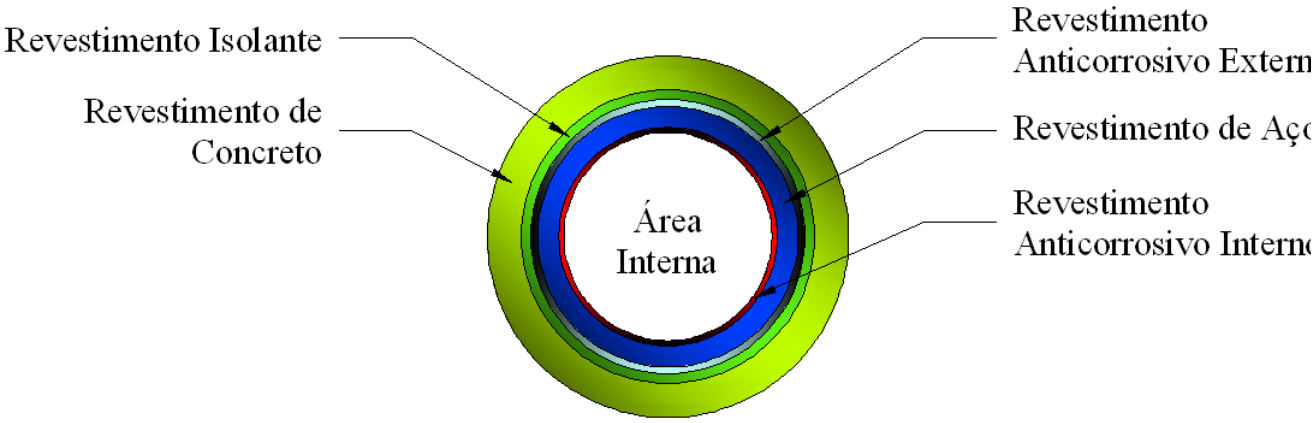


Figura 2.5 – Seção Transversal do Duto. [10]

3 PROJETO E ANÁLISE DE DUTOS SUBMARINOS

3.1 INTRODUÇÃO

O projeto de dutos submarinos objetiva determinar, com base em dados operacionais, os parâmetros de dimensionamento do duto. Dentre os quais destacam-se:

- Diâmetro interno;
- Material e espessura da parede;
- Tipo de recobrimento;
- Material e espessura de recobrimento.

O processo de otimização das dimensões de um duto é interativo e envolve atividades como:

- Pré-dimensionamento de acordo com recomendações técnicas;
- Verificação do comportamento global da estrutura;
- Simulação das condições de operação;
- Identificação e localização de possíveis problemas;
- Verificação das premissas de projeto;
- Verificar a viabilidade técnica para execução dos procedimentos estabelecidos.

O projeto e análise de dimensionamento de dutos submarinos é composto por várias etapas, esquematicamente ilustradas nas figuras 3.1 e 3.2, as quais serão comentadas de forma bastante sucinta a seguir.

É importante apresentar uma visão geral do dimensionamento de dutos, uma vez que a análise de estabilidade hidrodinâmica, objeto principal da presente dissertação, configura uma etapa essencial do processo.

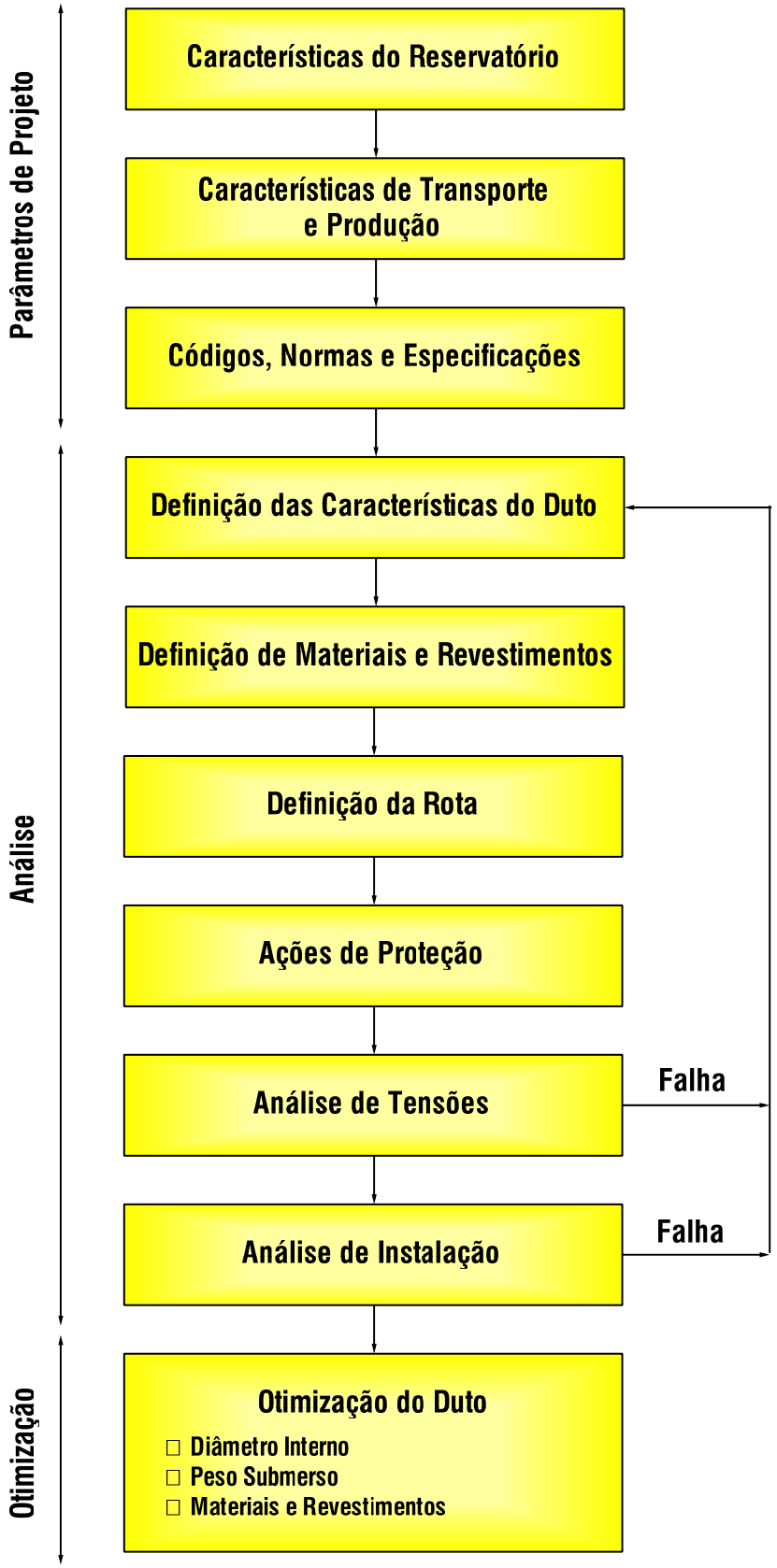


Figura 3.1 – Projeto de Dutos Submarinos.

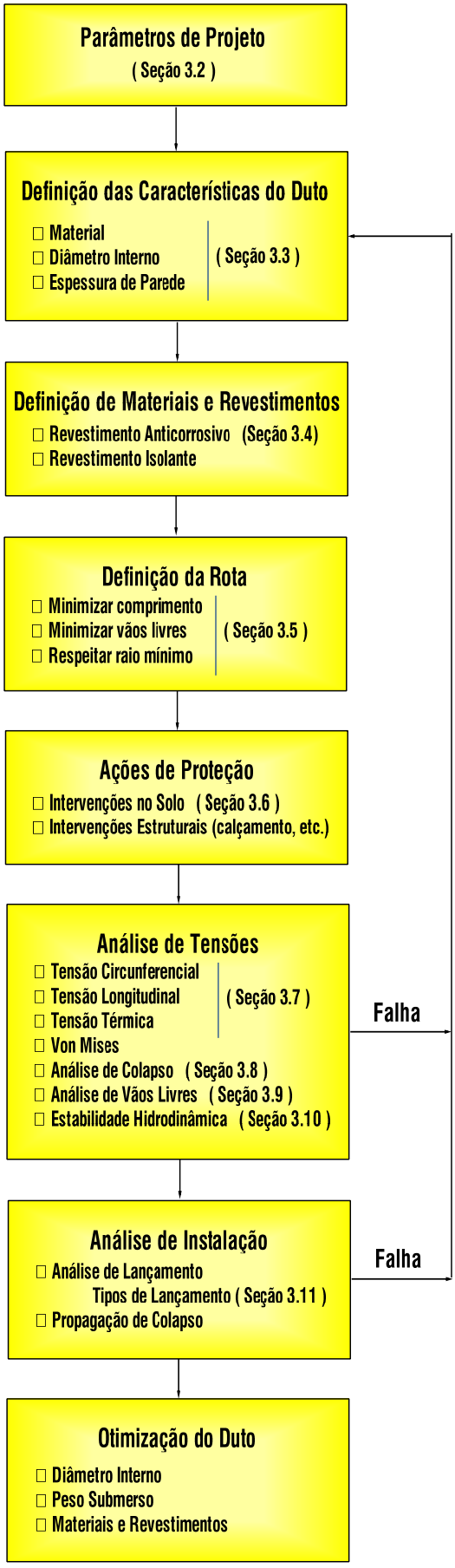


Figura 3.2 – Análise de Dutos Submarinos.

3.2 PARÂMETROS DE PROJETO

Ao se projetar um duto é preciso conhecer as condições sob as quais será instalado e operado. Fatores ambientais (lâmina d'água de instalação, perfil de correnteza e ondas) e as características do fluido (fase, abrasividade, concentração de sólidos, pressão e temperatura) afetam o projeto mecânico e a fabricação da tubulação. Uma lista de parâmetros que influenciam o projeto de dutos é mostrada a seguir.

- Capacidade do reservatório;
- Pressão e temperatura do reservatório;
- Formações no reservatório;
- Perfil de produção;
- Composição da água e do fluido;
- Característica do escoamento;
- Produção de sólidos;
- Dados batimétricos e geotécnicos;
- Dados meteorológicos e oceanográficos.

Antes de se iniciar o projeto da tubulação é necessário que todos esses parâmetros sejam coletados e compreendidos [11].

3.3 MATERIAL, DIÂMETRO INTERNO E ESPESSURA DE PAREDE

Nesta fase são definidas as características geométricas e mecânicas a serem adotadas na fabricação do duto. Para a definição do material a ser empregado deve-se avaliar além da resistência, os seguintes parâmetros:

- Corrosividade do fluido transportado;
- Temperaturas do ambiente e do fluido;
- Soldabilidade do material;
- Compatibilidade entre os diferentes materiais empregados.

O diâmetro da tubulação deve ser definido com base na vazão requerida para transportar o fluido a uma taxa esperada de produção do poço.

A determinação da espessura da parede do duto é baseada na pressão interna de projeto e pressão hidrostática externa.

A tensão longitudinal máxima e tensões combinadas em alguns casos são limitadas pelos códigos e precisam ser verificadas para a instalação e operação da tubulação.

Bai [11] apresenta uma metodologia, chamada DTA (*Design Through Analysis*) para o dimensionamento de dutos. Nela, é recomendado o seguinte procedimento para projeto da espessura de parede:

i. Calcular a espessura de parede mínima requerida pela pressão interna de projeto;

ii. Calcular a espessura de parede mínima requerida para suportar a pressão externa;

iii. Adicionar a espessura permitida para corrosão caso haja, a maior espessura obtida entre os dois casos anteriores;

iv. Adotar o maior diâmetro comercial imediatamente superior ao calculado;

v. Verificar a espessura de parede para as condições do teste hidrostático;

vi. Verificar a manuseabilidade do duto (a resistência a manuseabilidade de tubulações cresce com a relação $\frac{D}{t} > 50$, a soldagem de paredes mais finas que 0.3" requer procedimentos especiais).

3.4 PROTEÇÃO ANTICORROSIVA (CATÓDICA)

Para garantir que um duto atinja a vida útil de projeto é necessário que este seja protegido contra corrosão, tanto interna quanto externamente.

A proteção externa deve ser instalada ao longo de todo o comprimento do duto, porém há sempre uma grande possibilidade desta sofrer danos durante o transporte e a instalação, comprometendo assim a vida útil de projeto. Assim constitui-se uma boa prática de projeto utilizar uma proteção catódica (Figura 3.3) como parte complementar da proteção anticorrosiva.

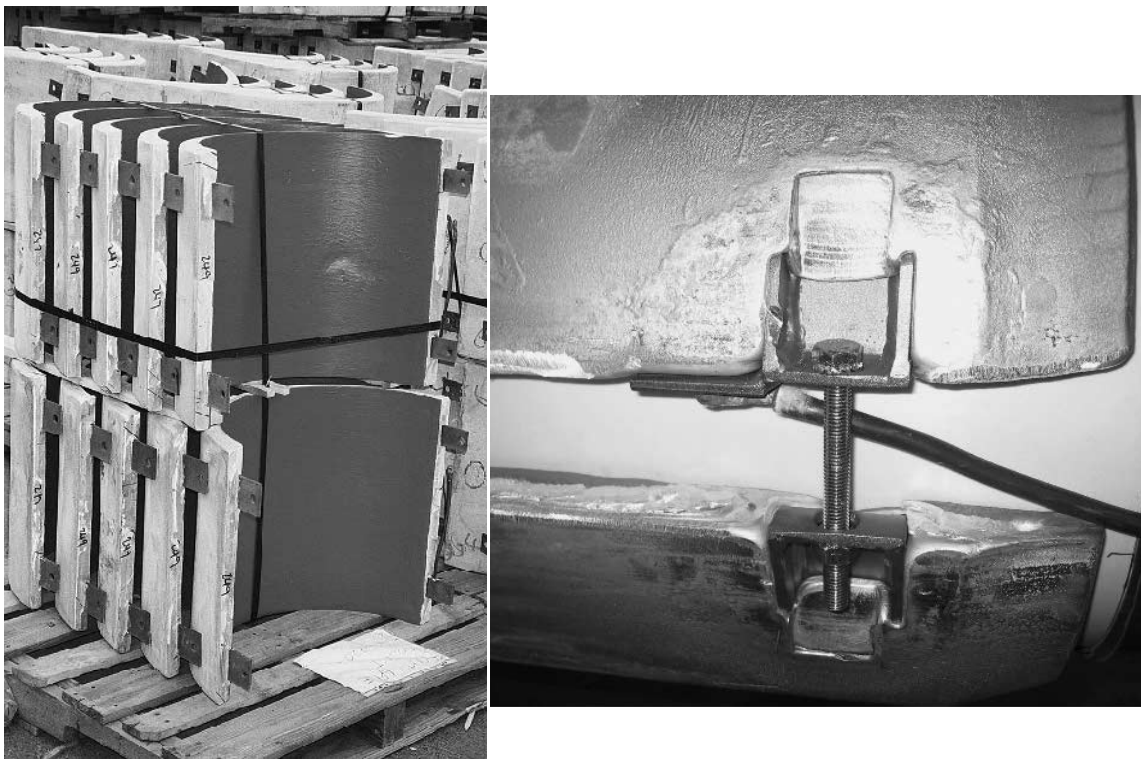


Figura 3.3 – Proteção Anticorrosiva [12].

A proteção catódica consiste em colocar um material de maior eletronegatividade (anódico) em contato com o material a ser protegido, de forma que aquele seja corroído antes do aço.

No dimensionamento da proteção catódica são determinados o tipo, a forma e a quantidade de anodos de sacrifício necessários para manutenção da integridade do duto durante toda a sua vida útil adicionalmente ao revestimento anticorrosivo adotado.

Os parâmetros a serem considerados nesta etapa dentre outros são: a salinidade, temperatura e corrosividade do meio, o material do duto, o material do anodo e a freqüência com que são realizadas as inspeções.

3.5 DEFINIÇÃO DA ROTA

A seleção da rota é um processo iterativo e bastante complexo governado por diversas variáveis, cujas recomendações de projeto são abordadas pela norma DNV-OS-F101 [6].

Intuitivamente, quanto menor a distância entre os pontos a serem ligados, menor o custo de material envolvido, no entanto, outros fatores devem ser considerados na determinação da melhor rota, dentre os quais destacam-se:

- Profundidade da lâmina d'água;
- Presença de irregularidades muito acentuadas no solo marinho;
- Número de vãos livres e proximidade entre os mesmos;
- Vão Livre máximo admissível;
- Presença de condições ambientais adversas, como altas velocidades de corrente;
- Raio mínimo imposto ao duto
- Presença de outros campos, dutos, estruturas;
- Presença de atividades como pesca;

A Figura 3.4 mostra o traçado em planta de um duto submarino, ligando um *manifold* a uma plataforma fixa.

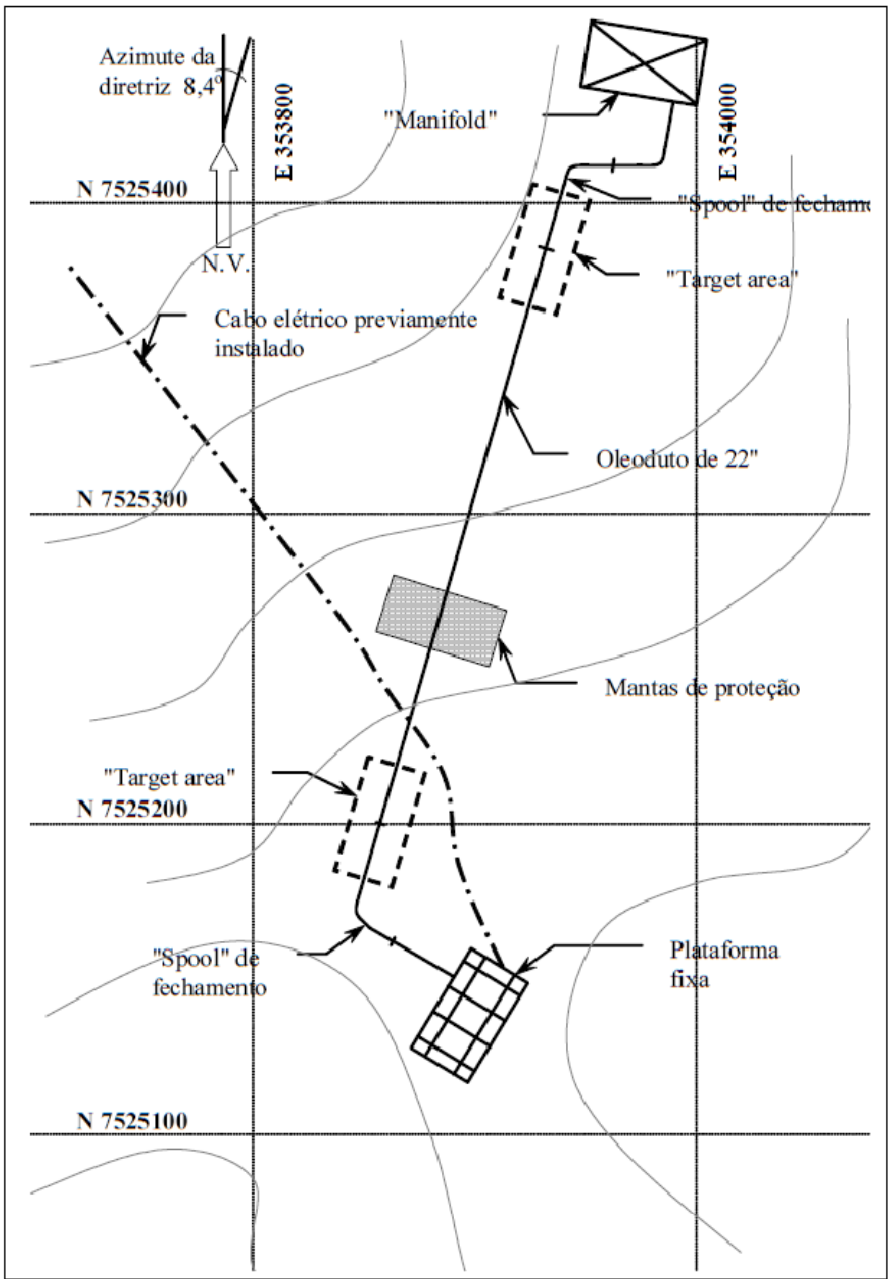


Figura 3.4 – Exemplo do traçado da rota de um duto. [13]

Tradicionalmente, este processo é resolvido de forma manual, porém nos últimos anos vem surgindo estudos envolvendo sua otimização [14, 15], onde o objetivo é determinar possíveis rotas minimizando o material e o custo de instalação.

3.6 INTERVENÇÕES NO SOLO

A intervenção no solo é normalmente utilizada para proteger, controlar expansões e diminuir vãos livres. Existem diversas técnicas de intervenções de fundo, porém serão apresentadas a seguir as mais utilizadas.

3.6.1 ESCAVAÇÃO MECÂNICA

Este método consiste em abrir valas no leito marinho através de escavadores mecânicos seguindo a rota de instalação do duto, Figura 3.5. Há uma grande variedade de tipos de escavadores mecânicos, no entanto seguem o mesmo principio descrito acima.

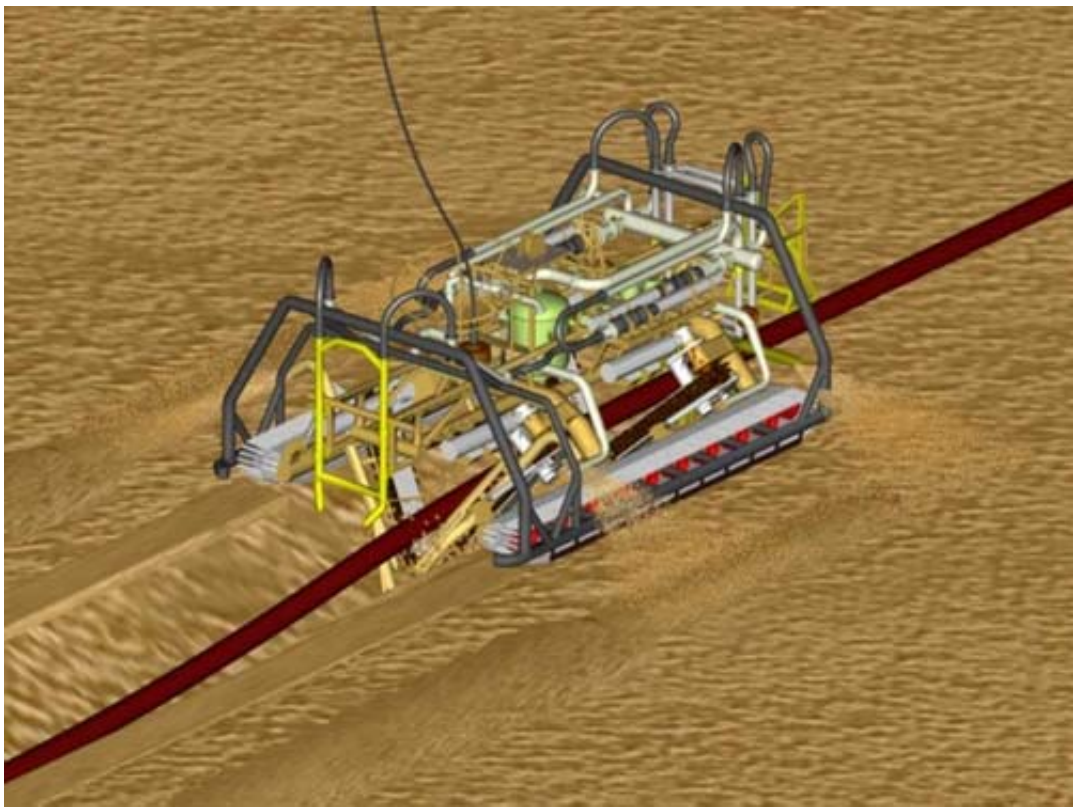


Figura 3.5 – Típica escavadora mecânica. [16]

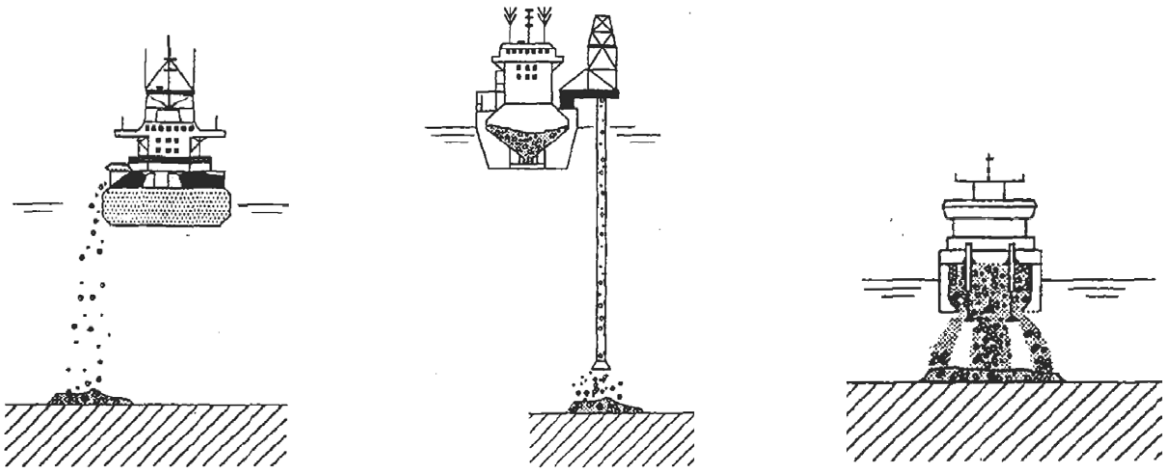
3.6.2 JETTING

Consiste basicamente em modificar momentaneamente a capacidade de carga do solo a fim de promover o enterramento do duto. O equipamento de *Jetting* lança água em alta pressão sobre o duto para expulsar o solo criando uma trincheira, como ilustrado na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Típico equipamento de *Jetting*. [17]

3.6.3 ROCK DUMPING

Consiste em depositar grande quantidade de pedras em determinadas regiões na rota do duto e menores quantidades sobre o duto a fim de protegê-lo contra danos. Algumas técnicas são apresentadas na Figura 3.7.



Slide Dumper **Fall Pipe** **Bottom Dropper**

Figura 3.7 – *Rock Dumping*. [11]

3.7 TENSÕES NO DUTO

A análise de tensões em dutos consiste em verificar os níveis de tensões na tubulação frente aos limites admissíveis. As tensões devem ser verificadas para todas as etapas: instalação, teste hidrostático e operação.

3.7.1 TENSÃO LONGITUDINAL

A tensão longitudinal na parede do duto (σ_l) consiste das seguintes tensões [11]:

- Tensão devido à flexão (σ_b , *Stress bending*);
- Tensão circunferencial (σ_h , *Hoop stress*);
- Tensão devido à variação de temperatura (σ_t , *Thermal stress*);
- Tensão devido à extremidade (σ_{ec} , *End cap stress*).

Cada uma das componentes está ilustrada na figura a seguir:

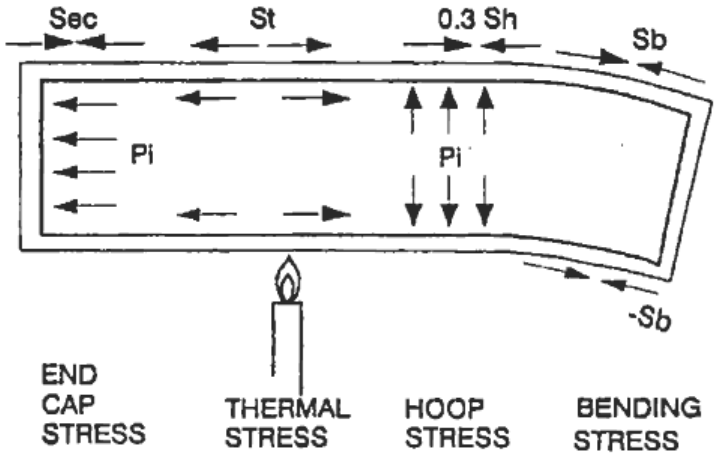


Figura 3.8 – Tensão longitudinal. [11]

A tensão longitudinal pode ser determinada pela seguinte equação:

$$\sigma_l = 0.3\,\sigma_h + \sigma_b + \sigma_t + \sigma_{ec} \qquad (3.1)$$

Constante utilizada para aço

3.7.2 TENSÃO CIRCUNFERENCIAL

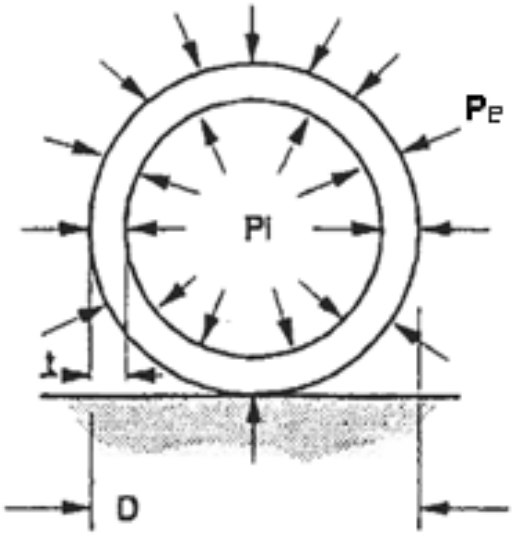


Figura 3.9 – Tensão circunferencial. [11]

A tensão circunferencial (σ_h) pode ser determinada através da seguinte equação:

$$\sigma_h = \frac{\left(P_i - P_e\right)}{2 \cdot t} \cdot \left(D - t\right) \tag{3.2}$$

A equação apresentada acima refere-se a tubulações de parede fina.

3.7.3 TENSÃO DEVIDO À CARGA TÉRMICA

Da análise térmica pode-se obter: a máxima expansão entre dois pontos extremos do duto e a carga axial máxima associada a esta movimentação. Ambos os resultados tem implicações significativas no projeto, uma vez que:

i. a carga axial determina se a linha corre o risco de flambar quando estiver operando;

ii. a expansão nas extremidades dita as características do trecho de duto responsável pela absorção da movimentação térmica. Além de definir o quanto de movimento precisa ser absorvido.

O grau de expansão em um duto é função de seus parâmetros operacionais e das condições de restrição no fundo [11]. A linha irá expandir até o ponto de "ancoragem", como mostrado na Figura 3.10.

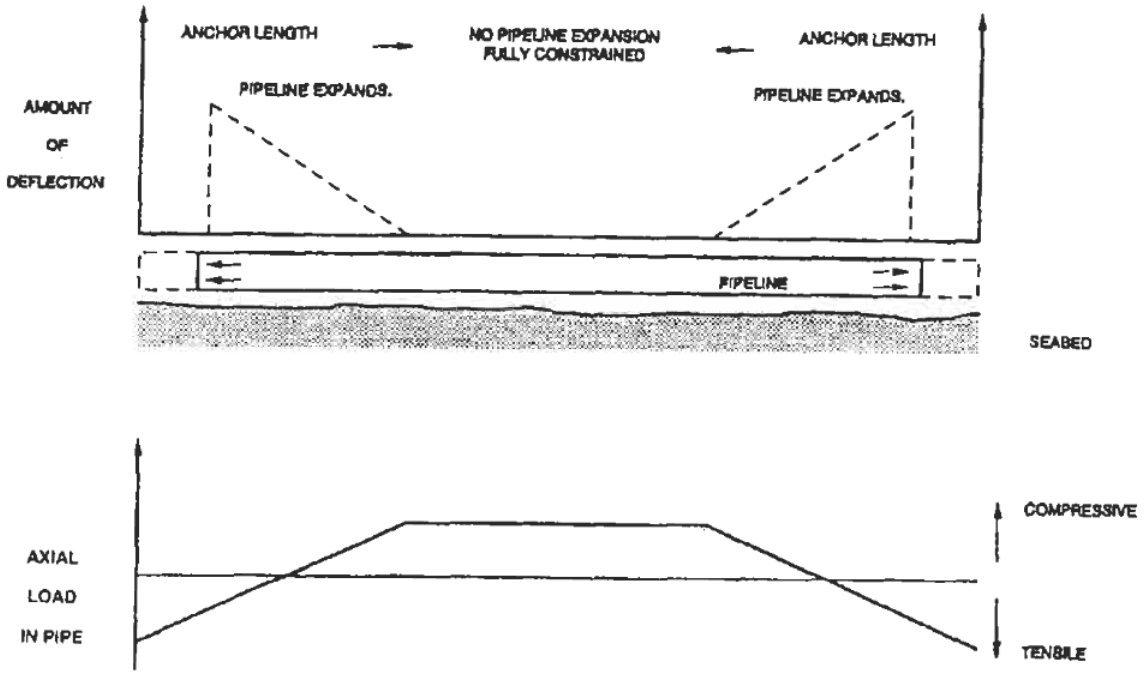


Figura 3.10 – Tensão devido à carga térmica [11].

A distância entre as extremidades do duto e o "comprimento de ancoragem" é determinada com base nos parâmetros operacionais e nas restrições impostas ao duto. Quanto menos restrito for o duto, maior se torna o "comprimento de ancoragem" e maiores são as expansões.

A tensão de compressão devida ao diferencial de temperatura (ΔT) pode ser determinada através da seguinte expressão:

$$\sigma_t = -E \cdot \alpha \cdot \Delta T \tag{3.3}$$

3.8 ANÁLISE DE COLAPSO

O colapso em dutos submarinos ocorre quando a diferença entre a pressão externa (P_e) e a pressão interna (P_i) supera a pressão máxima admissível. Quando a pressão externa excede um valor crítico chamado pressão de propagação, o colapso pode avançar ao longo do duto [6]. Dessa forma, a determinação do valor da pressão de propagação é essencial no projeto de duto.

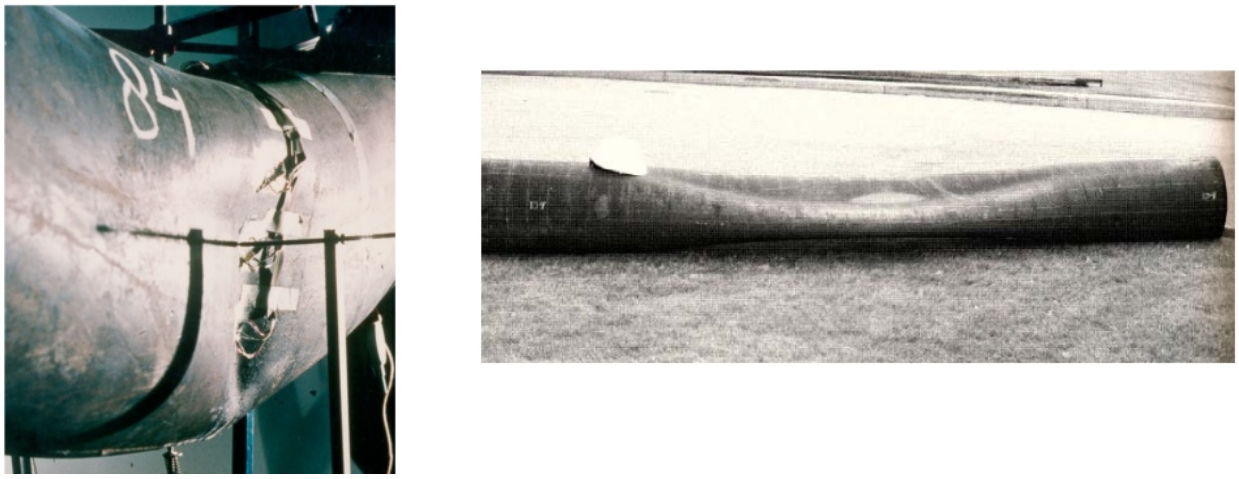


Figura 3.11 – Colapso de dutos submarinos.[18]

Segundo a norma DNV-OS-F101, a pressão de colapso característica (p_c) é função:

- da capacidade elástica (p_{el}), ver equação 3.5;
- da capacidade plástica (p_p), ver equação 3.6;
- da ovalização (f_0), ver equação 3.7.

e pode ser determinada através das seguintes equações:

$$\left(p_c(t)-p_{el}(t)\right)\cdot\left(p_c(t)^2-p_p(t)^2\right)=p_c(t)\cdot p_{el}(t)\cdot p_p(t)\cdot f_0\cdot\frac{D}{t} \qquad (3.4)$$

$$p_{el}(t)=\frac{2\cdot E\cdot\left(\frac{t}{D}\right)^3}{1-\nu^2} \qquad (3.5)$$

$$p_p(t)=f_y\cdot\alpha_{fab}\cdot\frac{2\cdot t}{D} \qquad (3.6)$$

$$f_0=\frac{D_{\max}-D_{\min}}{D} \qquad (3.7)$$

3.9 ANÁLISE DE VÃOS LIVRES

Configura-se um vão livre quando o duto perde contato com o solo ao longo de um comprimento considerável em um fundo batimétrico irregular (Figuras 3.12 e 3.13).

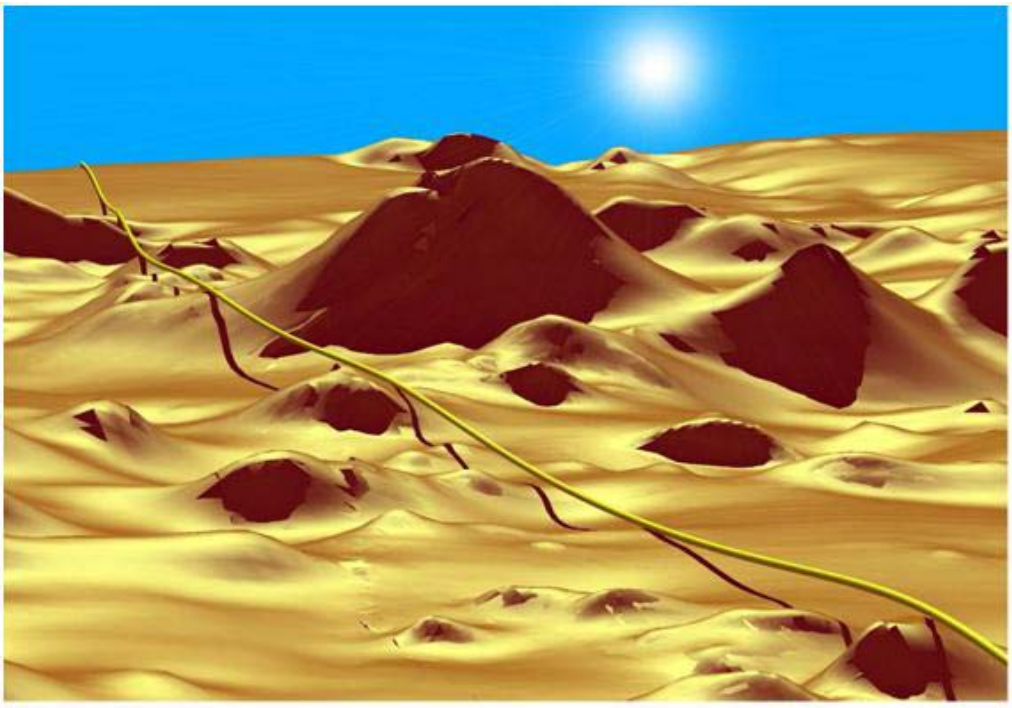


Figura 3.12 – Vãos Livres. [19]

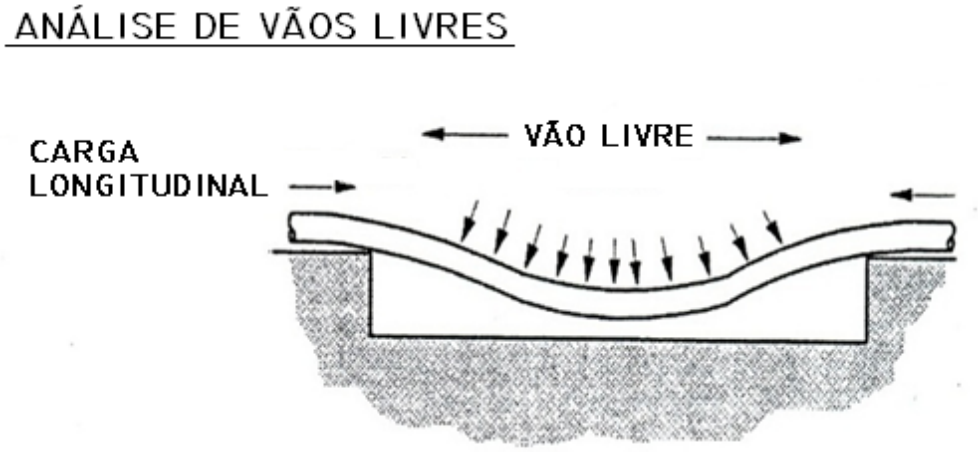


Figura 3.13 – Vão Livre. [11]

O fluxo ao redor da tubulação, devido à onda e corrente, ocasiona a geração de esteira de vórtices, esses vórtices exercem uma força oscilatória sobre o vão livre podendo ocasionar vibrações (VIV - *Vortex Induced Vibration*).

Caso a freqüência do desprendimento de vórtices (freqüência de *shedding*) seja próxima da freqüência do vão, o fenômeno de ressonância pode ocorrer. A ressonância (vibração) pode levar o duto à falha por fadiga, geração de fissuras ou até a perda do recobrimento de concreto.

A freqüência de *Shedding* (f_s) é função do número de *Strouhal* (S_t), que é uma grandeza adimensional e pode ser representada pela expressão:

$$f_s = S_t \cdot \frac{U}{D} \tag{3.8}$$

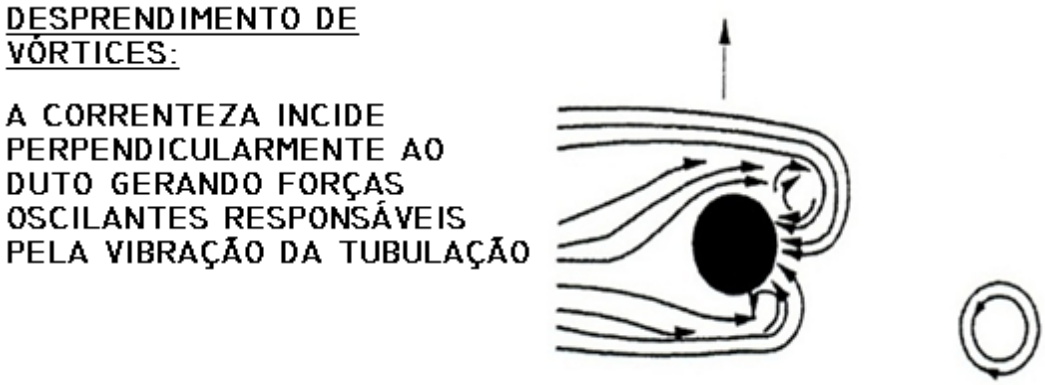


Figura 3.14 – Desprendimento de Vórtices. [11]

Segundo a norma DNV-RP-F105 [20], em tais circunstâncias, devem-se fazer as seguintes verificações na tubulação:

- Tensão admissível;
- Fadiga por VIV (*Vortex Induced Vibration*).

Essas verificações resultam na determinação de um limite máximo para o comprimento dos vão livres. Caso o comprimento real dos vãos exceda o admissível, medidas corretivas (suportes mecânicos, sacos de cimento, etc.) são aplicadas para reduzir esses comprimentos.

3.10 ESTABILIDADE HIDRODINÂMICA

A estabilidade de um duto é a capacidade da tubulação manter-se estável na sua posição inicial ou como instalado, levando em conta as tolerâncias permitidas pelo projeto norteadas pela norma DNV-RP-F109 [3]. Nesta etapa definem-se dados muito importantes: espessuras do duto e revestimento suficientes para prover peso adicional, a fim de garantir a estabilidade da estrutura.

Existem vários níveis de cálculo de estabilidade e tais metodologias serão apresentadas em detalhes no capítulo 5.

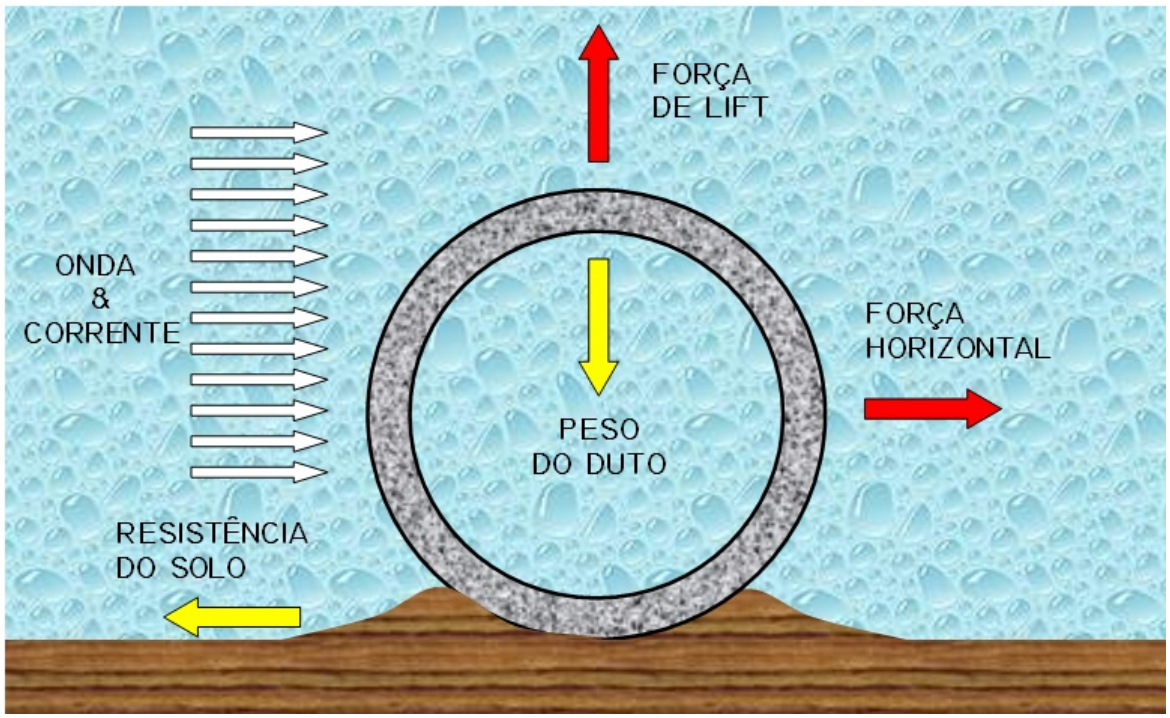


Figura 3.15 – Cargas atuantes em uma seção típica de duto submarino.

3.11 INSTALAÇÃO DE DUTOS SUBMARINOS

Um dos maiores desafios existentes em operação *offshore* é a instalação de dutos submarinos [21], o qual tem fomentado significativos trabalhos nesta área. Os estudos abrangem tanto novas metodologias de instalação, quanto a formulação e implementação de novas ferramentas computacionais de simulação numérica [22, 23].

A seguir, serão apresentadas algumas características dos principais métodos de instalação de tubulações submarinas.

3.11.1 S-LAY

O lançamento em configuração *S-Lay*, Figura 3.16, é o método mais comum de instalação de dutos em águas rasas. O método consiste em apoiar a tubulação sobre roletes na embarcação e no *stinger*, formando uma configuração em S, a qual dá nome ao método. Observando a Figura 3.16 pode-se identificar duas grandes regiões: uma região apoiada sobre o *stinger* chamada *overbend* e uma região suspensa desde o fundo chamada *sagbend*.

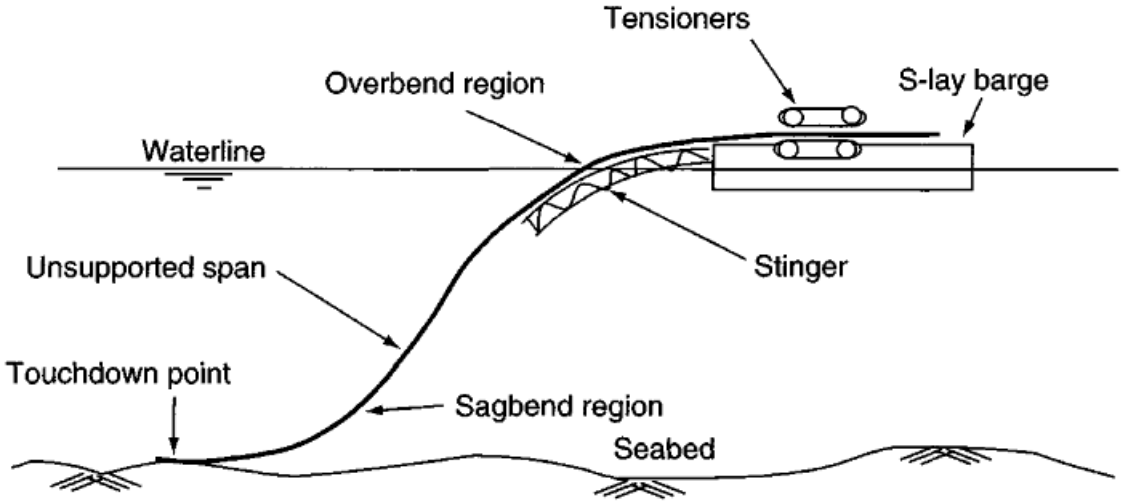


Figura 3.16 – Configuração S-Lay [7].

Os trechos de segmentos de dutos ficam estocados na embarcação e são soldados um a um durante a operação de lançamento.

Tracionadores são usados para manter a tubulação suspensa durante o lançamento. A tração no duto é compensada pelas âncoras instaladas na proa da balsa, Figura 3.17, ou no casco de embarcações com posicionamento dinâmico (***DP***) através dos *thrustes*.

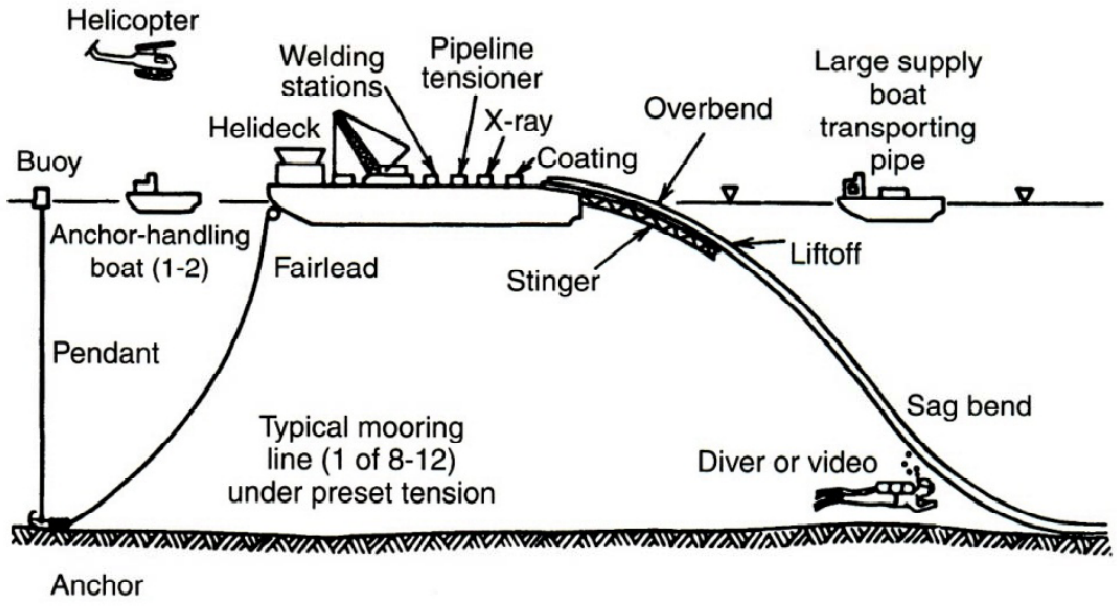


Figura 3.17 – Típica Operação S-Lay [12].

A Figura 3.18 apresenta esquematicamente as forças atuantes no duto durante a operação de lançamento.

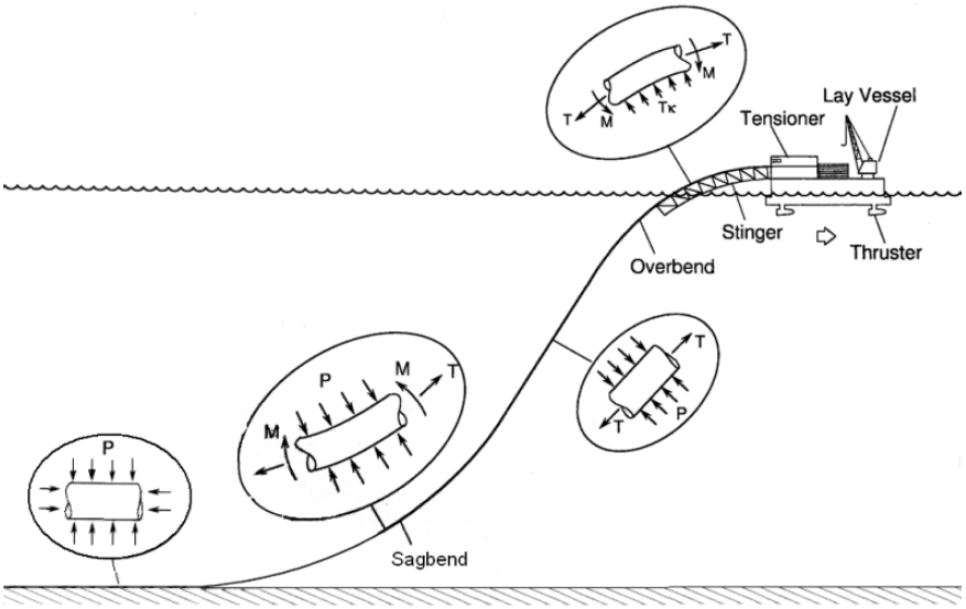


Figura 3.18 – Forças atuantes no duto durante o lançamento *S-Lay* [24].

3.11.2 J-LAY

O método *J-Lay* é normalmente usado em lâminas d'água maiores que 150m. O método consiste em soldar e lançar dutos em uma posição vertical (ou quase vertical) através de uma grande torre de lançamento. Uma configuração *J-Lay* típica é ilustrada esquematicamente na Figura 3.19.

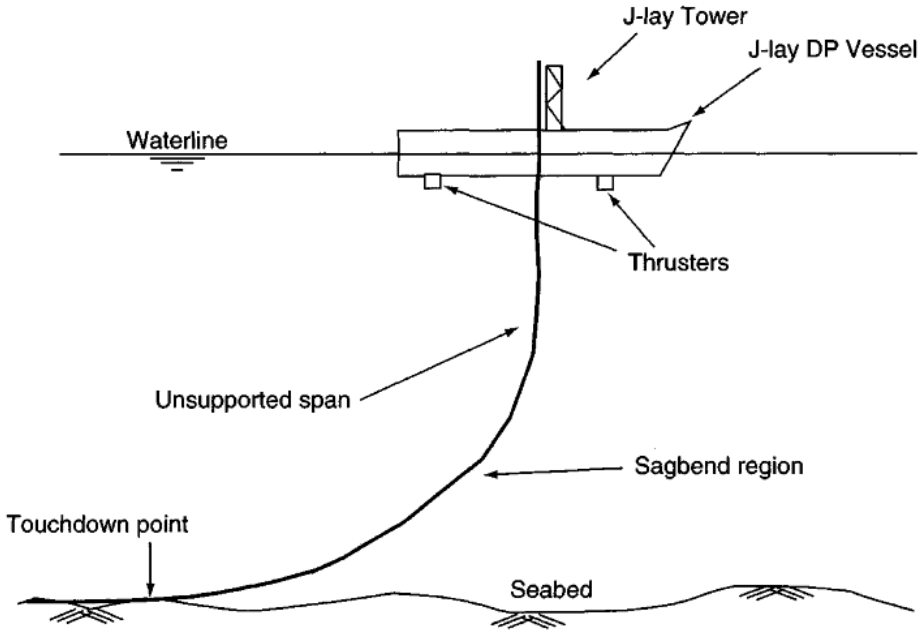


Figura 3.19 – Configuração *J-Lay* [7].

No processo de lançamento *J-Lay*, o duto segue da superfície até o fundo do mar com um raio de curvatura maior que o do método *S-Lay*, para a mesma lâmina d'água. Este método leva a menores tensões de flexão devido ao aumento do raio de curvatura e a menores forças horizontais para manter a configuração J devido à ausência do *overbend*. As forças no duto durante a operação de lançamento *J-Lay* são esquematicamente ilustradas na Figura 3.20.

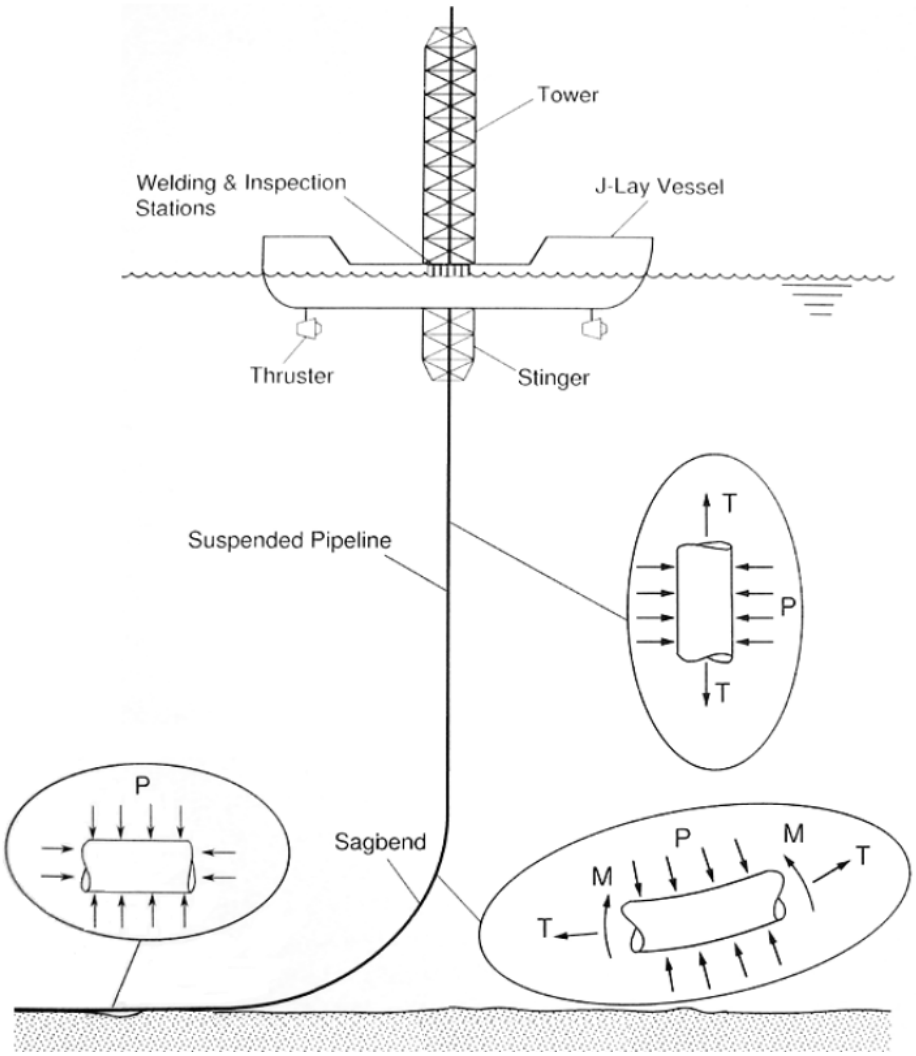


Figura 3.20 – Forças atuantes no duto durante o lançamento J-Lay [24].

3.11.3 REEL LAY

O método *Reel Lay* é considerado um dos mais eficientes métodos de instalação de dutos submarinos. O método consiste em soldar e enrolar o duto em um carretel e após a chegada ao local previsto para a instalação o duto deve ser desenrolado, retificado e lançado.

O procedimento de lançamento é realizado da seguinte maneira:

i. A embarcação segue a rota de instalação enquanto o duto é lentamente desenrolado do carretel e lançado ao mar;

ii. Ao final do processo, quando praticamente todo o duto foi desenrolado do carretel, conecta-se uma cabeça de abandono a tubulação que é lançada ao mar com uma bóia de recuperação;

iii. Substitui-se o carretel por outro que contém a nova tubulação a ser lançada;

iv. Recupera-se o duto abandonado pescando-se a bóia conectada a cabeça de abandono;

v. A cabeça de abandono é removida e a tubulação do novo carretel é soldada ao duto recuperado;

vi. A operação de lançamento é então reiniciada.

As tensões no *sagbend* são controladas por um sistema de tracionadores.

Um esquema típico de instalação pelo método *Reel Lay* é ilustrado na Figura 3.21.

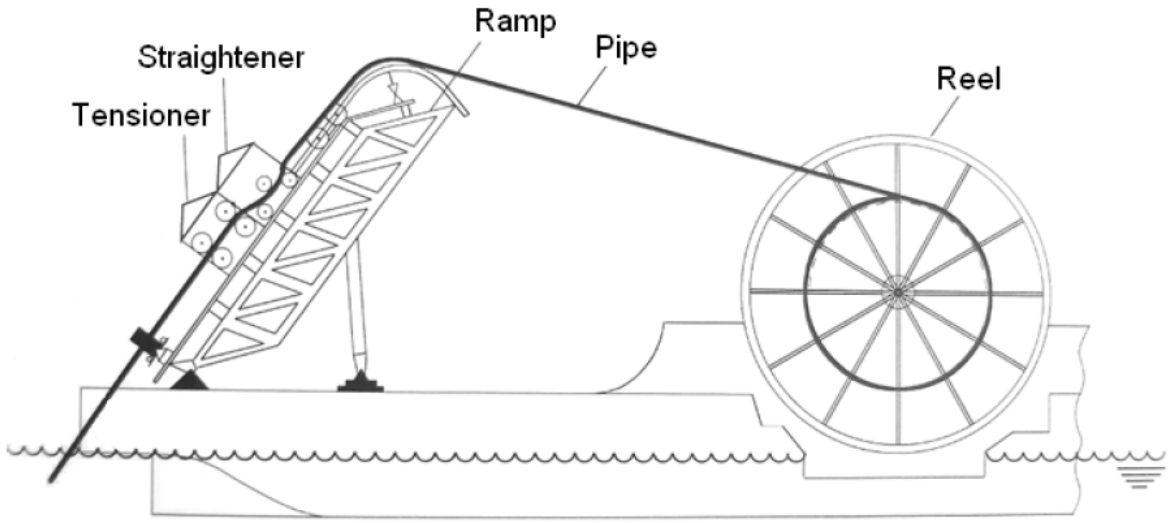
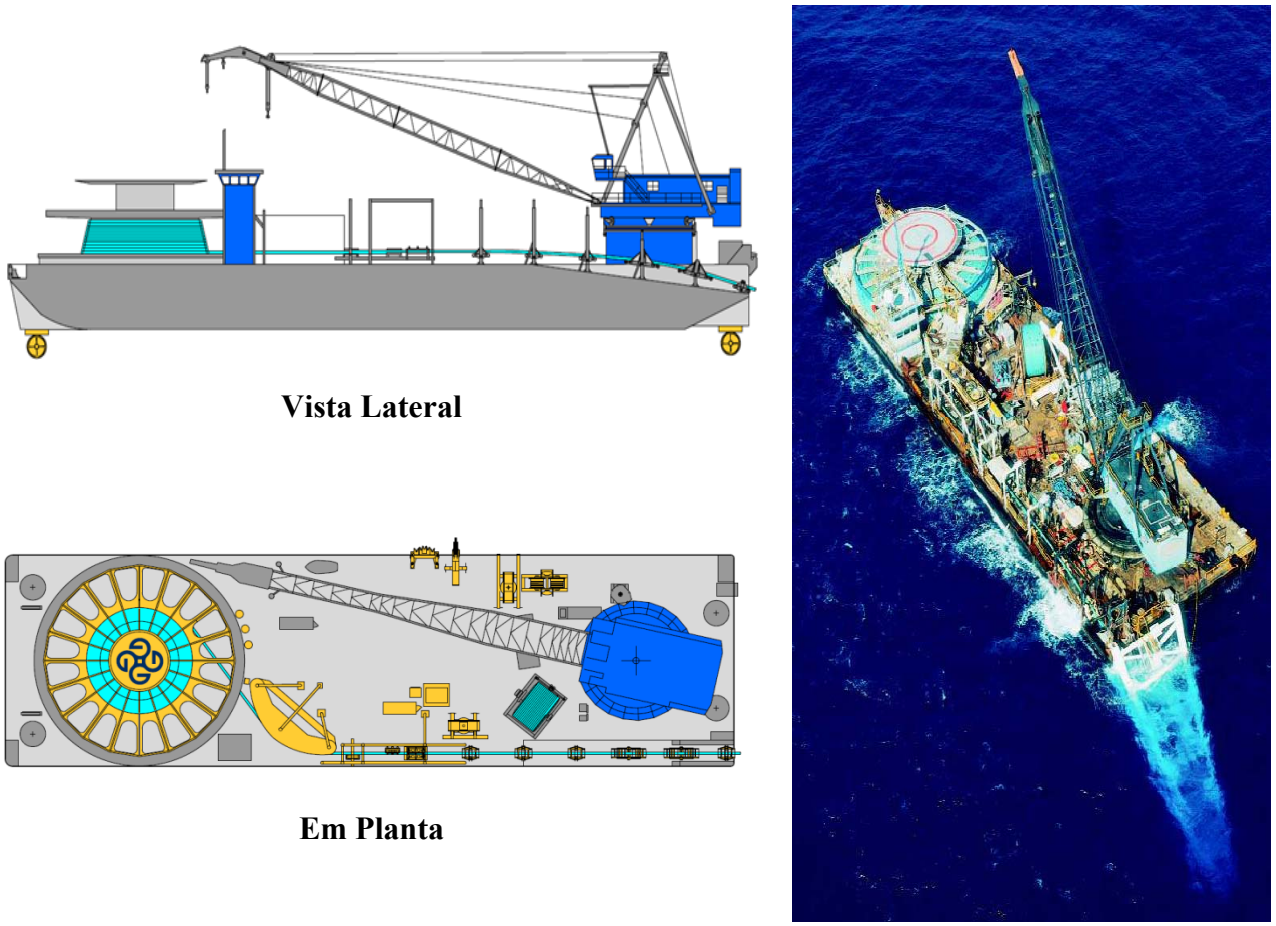


Figura 3.21 – Configuração Reel Lay [24].

O método *Reel Lay* permite lançamentos em configurações *S-Lay* e *J-Lay*, dependendo da lâmina d'água e da capacidade da embarcação. Uma embarcação *Reel Lay* pode acomodar o carretel de lançamento em uma posição vertical ou horizontal. O carretel vertical normalmente instala dutos em lâminas de águas intermediárias para profundas usando uma configuração *J-Lay* (Figura 3.21), já o carretel horizontal lança dutos de águas rasas para intermediárias usando uma configuração *S-Lay* com *stinger*, como ilustrado na Figura 3.22.[23]



Vista Lateral

Em Planta

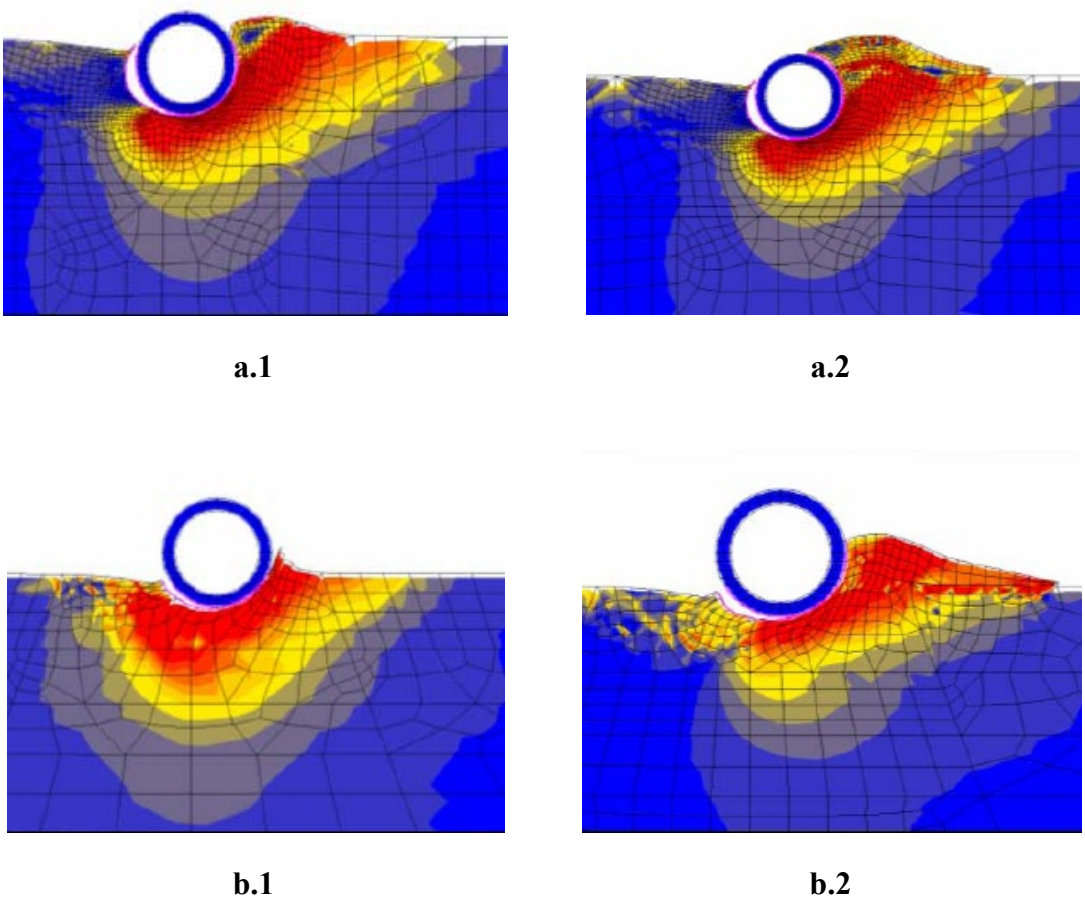
Figura 3.22 – Chickasaw (Global Industries) [25].

4 INTERAÇÃO SOLO DUTO

4.1 INTRODUÇÃO

A adequada representação da interação solo-duto é de fundamental importância na simulação do comportamento de dutos apoiados no solo marinho, pois interfere de forma expressiva na movimentação do duto. Ao mesmo tempo em que tende a restringir a movimentação da tubulação, sendo este um efeito benéfico para a estabilidade lateral, pode também gerar condições necessárias para a ocorrência do fenômeno de flambagem, caso a resistência do solo seja insuficiente para restringir as movimentações do duto.

A título de ilustração são apresentadas na Figura 4.1 típicas deformações de solo obtidas através de simulações numéricas para diferentes perfis de resistência.



a.1 **a.2**

b.1 **b.2**

Figura 4.1 – Típicas deformações de solo provenientes de simulações numéricas de interação solo-duto [26].

4.2 DIREÇÃO AXIAL

A resistência axial do solo tende a gerar um esforço de compressão na tubulação que é função da área de contato solo-duto e dos parâmetros de resistência do solo. De um modo geral é dada pela lei de atrito de Coulomb, conforme mostrado abaixo. [26]

$$F_{axi} = \int_A \tau \cdot dA \tag{4.1}$$

Onde:

$$\tau = c + \overline{\sigma_n} \cdot \tan \varphi_c \tag{4.2}$$

Para materiais argilosos, em condições não drenadas, fazendo $c = 0$ e $\varphi_c = 0$, tem-se que:

$$F_{axi} = \int_A S_u \cdot dA \tag{4.3}$$

Ou caso a resistência não drenada seja constante:

$$F_{axi} = S_u \cdot A_{lat} \tag{4.4}$$

Para materiais arenosos em condições drenadas fazendo $c = 0$, tem-se que:

$$F_{axi} = \int_A \overline{\sigma_n} \cdot \tan \varphi_c \cdot dA \tag{4.5}$$

No caso de uma distribuição aproximadamente uniforme da tensão normal no contato solo-duto, temos:

$$F_{axi} = \tan \varphi_c \cdot \overline{\sigma_n} \cdot A_{lat} \tag{4.6}$$

Na análise de dutos é comum a utilização do conceito de coeficiente de atrito axial equivalente para quantificar a interação solo-duto independente de seu comportamento ser drenado ou não drenado. O coeficiente de atrito equivalente é obtido dividindo-se a reação axial máxima pelo peso submerso da tubulação, conforme a equação 4.7. Esta forma de representação da interação solo-duto é extremamente útil, pois fornece um valor adimensional levando em conta as características do solo e da tubulação, sendo mais prático do que a simples utilização da reação axial. [26]

$$F_{axi} = \mu_{axi} \cdot w_s \tag{4.7}$$

4.3 DIREÇÃO TRANSVERSAL

Segundo Cardoso [26], a resistência lateral do solo desenvolvida pela movimentação de dutos compreende essencialmente duas parcelas: força de atrito de Coulomb ($\boldsymbol{F_\mu}$) e resistência passiva do solo ($\boldsymbol{F_R}$), podendo ser determinada através da seguinte equação:

$$F_{lat} = F_\mu + F_R \tag{4.8}$$

4.3.1 FORÇA DE ATRITO DE COULOMB

A força de atrito de Coulomb ($\boldsymbol{F_\mu}$) é função do atrito no contato solo-duto e do peso submerso da tubulação.

Como alternativa, é possível utilizar o conceito de coeficiente de atrito lateral equivalente para quantificar a interação solo-duto independente do comportamento drenado ou não drenado do solo. O coeficiente de atrito lateral equivalente pode ser determinado dividindo o valor da reação lateral pelo peso submerso da tubulação, conforme mostrada na equação abaixo.

$$F_{lat} = \mu_{lat} \cdot w_s \tag{4.9}$$

4.3.2 FORÇA DE RESISTÊNCIA PASSIVA DO SOLO

A resistência passiva do solo (F_R) é função do diâmetro externo do duto, dos parâmetros de resistência do solo e do nível de enterramento da tubulação.

Quanto maior o enterramento do duto maior a participação da resistência passiva na composição da resistência lateral. [3]

A norma DNV-RP-F109 [3], baseada em trabalhos desenvolvidos por VERLEY [27,28], recomenda um modelo típico para a resistência passiva do solo (areia e argila) que consiste em quatro regiões distintas, descritas a seguir:

- Região elástica (Y_1) onde o deslocamento lateral é inferior a 2% do diâmetro do duto;
- Região de resistência máxima onde o deslocamento (Y_2) pode atingir, até metade do diâmetro do duto para os solos arenosos e argilosos em que a interação solo-duto causa variação na penetração e conseqüentemente na resistência passiva do solo;
- Uma região pós-rompimento (*Break-out*) onde a resistência e a penetração diminuem;
- Quando o deslocamento ultrapassa tipicamente um diâmetro da tubulação, a penetração e a resistência passiva podem ser consideradas constantes.

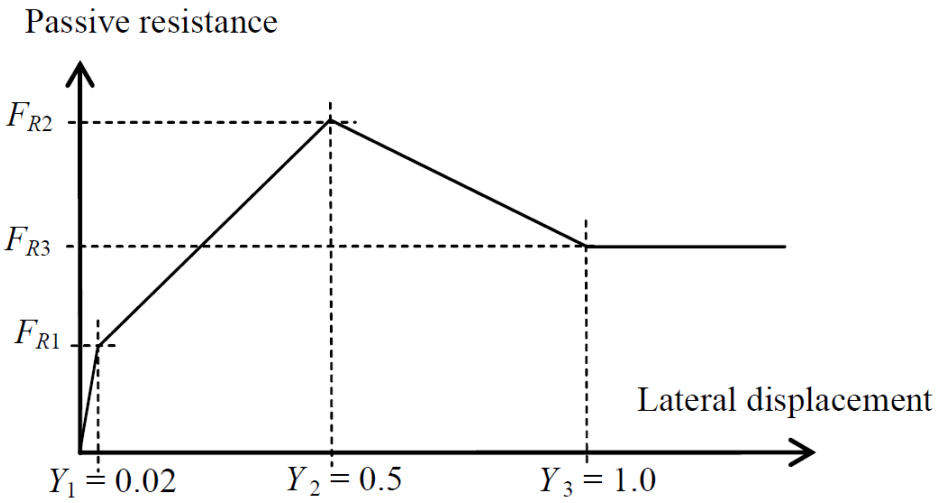


Figura 4.2 – Resistência Passiva. [3]

A seguir são descritas as regiões da curva de resistência solo-duto apresentadas na figura acima.

1) Região elástica: onde $Y \leq Y_1$, a rigidez (k) pode ser admitida de $50 a 100 \frac{N}{m}$ para areia e $20 a 40 \frac{N}{m}$ para argila [3]. A rigidez aumenta com a densidade da areia e a resistência ao cisalhamento da argila;
2) Região $Y_1 \leq Y \leq Y_2$: região com aumento do enterramento e conseqüente aumento na resistência passiva do solo.

As expressões contidas nos subitens a seguir estão em função da penetração total (z_p), que pode ser determinada somando-se a penetração inicial (z_{pi}) com a penetração devido ao movimento do duto (z_{pm}), como exemplificado na equação abaixo.

$$z_p = z_{pi} + z_{pm} \tag{4.10}$$

As parcelas referentes à z_p serão detalhadas adiante, no item 4.9.

Resistência Passiva em Solos Arenosos:

A resistência passiva F_R sobre a areia pode ser expressa por:

$$\frac{F_R}{F_C} = \begin{cases} \left(5.0 k_s - 0.15 {k_s}^2\right)\left(\frac{z_p}{D}\right)^{1.25} & if \quad k_s \leq 26.7 \\ k_s \left(\frac{z_p}{D}\right)^{1.25} & if \quad k_s > 26.7 \end{cases} \tag{4.11}$$

$$F_C = w_s - F_Z$$
$$k_s = \frac{\gamma_s' D^2}{w_s - F_Z} = \frac{\gamma_s' D^2}{F_C} \tag{4.12}$$

Resistência Passiva em Solos Argilosos:

A resistência passiva F_R sobre a argila pode ser expressa por:

$$\frac{F_R}{F_C} = \frac{4.1 k_c}{G_C^{0.39}} \left(\frac{z_p}{D} \right)^{1.31} \tag{4.13}$$

$$F_C = w_s - F_Z$$

$$G_C = \frac{s_u}{D \cdot \gamma_s} \tag{4.14}$$

$$k_c = \frac{s_u \cdot D}{w_s - F_Z} = \frac{s_u \cdot D}{F_C}$$

4.4 INTERAÇÃO SOLO-DUTO: SOB CARREGAMENTOS CÍCLICOS

Segundo Cardoso [26], a modelagem do comportamento da reação lateral durante carregamentos cíclicos é mais complexa que o descrito acima, uma vez que a reação lateral pode sofrer variações significativas durante os ciclos de carregamento e descarregamento.

A Figura 4.3 ilustra as fases que compõem um típico carregamento cíclico atuante em dutos submarinos com pequenos deslocamentos.

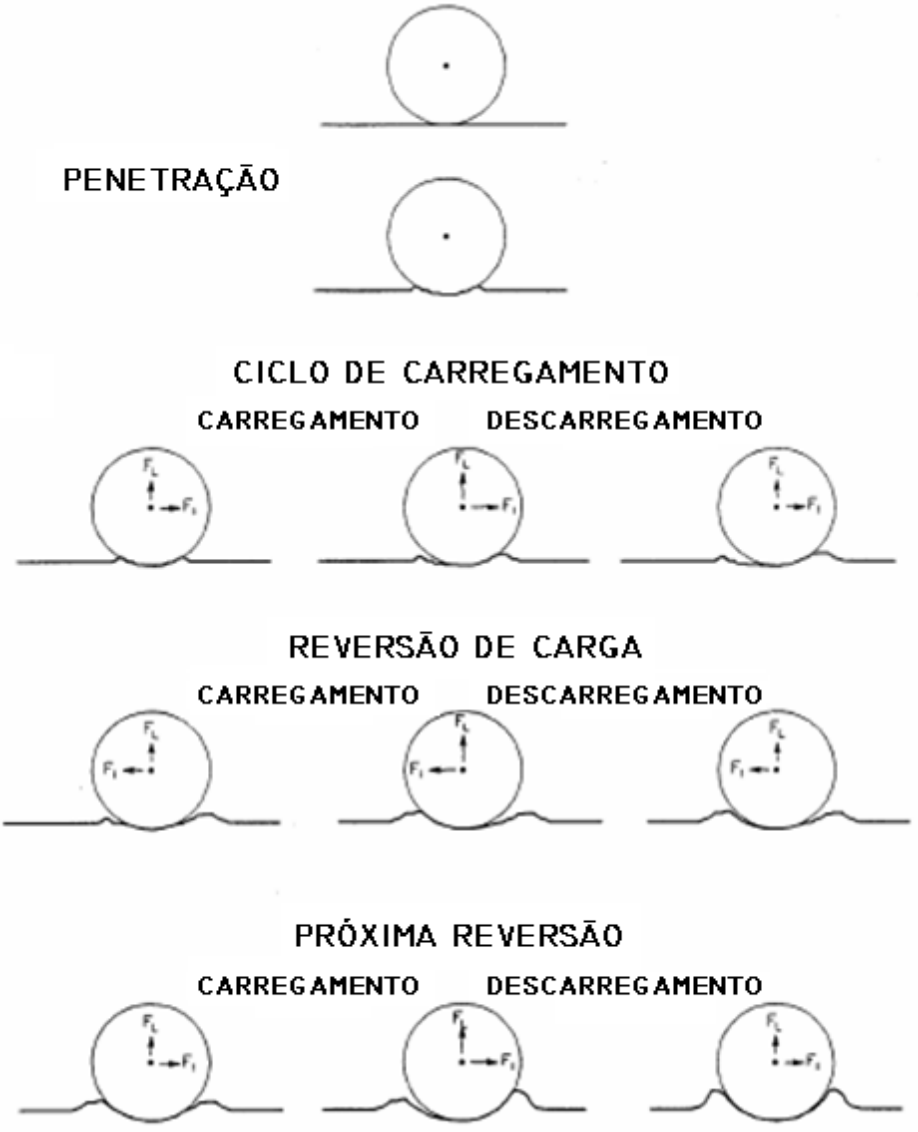
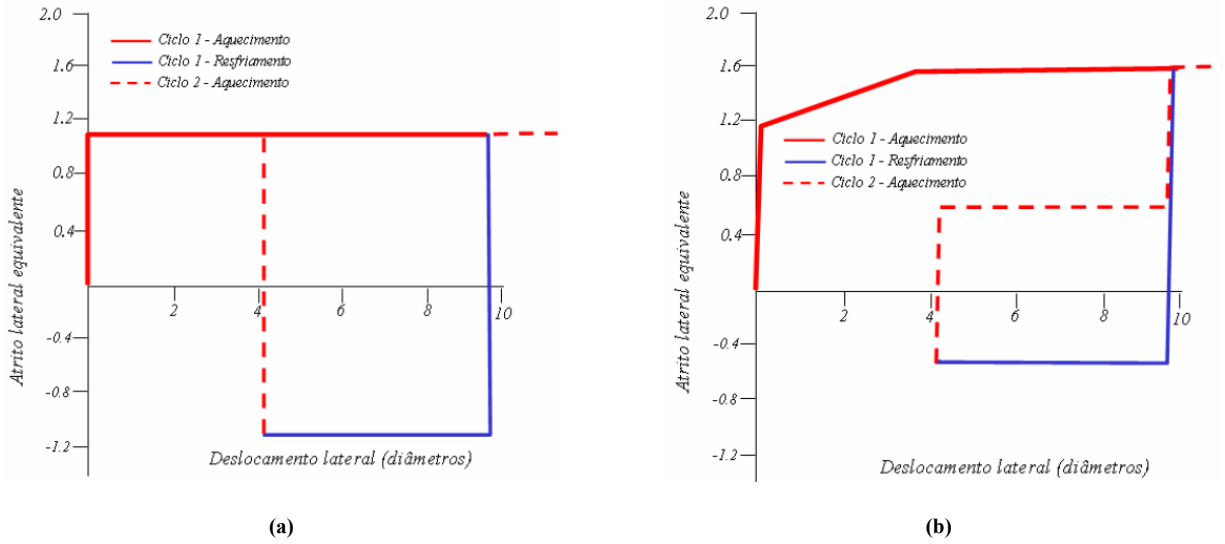


Figura 4.3 – Imagem esquemática de típico carregamento cíclico atuante em dutos. [4]

Analisando a Figura 4.3, percebe-se uma penetração inicial do duto no solo, antes da aplicação do carregamento cíclico. Este efeito, também conhecido como enterramento natural, descrito adiante no item 4.6, é decorrente do afundamento devido ao peso próprio do duto e dos esforços de instalação.

O movimento cíclico da tubulação sobre o leito marinho tende a aumentar o seu enterramento e conseqüentemente a resistência lateral.

A Figura 4.4 ilustra dois comportamentos típicos de reação lateral do solo para dutos sob carregamentos cíclicos de aquecimento e resfriamento.



(a) (b)

Figura 4.4 – Reação lateral do solo sob carregamentos cíclicos de aquecimento e resfriamento: (a) comportamento generalizado, com base na lei de atrito de Coulomb e (b) comportamento real típico. [26]

A Figura 4.4.a ilustra uma modelagem simplificada do comportamento da reação lateral versus deslocamento durante o aquecimento, resfriamento e posterior reaquecimento, com base na lei de atrito de Coulomb. Já a Figura 4.4.b mostra um comportamento real típico da curva de reação de atrito lateral sob as mesmas condições de carregamento.

Na Figura 4.4.a percebe-se que o valor da reação lateral não varia com o deslocamento, exceto na alteração de fase (aquecimento-resfriamento e resfriamento-aquecimento). Este comportamento pode levar a grandes deslocamentos sem o aumento da resistência passiva durante os ciclos de carregamento.

Percebe-se na Figura 4.4.b um aumento da reação lateral até certo nível durante a fase de aquecimento, no entanto durante o resfriamento este valor decresce devido à mobilização da parcela de atrito, e após o reaquecimento a reação lateral volta a aumentar sustentado pela reação passiva do solo [26]. Dependendo do número de ciclos de carregamento, tal comportamento tende a gerar reações suficientes para estabilizar a tubulação.

Comparando-se os gráficos apresentados na Figura 4.4, pode-se afirmar que, no cenário de dutos contidos por valas, o comportamento apresentado na Figura 4.4.a é inadequado para representar a reação lateral do solo.

4.5 DIREÇÃO VERTICAL

A reação vertical do solo pode ser analisada em função da direção de mobilização associada à movimentação do duto, como descrito a seguir:

i. vertical ascendente: o duto movimenta-se no sentido de aumentar o seu enterramento;

ii. vertical descendente: o duto de movimenta no sentido de diminuir o seu enterramento.

4.5.1 REAÇÃO VERTICAL ASCENDENTE

O cálculo simplificado da reação vertical ascendente proposta por Cardoso [26], é mostrado abaixo:

Para areias:

$$F_{va} = N_{qv} \cdot \bar{\gamma}_s \cdot H \cdot D \tag{4.15}$$

Para argilas:

$$F_{va} = N_{cv} \cdot S_u \cdot D \tag{4.16}$$

Caso o duto apresente deslocamentos elevados pode ocorrer o rompimento das camadas de solo sobrejacentes alterando a reação vertical ascendente de forma significativa.

4.5.2 REAÇÃO VERTICAL DESCENDENTE

O cálculo simplificado da reação vertical descendente proposta por Cardoso [26], é mostrado abaixo:

Para areias:

$$F_{vd} = N_q \cdot \gamma_s \cdot H \cdot D + N_\gamma \cdot \bar{\gamma}_s \cdot \frac{D^2}{2} \tag{4.17}$$

Para argilas:

$$F_{vd} = N_c \cdot S_u \cdot D + N_q \cdot \gamma_s \cdot H \cdot D \tag{4.18}$$

No caso de dutos cujo enterramento é igual ou superior a três diâmetros as reações verticais máximas do solo tendem a ser iguais nos dois sentidos [29].

As expressões apresentadas neste item são função dos fatores de capacidade de carga do solo, quando não se dispuser destes, adotar o peso submerso $\left(w_s\right)$ do duto como o valor da reação vertical do solo.

4.6 PENETRAÇÃO INICIAL

Para avaliar corretamente a interação solo-duto é necessário conhecer o enterramento inicial do duto, sendo esta uma das principais fontes de incerteza na determinação das reações do solo.

A norma DNV-RP-F109 [3] recomenda as seguintes expressões para o cálculo da penetração inicial:

Para areias:

$$\frac{z_{pi}}{D} = 0.037 \cdot k_s^{-0.67} \tag{4.19}$$

Para argilas:

$$\frac{z_{pi}}{D} = 0.0071 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{k_c} \right)^{3.2} + 0.062 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{k_c} \right)^{0.7} \tag{4.20}$$

4.7 FORMAÇÃO DE TRINCHEIRAS / MOVIMENTOS CÍCLICOS VERTICAIS

Os movimentos cíclicos ascendentes e descendentes de dutos produzem um bombeamento de água próxima ao solo, denominado *pumping*, podendo formar grandes valas no leito marinho. O fluxo de água resultante transporta os sedimentos do solo marinho para fora da vala, este fenômeno explica a formação de valas como a mostrada na Figura 4.5.

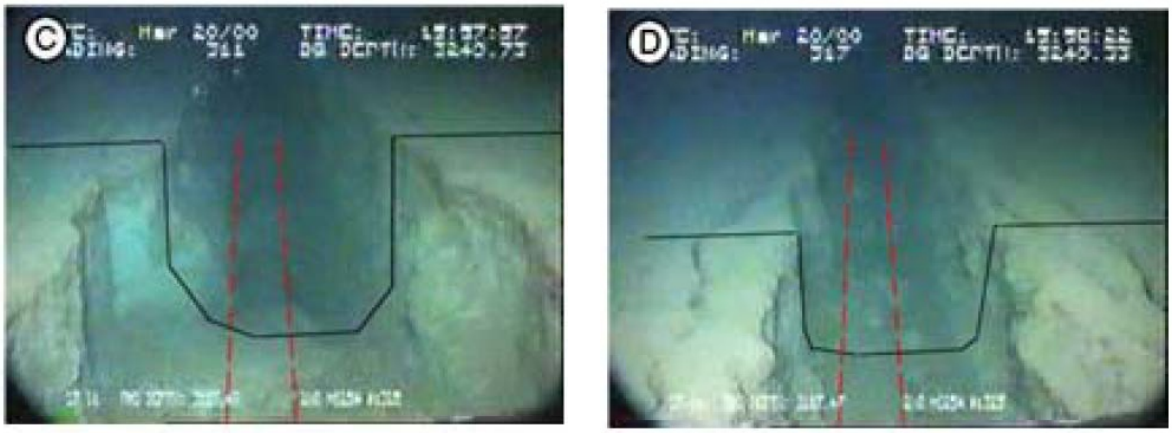


Figura 4.5 – Trincheiras [30].

No caso de uma tubulação apoiada em uma trincheira, a norma DNV-RP-F109 [3] recomenda que, a resistência da parede da trincheira seja considerada através de uma penetração equivalente $\left(z_{pt}\right)$ igual a:

$$\frac{z_{pt}}{D} = \frac{1}{2} \cdot \tan\theta$$
$$z_{pt} \leq \frac{z_t}{2} \tag{4.21}$$

o que corresponde a uma situação na qual o duto se move meio diâmetro na parede da trincheira de ângulo igual a θ, mas limitado a metade da profundidade da vala $\left(z_t\right)$.

4.8 PENETRAÇÃO DEVIDO AO *PIPING*

É um fenômeno bastante conhecido pelos geólogos e consiste na movimentação das partículas do solo devido à percolação de água em solos arenosos. As cargas ambientais atuantes nos dutos apoiados no leito marinho provocam gradientes de pressão hidrodinâmica na tubulação (p_1, p_2), Figura 4.6, estes deslocam camadas de areia imediatamente abaixo do duto provocando seu enterramento e o conseqüente aumento da resistência lateral.

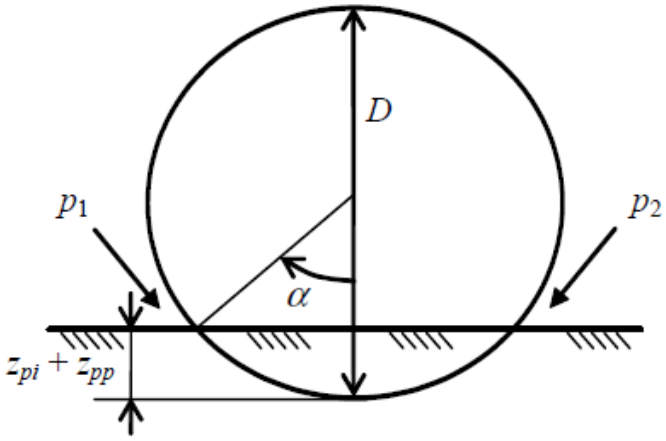


Figura 4.6 – *Piping* [3].

A penetração devido ao *piping* (z_{pp}) irá ocorrer se o gradiente de pressão $\left(\frac{F_Y}{D - z_{pi} - z_{pp}}\right)$ for maior que a resistência do solo, isto é:

$$\frac{F_Y}{\left(D - \underbrace{z_{pi} - z_{pp}}_{z_p}\right)} \geq \gamma_z \cdot \frac{\alpha \cdot D \cdot \tan\varphi_z}{\cos\alpha + \sin\alpha \cdot \tan\varphi_z} \tag{4.22}$$

$$\cos\alpha = 1 - \frac{2 \cdot z_p}{D} \quad , \quad \frac{z_p}{D} \leq 0.20 \tag{4.23}$$

O ângulo de atrito pode variar de 30º, para areias muito fofas, até 43º para areias muito compactas.

A fim de se verificar a possibilidade de ocorrência de *piping*, a carga horizontal $\left(F_Y\right)$ utilizada na equação 4.22 deve corresponder a um período de retorno não superior a um décimo do estado de mar de projeto.

4.9 PENETRAÇÃO TOTAL

O enterramento total pode ser tomado como a soma dos seguintes parâmetros:

- Penetração natural ou inicial $\left(z_{pi}\right)$ devido ao peso próprio do duto, ver item 4.6;
- Penetração devido ao efeito *piping* $\left(z_{pp}\right)$, ver item 4.8;
- Penetração devido à dinâmica de lançamento e movimento do duto sob a ação de ondas e correntes $\left(z_{pm}\right)$, ver item 4.7.

como indicado na equação abaixo.

$$z_p = z_{pi} + z_{pp} + z_{pm} \tag{4.24}$$

5 ESTABILIDADE DE DUTOS APOIADOS NO SOLO MARINHO

5.1 INTRODUÇÃO

Nesta seção descrevem-se as diferentes metodologias de análise e critérios de projeto que vêm atualmente sendo considerados no estudo de estabilidade de dutos submarinos apoiados no leito marinho. Considera-se especificamente a norma DNV-RP-F109 [3] e os documentos emitidos pelo PRCI [4].

Inicialmente, nos itens 5.2 a 5.5 abordam-se os métodos e critérios de estabilidade lateral, um tema relativamente mais complexo. Mais adiante, o item 5.6 trata de critérios de estabilidade vertical.

5.2 RESUMO DOS MÉTODOS E CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE LATERAL

De acordo com a norma DNV-RP-F109 [3], na verificação da estabilidade lateral de dutos podem ser consideradas três metodologias:

i. *"Absolute Lateral Static Stability Method"* ou Método de Estabilidade Estática Absoluta;

ii. *"Generalized Lateral Stability Method"* ou Método de Estabilidade Generalizada;

iii. *"Dynamic Lateral Stability Analysis"* ou Análise Dinâmica de Estabilidade.

Ainda de acordo com a norma DNV-RP-F109 [3], na implementação destas metodologias podem ser considerados os seguintes enfoques:

1) Estabilidade Absoluta: garante que as cargas hidrodinâmicas atuantes no duto sejam menores do que a resistência do solo;

2) Estabilidade Estática com pequenos deslocamentos: permite deslocamentos de até metade do diâmetro da tubulação, de modo a ativar o termo de resistência passiva do solo, mas mantendo-o na sua "cavidade" com deslocamentos independentes do tempo;

3) Acúmulo de Deslocamentos: permite deslocamentos dependentes do histórico de carregamento, porém com estabilidade garantida limitando os deslocamentos máximos da linha.

Estes três enfoques podem ser utilizados pelo projetista através de expressões analíticas (no caso do "*Absolute Lateral Static Stability Method"* descrito no item 3.6 da DNV-RP-F109 [3]), ou de curvas previamente calibradas (no caso do "*Generalized Lateral Stability Method"* descrito no item 3.5 de [3]). Esses enfoques empregando expressões ou curvas pré-calibradas fornecem como resultado direto fatores de segurança contra o movimento da tubulação (em termos gerais, correspondendo à razão entre a carga hidrodinâmica horizontal e a resistência do solo).

Já a metodologia "*Dynamic Lateral Stability Analysis"*, descrita no item 3.4 da DNV-RP-F109 [3], é baseada na geração de modelos e execução de análises dinâmicas para cada configuração específica do duto. Esta metodologia não fornece diretamente os fatores de segurança, mas sim resultados de movimento e tensões da tubulação, que devem ser comparados com valores admissíveis.

Pode ser visto que existe uma correspondência entre essas metodologias (DNV-RP-F109 [3] e os três "níveis" de metodologias de projeto descritos pelo PRCI - *Levels 1, 2, 3*). A grosso modo,

poderia-se dizer que o nível 1 do PRCI corresponderia ao método Estabilidade Estática Absoluta; o nível 2 corresponderia ao método Estabilidade Generalizada, e o nível 3 corresponderia à Análise Dinâmica de Estabilidade.

Nos itens a seguir descrevem-se essas metodologias, com enfoque nas duas primeiras, as quais estão sendo consideradas no presente trabalho.

5.3 MÉTODO DE ESTABILIDADE ESTÁTICA ABSOLUTA

A Estabilidade Estática Absoluta é a metodologia mais simples de projeto e verificação de estabilidade lateral de dutos apoiados, tendo as seguintes características:

- Segue o enfoque de Estabilidade Absoluta [3], não tolerando deslocamentos do duto;
- Garante que a resultante horizontal das cargas hidrodinâmicas atuando no duto é menor do que a resistência do solo (Figura 5.1), e que a carga vertical de *lift* é menor do que o peso submerso.

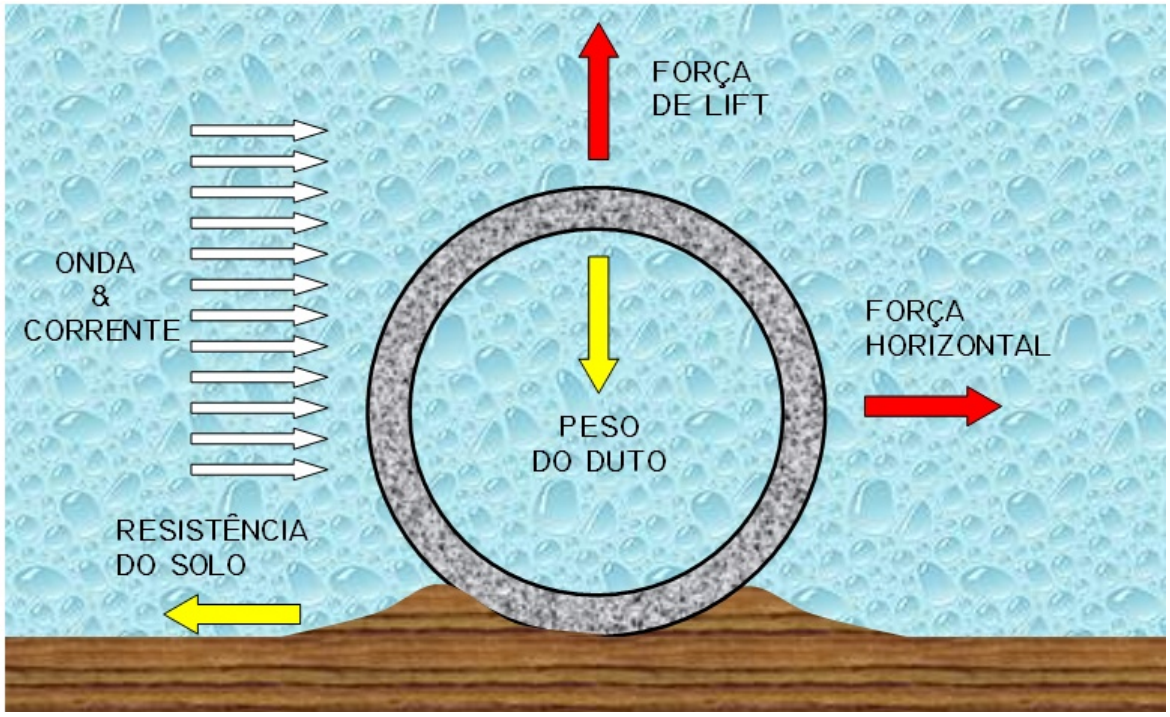


Figura 5.1 – Equilíbrio de forças.

Este método considera as seguintes hipóteses:

i. Para o carregamento de onda, toma-se uma única componente de onda regular e unidirecional;

ii. Tomando os parâmetros da onda regular, utiliza-se uma teoria linear de onda (como as descritas mais adiante no item 6.3) para obter as velocidades e acelerações da água ao nível do duto;

iii. Tomando as velocidades e acelerações da água, as cargas hidrodinâmicas horizontais de arraste F_D e inércia F_I (e também a carga vertical de *lift* F_L) são calculadas através

da formulação de Morison (descrita adiante item 6.4), supondo-se que o duto esteja estacionário;

iv. A resistência do solo tem uma parcela determinada por um coeficiente de atrito μ_{lat} (ver item 4.3.1) com uma parcela puramente friccional $\left(\mu_f\right)$ e outra parcela correspondente à resistência passiva F_R gerada pela penetração inicial (ver item 4.3.2).

Assim, segundo a norma DNV-RP-F109 [3], para que um duto seja considerado estável por este método é necessário que atenda às duas condições apresentadas a seguir, respectivamente para o movimento lateral e vertical, dentro de um dado fator de segurança γ_{sc}.

A primeira condição corresponde ao equilíbrio estático entre as componentes horizontais de forças hidrodinâmicas (no numerador) e a resistência do solo (no denominador):

$$\gamma_{sc} \cdot \frac{\left(F_D + F_I\right) + \mu \cdot F_L}{\mu \cdot w_s + F_R} \leq 1.0 \qquad (5.1)$$

A segunda corresponde ao equilíbrio estático entre as cargas verticais (peso submerso do duto w_s e a carga de *lift* F_L):

$$\gamma_{sc} \cdot \frac{F_L}{w_s} \leq 1.0 \qquad (5.2)$$

Em síntese, por este método o projetista seleciona um conjunto de valores para os parâmetros de projeto do duto, de modo a obter um peso submerso mínimo que evite o movimento do duto sob a ação do carregamento ambiental. O fator de segurança γ_{sc} deve ser selecionado de forma conservativa, procurando representar o nível de conhecimento nos dados de projeto (quanto maior desconhecimento nos dados de projeto, maior deverá ser o fator de segurança utilizado).

A norma DNV-RP-F109 [3], no item 3.6.3, recomenda fatores de segurança para estados de mar de inverno em diferentes regiões do globo, cujos valores são apresentados nas tabelas a seguir.

Tabela 5.1 - Fator de Segurança: Tempestade de Inverno no Mar do Norte.

γ_{sc} - Tempestade de Inverno: Mar do Norte			
Tipo de Solo	Baixo	Normal	Alto
Areia e Pedra	0.98	1.32	1.67
Argila	1.00	1.4	1.83

Tabela 5.2 - Fator de Segurança: Tempestade de Inverno no Golfo do México e no Mar do Sul.

γ_{sc} - Tempestade de Inverno: Golfo do México e Oceano Antártico			
Tipo de Solo	Baixo	Normal	Alto
Areia e Pedra	0.95	1.41	1.99
Argila	0.97	1.50	2.16

Mais adiante, serão fornecidas expressões para o cálculo das parcelas de carga hidrodinâmica e peso submerso envolvidas nas equações 5.1 e 5.2 (todas por unidade de comprimento). A força de arraste F_D é dada pelas equações 6.11 e 6.21; a força de inércia F_I é dada pela equação 6.12; a força de *lift* F_l é dada pelas equações 6.14, 6.22. O cálculo do peso submerso do duto é descrito no item 7.4.

5.4 MÉTODO DE ESTABILIDADE GENERALIZADA

5.4.1 DESCRIÇÃO

Ao contrário do método de estabilidade absoluta descrito no item anterior, o método "generalizado" de estabilidade lateral, ou *"Generalized Lateral Stability Method"* como proposto pela DNV-RP-F109 [3], admite deslocamento lateral para o duto ainda que limitado, sob a ação de um espectro de onda oscilatória de projeto que induz velocidades perpendiculares ao duto.

Neste método, o valor admissível para o deslocamento lateral pode ser estabelecido como um valor que não resulte em solicitações superiores às suportáveis pelo duto, evitando problemas como deformações ou tensões excessivas. Com isso, este método pode levar a significativas reduções no peso requerido para o duto.

A DNV-RP-F109 [3] sugere duas faixas para o deslocamento lateral admissível:

- Até metade do diâmetro da tubulação, considerando dutos "virtualmente estáveis";
- Até dez vezes o diâmetro.

Também diferentemente do método de estabilidade absoluta, que considerava uma única componente de onda regular, no método "generalizado" considera-se o estado de mar representado por um espectro de ondas, do qual são derivados os seguintes parâmetros: U_s (velocidade oscilatória) e T_u *(*período de cruzamento zero), os quais também estão associados à velocidade constante de correnteza V.

5.4.2 OBTENÇÃO DO PESO REQUERIDO: CURVAS DE PROJETO

Para obter valores de peso do duto requerido para atender ao critério de estabilidade global, a DNV-RP-F109 [3] estabelece curvas de projeto calibradas a partir de resultados de um grande número de análises dinâmicas. As análises dinâmicas empregadas na montagem dessas curvas foram realizadas considerando fundo plano horizontal, e ignorando efeitos de flexão e cargas axiais geradas por temperatura, pressão e restrições nas extremidades da tubulação.

O resultado da aplicação dessas curvas de projeto é o parâmetro de peso significativo L, definido como:

$$L = \frac{w_s}{0.5 \cdot \rho_w \cdot D \cdot U_s{}^2} \leq 1.0 \tag{5.3}$$

Desta forma, o parâmetro peso significativo necessário para levar a uma tubulação "virtualmente estável" (com deslocamentos menores do que meio diâmetro) é denotado por L_{stable}, enquanto o peso requerido para a obtenção de deslocamento lateral menor que 10 vezes o diâmetro é denominado L_{10}. Critérios intermediários de deslocamento podem ser estabelecidos, definindo-se o peso requerido L_Y para um deslocamento admissível Y de acordo com a seguinte fórmula:

$$\log\left(L_Y\right) = \log\left(L_{stable}\right) + \frac{\log\left(\frac{L_{stable}}{L_{10}}\right)}{\log\left(\frac{0.5}{0.01\,\tau}\right)} \log\left(\frac{Y}{0.5}\right) \tag{5.4}$$

De acordo com a DNV-RP-F109 [3], esta aproximação é aplicável a $N \leq 0.024$ para argilas e $N > 0.048$ para areias, onde N é o fator de aceleração espectral e τ é o número de ondas do estado de mar, dado por:

$$N = \frac{U_s}{g \cdot T_u}$$
$$\tau = \frac{T}{T_u} \tag{5.5}$$

Ainda segundo a DNV-RP-F109 [3], L_{10} é válido para 1000 ondas e pode ser assumido como proporcional ao número de ondas τ do estado de mar. Já L_{stable} independe da duração do estado de mar. Caso $L < L_{stable}$, o deslocamento deve ser considerado de modo conservador variando linearmente com o número de ondas do estado de mar:

$$Y_{\tau} = 0.5 + (10 - 0.5)\frac{\tau}{1000} = 0.5 + 0.0095\,\tau \qquad (5.6)$$

Por exemplo, um estado de mar com de duração de três horas ou 10800s e período de cruzamento zero T_u > 10.8s pode submeter o duto a menos do que 1000 ondas; desta forma a expressão acima pode ser empregada para reduzir o deslocamento esperado.

5.4.3 RECOMENDAÇÕES PARA UTILIZAÇÃO DAS CURVAS DE PROJETO

No estabelecimento das curvas de projeto, considera-se que o deslocamento lateral Y é governado por um conjunto de parâmetros adimensionais, como definido a seguir:

$$Y = f\left(L, K, M, N, \tau, G_S, G_C\right) \tag{5.7}$$

onde, além dos parâmetros já definidos anteriormente, tem-se:

K é o número significativo de Keulegan-Carpenter, $K = \frac{U_s T_u}{D}$;

M é a relação entre velocidades, corrente e onda espectral de projeto, $M = \frac{V}{U_s}$;

G_s é o parâmetro de densidade do solo (areia), $G_s = \frac{\gamma'_s}{g\,\rho_w}$;

G_c é o parâmetro de densidade do solo (argila), $G_C = \frac{S_u}{D\,\gamma_s}$;

ρ_w é a densidade da água, $\rho_w = 1025\ \frac{kg}{m^3}$;

Considerando-se estas expressões, pode-se determinar o peso específico do duto através da seguinte equação:

$$S_g = 1 + \frac{2}{\pi} N\,K\,L \tag{5.8}$$

A norma DNV-RP-F109 [3] indica que esta metodologia não pode ser utilizada para dutos com $S_g < 1.05$ e $S_g > 3$.

Existem outros casos onde a norma DNV-RP-F109 [3] recomenda o uso do método de estabilidade absoluta descrito acima no item 5.3 ao invés do método "generalizado" descrito neste item; por exemplo,

- Para solos argilosos com valores de Gc > 2.78, e
- Em águas profundas, onde K pode ser muito pequeno quando comparado ao valor de M, visto que a presença de corrente acarreta uma grande elevação no valor de M

5.4.4 CURVAS DE PROJETO PARA SOLOS ARENOSOS

De acordo com a DNV-RP-F109 [3], o peso mínimo requerido do duto para obter uma configuração "virtualmente estável" pode ser obtido com base nas Tabelas a seguir. Observa-se que a tabela para $K \geq 10$ depende de K mas não depende de N, enquanto a tabela para $K \leq 5$ depende de N mas não depende de K.

Tabela 5.3 – Peso mínimo, $\frac{L_{stable}}{(2+M)^2}$, para dutos em areia, $K \geq 10$.

M \ K	10	15	20	30	40	≥ 60
≤ 0,2	1,5	1,42	1,35	1,25	1,22	1,22
0,4	1,82	1,7	1,61	1,53	1,5	1,5
0,5	2,19	1,97	1,83	1,69	1,61	1,61
0,6	2,65	2,35	2,18	1,99	1,85	1,72
0,8	3,05	2,55	2,32	2,13	2,01	1,9
1,0	3,05	2,55	2,4	2,2	2,06	1,95
1,5	2,65	2,45	2,36	2,24	2,11	2,09
2,0	2,5	2,4	2,35	2,27	2,22	2,19
4,0	2,45	2,4	2,39	2,37	2,37	2,37
≥ 10,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5

Tabela 5.4 – Peso mínimo, $\frac{L_{stable}}{(2+M)^2}$, para dutos em areia, $K \leq 5$.

M \ N	0,003	0,006	0,012	0,024	0,048
≤ 0,2	1,55	1,45	1,34	1,24	1,13
0,4	2	1,65	1,34	1,24	1,13
0,5	3,3	2,6	1,91	1,24	1,13
0,6	3,75	3,07	2,38	1,7	1,13
0,8	4	3,45	2,9	2,36	1,81
1,0	3,9	3,5	3,1	2,71	2,31
1,5	3,25	3,13	3	2,88	2,75
2,0	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
4,0	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
≥ 10,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5

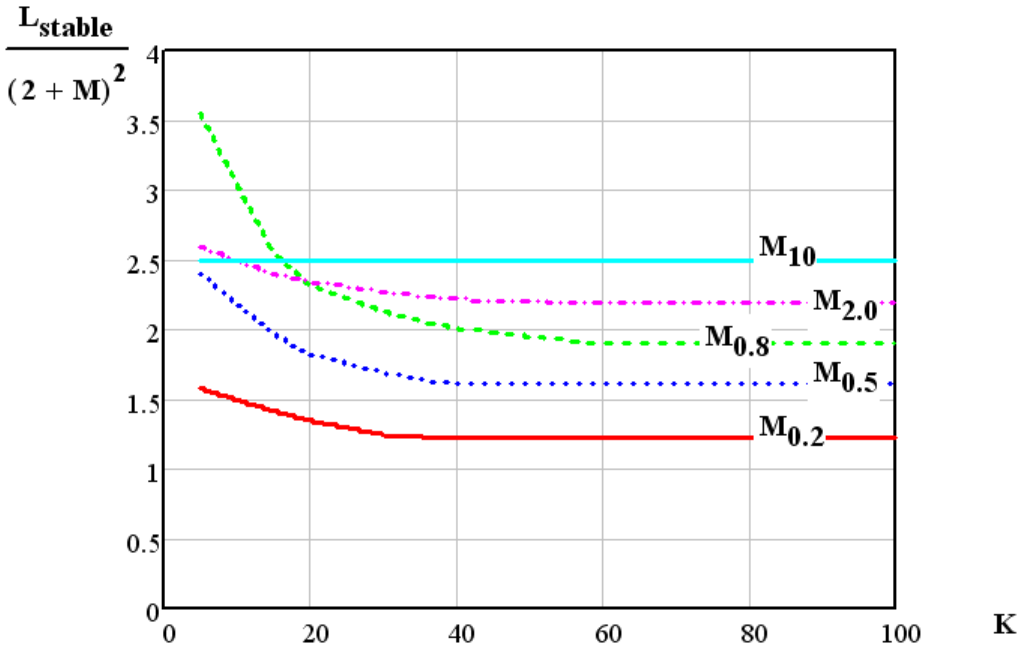


Figura 5.2 – Peso mínimo, $\frac{L_{stable}}{(2+M)^2}$, para dutos em areia

Caso seja considerado o deslocamento lateral admissível até 10 diâmetros do duto, aplica-se a seguinte tabela para determinar o peso mínimo requerido para a tubulação em solos arenosos:

Tabela 5.5 – Peso mínimo, $\frac{L_{10}}{(2+M)^2}$, para dutos em areia.

M \ K	≤ 5	10	15	20	30	40	60	≥ 100
≤ 0,2	0,20	0,41	0,61	0,81	0,69	0,69	0,69	0,69
0,4	0,31	0,62	0,93	0,81	0,75	0,72	0,70	0,70
0,5	0,34	0,69	1,03	0,93	0,83	0,78	0,75	1,00
0,6	0,79	1,20	1,13	1,10	1,07	1,05	1,03	1,02
0,8	0,85	1,40	1,37	1,35	1,33	1,33	1,32	1,31
1,0	1,60	1,50	1,47	1,45	1,43	1,43	1,42	1,41
1,5	1,80	1,70	1,67	1,65	1,63	1,63	1,62	1,61
2,0	1,90	1,80	1,77	1,75	1,73	1,73	1,72	1,71
4,0	2,10	2,00	1,97	1,95	1,93	1,93	1,92	1,91
≥ 10,0	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50

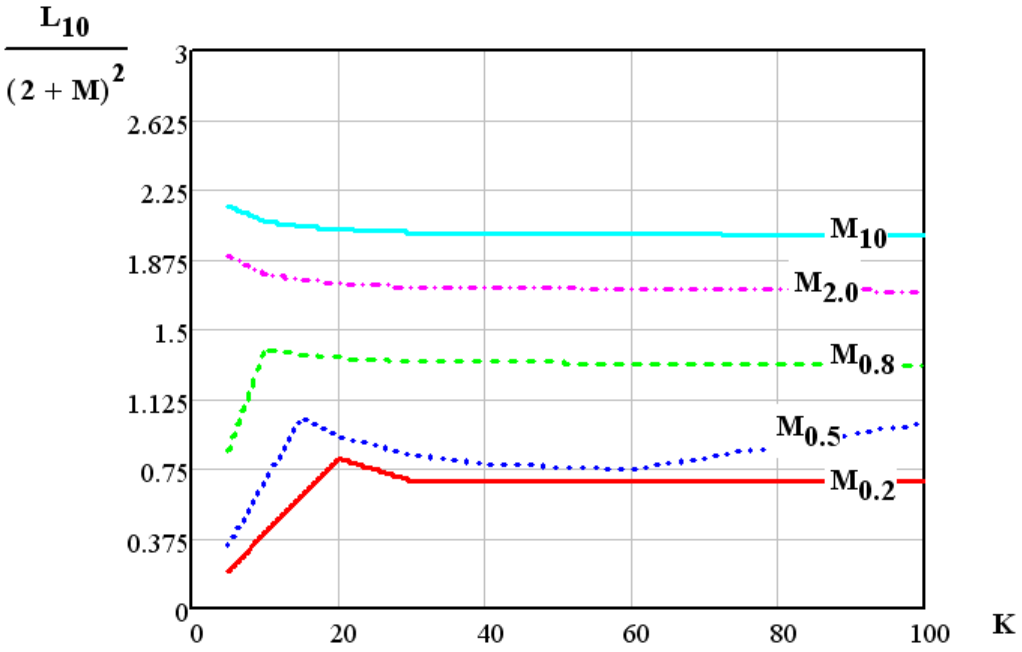


Figura 5.3 – Peso mínimo, $\frac{L_{10}}{(2+M)^2}$, para dutos em areia

5.4.5 SOLOS ARGILOSOS

Para solos argilosos, a DNV-RP-F109 [3] estabelece as seguintes expressões para determinar o peso mínimo da tubulação requerido no critério "virtualmente estável" (com deslocamento máximo Y igual a 0.5 D)

$$L_{stable} = 90 \sqrt{\frac{G_c}{N^{0.67} K}} f(M) \tag{5.9}$$

$$f(M) = \left[0.58 \log(M)^2 + 0.60 \log(M) + 0.47\right]^{1.1} \leq 1.0 \tag{5.10}$$

Como já mencionado, para valores elevados de G_c esta fórmula pode resultar em um peso excessivo. Neste caso o método de estabilidade absoluta descrito acima no item 5.3 pode levar a dutos mais leves.

Para determinar o peso mínimo da tubulação requerido em um critério que admita deslocamentos maiores, pode ser empregada a fórmula a seguir, que corresponde a limitar o deslocamento relativo máximo Y a $10 \frac{\tau}{1000}$:

$$\frac{L_{10}}{(2+M)^2} = \begin{cases} C_1 + \dfrac{C_2}{K^{C_3}} \text{ para } K \geq K_b \\ C_1 + \dfrac{C_2}{K_b^{C_3}} \text{ para } K < K_b \end{cases} \tag{5.11}$$

Os coeficientes envolvidos nesta fórmula estão tabulados no apêndice A da norma DNV-RP-F109 [3].

5.5 ANÁLISE DINÂMICA DE ESTABILIDADE

A metodologia de Análise Dinâmica de Estabilidade é baseada na geração de modelos e execução de análises dinâmicas sob carregamentos hidrodinâmicos de correnteza e onda (com estado de mar irregular), para cada configuração específica do duto, levando em conta as forças de resistência do solo.

Ao invés de fornecer diretamente os fatores de segurança contra o movimento do duto e/ou indicar os valores mínimos de peso requeridos para que o critério de movimento seja excedido, como no caso dos métodos descritos nos itens anteriores, esta metodologia fornece resultados de movimentos e tensões do duto. Estes resultados compõem os critérios de projeto, devendo ser comparados com seus correspondentes valores limites pré-estabelecidos, para então se obter os fatores de segurança envolvidos.

5.6 CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE VERTICAL

Complementando os critérios de estabilidade lateral apresentados nos itens anteriores, a DNV-RP-F109 [3] faz as seguintes considerações quanto à estabilidade vertical.

Para se evitar a flutuação do duto, seu peso submerso deve respeitar o seguinte critério:

$$\gamma_W \frac{B}{W_s + B} = \frac{\gamma_W}{S_g} \leq 1 \qquad (5.12)$$

A norma DNV-RP-F109 [3] recomenda adotar o valor 1.1 para o fator de segurança γ_w, no caso de não se garantir uma probabilidade suficientemente baixa de empuxo negativo.

Dutos que durante a sua instalação são enterrados parcial ou totalmente no leito marinho devem ser verificados quanto à possibilidade de afundamento ou flutuação (respectivamente em situações de duto cheio e vazio).

Estas verificações dependem da relação entre os pesos específicos do duto e do solo, e também da resistência ao cisalhamento do solo. Caso o peso do duto seja menor que o do solo, não há necessidade de verificar o afundamento; porém em solos com baixa resistência ao cisalhamento, e probabilidade do solo se liquefazer, pode ser necessário verificar a flutuação; para garantir que o duto permaneça enterrado, deve-se garantir que o peso do duto não seja menor que o do solo.

Ainda em solos com baixa resistência ao cisalhamento, e peso específico menor que o do duto, pode ser necessário verificar o afundamento.

6 CÁLCULO DAS FORÇAS HIDRODINÂMICAS, CONSIDERANDO A INTERAÇÃO SOLO X DUTO

6.1 INTRODUÇÃO

Para aplicar os critérios de estabilidade descritos na seção anterior, é necessário empregar métodos para o cálculo das forças hidrodinâmicas que atuam em dutos submarinos.

Assim, neste capítulo descrevem-se as formulações tradicionalmente consideradas para calcular as forças atuantes na tubulação, geradas por carregamentos ambientais de onda e correnteza, acrescidas de considerações especiais para dutos apoiados no leito marinho.

Inicialmente, os itens 6.2 e 6.3 descrevem respectivamente as formulações que representam matematicamente a movimentação das partículas do fluido (água) no nível da tubulação, geradas pela correnteza e pelas ondas.

Finalmente, o item 6.4 descreve a utilização da formulação de Morison, na determinação de velocidades e acelerações do fluido no nível do duto devido à onda e corrente e como calcular as cargas atuando na tubulação. Neste item apresentam-se considerações específicas para dutos apoiados no leito marinho, em termos de fatores de redução de carga para levar em conta a interação solo-duto.

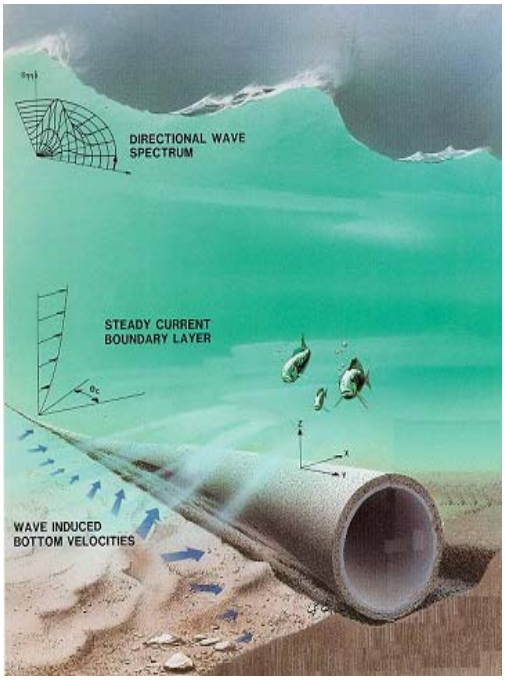


Figura 6.1 – Cargas ambientais atuantes em um duto submarino. [31]

6.2 CORRENTE

Diferentes tipos de correnteza marinha podem gerar um fluxo constante de água que se desloca no nível do duto. A correnteza pode ser induzida por ventos, marés, tempestades, e diferenças de pressão. Como resultado desses efeitos, normalmente tem-se um perfil de velocidades que varia com a profundidade, em geral reduzindo-se à medida que se aproxima do leito marinho.

Para determinar a velocidade próxima ao fundo, a norma DNV-RP-F109 [3] permite determinar um valor para a velocidade reduzida da correnteza V levando em conta a rugosidade do solo z_0 , através da seguinte expressão:

$$V(z) = V(z_r)\frac{\ln(z + z_0) - \ln(z_0)}{\ln(z_r + z_0) - \ln(z_0)}\sin(\theta_c) \tag{6.1}$$

Nesta expressão *z* é a elevação acima do leito marinho; z_r é a altura de referência da velocidade de corrente, e θ_c é o ângulo entre a direção da corrente e do duto. Valores para a rugosidade do solo z_0 podem ser encontrados na Tabela 6.1, em função do tipo do solo e do diâmetro médio do grão d_{50} .

Desta forma, a componente normal da velocidade reduzida da corrente V_c atuando em uma tubulação com diâmetro D pode ser calculada pela seguinte fórmula [3]:

$$V_c = V_c(z_r)\left[\frac{\left(1 + \frac{z_0}{D}\right)\ln\left(\frac{D}{z_0} + 1\right) - 1}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0} + 1\right)}\right]\sin(\theta_c) \tag{6.2}$$

Tabela 6.1 – Rugosidade do solo do leito marinho. [3]

Tipo de Solo	Diâmetro Médio do Grão, d_{50} [mm]	Rugosidade, z_0 [m]
Silte e Argila	0.0625	$\approx 5\ 10^{-6}$
Areia fina	0.25	$\approx 1\ 10^{-5}$
Areia média	0.5	$\approx 4\ 10^{-5}$
Areia grossa	1.0	$\approx 1\ 10^{-4}$
Cascalho	4.0	$\approx 3\ 10^{-4}$
Seixo	25	$\approx 2\ 10^{-3}$
Cobble	125	$\approx 1\ 10^{-2}$
Boulder	500	$\approx 4\ 10^{-2}$

6.3 ONDAS: TEORIA LINEAR DE AIRY

De acordo com Chakrabarti [32], a Teoria Linear de Airy (também conhecida como Teoria da Onda Senoidal) é a mais simples e a mais utilizada para aplicações gerais dentre as teorias de onda.

Esta teoria basea-se na premissa de que a altura de onda é pequena comparada com o comprimento de onda ou a profundidade da água. Esta premissa permite que as condições de contorno de superfície livre sejam satisfeitas no nível médio de águas tranqüilas e não no nível real da elevação da onda. Para tanto, as condições de contorno são linearizadas, desprezando os termos de segunda ordem e de ordens superiores, obtendo-se apenas a solução de primeira ordem.

A Figura 6.2 ilustra os parâmetros que definem uma onda regular, e que são considerados nas expressões deduzidas pela Teoria de Airy para o cálculo das velocidades e acelerações no nível do duto devido à passagem da onda:

i. Altura e amplitude da onda, respectivamente H e *a*;
ii. Profundidade da água, *d*;
iii. Período da onda, *T*;
iv. Comprimento da onda, *L*.

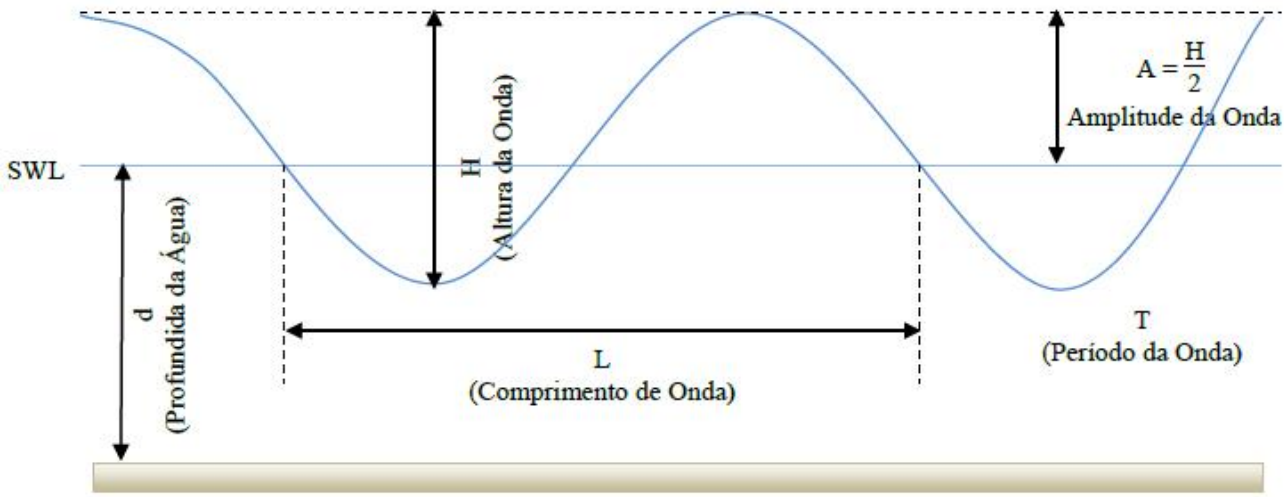


Figura 6.2 – Desenho Esquemático de uma Onda Regular.

Detalhes sobre a formulação de Airy podem ser encontrados em [32]. A seguir apresentam-se apenas algumas expressões básicas.

A expressão da elevação da superfície da onda η, que corresponde a um trem de ondas regulares se movendo na direção-*x* (horizontal), pode ser dada por:

$$\eta(x,t) = a\cos(k\,x - \omega\,t) \qquad (6.3)$$

Nesta expressão surge outro parâmetro necessário para o cálculo dos movimentos da onda, que é o número de onda *k*. Este número é encontrado iterativamente a partir da Equação de Dispersão, que fornece uma relação de dispersão linear, e relaciona a freqüência angular da onda ω e o número de onda *k* em lâminas d'água com profundidade *d*.

$$\omega^2 = g\, k \tanh(k\, d) \qquad (6.4)$$

O processo iterativo para obtenção do número de onda *k*, é esquematizado pelo diagrama abaixo.

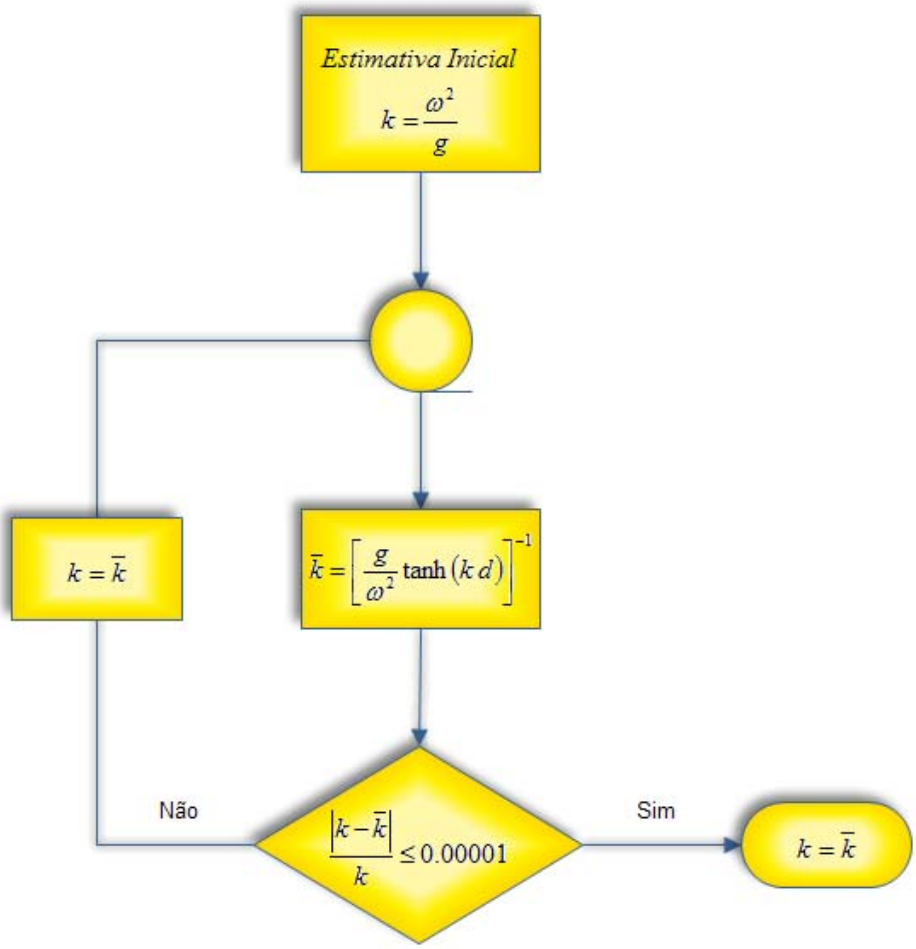


Figura 6.3 – Diagrama do Processo Iterativo para Obtenção do Numero de Onda k

Conhecendo o número da onda k pode-se calcular o comprimento da onda L com base na seguinte fórmula [32]:

$$L = \frac{g\, T^2}{2\pi} \tanh(k\, d) \qquad (6.5)$$

onde g é aceleração da gravidade, $g = 9.807\ \frac{m}{s^2}$ (6.6)

As velocidades das partículas de água nas direções horizontal e vertical, em função do tempo *t* e das posições vertical e horizontal η e ξ, podem ser obtidas através das seguintes expressões [32]:

$$\dot{u} = \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} = \frac{g\,k\,a}{\omega} \frac{\cosh k(\eta + d)}{\cosh kd} \cos(k\,\xi - \omega\,t - \theta) \tag{6.7}$$

$$\dot{w} = \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} = \frac{g\,k\,a}{\omega} \frac{\operatorname{senh} k(\eta + d)}{\cosh kd} \operatorname{sen}(k\,\xi - \omega\,t - \theta) \tag{6.8}$$

As acelerações da partícula do fluido nas direções horizontal e vertical são dadas por:

$$\ddot{u} = \frac{\partial \dot{u}}{\partial t} = g\,k\,a \frac{\cosh k(\eta + d)}{\cosh kd} \operatorname{sen}(k\,\xi - \omega\,t - \theta) \tag{6.9}$$

$$\ddot{w} = \frac{\partial \dot{w}}{\partial t} = -\,g\,k\,a \frac{\operatorname{senh} k(\eta + d)}{\cosh kd} \cos(k\,\xi - \omega\,t - \theta) \tag{6.10}$$

Nessas expressões ω é a freqüência angular, dada por $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

Independente da formulação adotada para a representação das ondas, as velocidades e acelerações que caracterizam o movimento das partículas de água, calculadas no nível do duto, devem ser somadas algebricamente com a velocidade de corrente definida no item anterior, para compor a velocidade atuante na tubulação.

6.4 CÁLCULO DAS FORÇAS HIDRODINÂMICAS: FÓRMULA DE MORISON

6.4.1 FORMULAÇÃO BÁSICA

Calculada a velocidade atuante no duto o próximo passo para o cálculo das forças hidrodinâmicas é empregar a formulação de Morison.

A formulação de Morison é válida para corpos esbeltos como dutos, com dimensão transversal característica D pequena em comparação com o comprimento de onda λ. A formulação de Morison assume que as forças podem ser calculadas através de uma aproximação, na qual os parâmetros do fluxo na superfície do corpo (incluindo a velocidade e aceleração) podem ser aproximados pelo valor correspondente no eixo da seção transversal do duto.

Na dedução da formulação de Morison considera-se que a força hidrodinâmica (por unidade de comprimento) é composta pela soma de duas parcelas:

i. Uma parcela de *arraste* F_D associada a efeitos viscosos, proporcional ao quadrado da velocidade relativa fluido *x* duto;

ii. Uma parcela de *inércia* F_I, proporcional às acelerações do fluido e do duto.

Estas parcelas podem ser expressas da seguinte forma:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_{sw} D C_D U(t) \left| U(t) \right| \tag{6.11}$$

$$F_I = \frac{\pi}{4} \rho_{sw} D^2 C_M a(t) \tag{6.12}$$

A equação de Morison pode ser expressa da seguinte forma:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{2} \rho_w D C_D \left| \dot{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{x}} \right| (\dot{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{x}}) + \rho_w \frac{\pi D^2}{4} C_M \ddot{\mathbf{u}} - \rho_w C_a \ddot{\mathbf{x}} \tag{6.13}$$

Nestas expressões, ρ_w é a massa específica do fluido; D é o diâmetro externo do duto; e $\dot{u}$, $\dot{x}$, $\ddot{u}$ e $\ddot{x}$ são respectivamente as velocidades e acelerações do fluido e do corpo.

A formulação de Morison é considerada semi-empírica, já que as parcelas de arraste e inércia são afetadas por coeficientes adimensionais C_D, C_M e C_a, que devem ser calibrados a partir da observação de resultados experimentais. Por exemplo, na análise de linhas de ancoragem e *risers* usualmente empregam-se valores de C_D variando entre 0.7 e 1.2, e valores de C_M em torno de 2.0. O

terceiro termo, afetado pelo coeficiente C_a (usualmente definido como Cm – 1) é proporcional às acelerações do corpo e está associado a efeitos de "massa adicionada".

Além das parcelas de força horizontal apresentadas acima, uma expressão semelhante à parcela de arraste pode ser estabelecida para determinar a força vertical de *lift* (F_L), transversal à direção do fluxo:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_{sw} D C_L U^2(t) \qquad (6.14)$$

6.4.2 FATORES DE REDUÇÃO DE CARGA DEVIDO À INTERAÇÃO SOLO-DUTO

A norma DNV-RP-F109 [3] indica algumas restrições ao uso da Formulação de Morison para aplicações em dutos apoiados no leito marinho e sujeitos a deslocamentos laterais sob cargas hidrodinâmicas. Estas restrições estariam associadas ao cálculo das forças hidrodinâmicas baseado em coeficientes invariantes no tempo.

Especialmente para tratar fenômenos ligados à interação do duto com o solo, a norma sugere introduzir fatores de redução de carga, para levar em conta a permeabilidade do leito marinho, a penetração do duto no leito marinho, e o entrincheiramento. Tais fatores são apresentados a seguir, tomando-se subscritos "*i*" e "*y*" que se referem às componentes horizontais, e subscrito "z" referindo-se à componente vertical.

Redução de Carga Devido à Permeabilidade do Solo

O leito marinho permeável admite fluxo de água pelos vazios do solo, passando abaixo do duto, o que pode acarretar em uma redução de carga vertical. Para levar este efeito em conta, em [3] recomenda-se aplicar o seguinte fator para redução de carga:

$$r_{perm,z} = 0.7 \qquad (6.15)$$

Redução de Carga Devido à Penetração

Para levar em conta a redução de carga devido a uma penetração z_p , como ilustrado na figura a seguir, introduzem-se os seguintes fatores que afetam tanto a direção vertical quanto a horizontal [3]:

$$r_{pen,y} = 1.0 - 1.4\frac{z_p}{D} \geq 0.3 \tag{6.16}$$

$$r_{pen,z} = 1.0 - 1.3\left(\frac{z_p}{D} - 0.1\right) \geq 0.0 \tag{6.17}$$

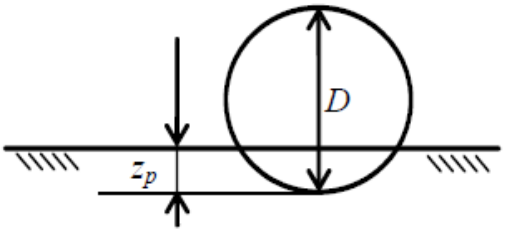


Figura 6.4 – Definição dos parâmetros da penetração. [3]

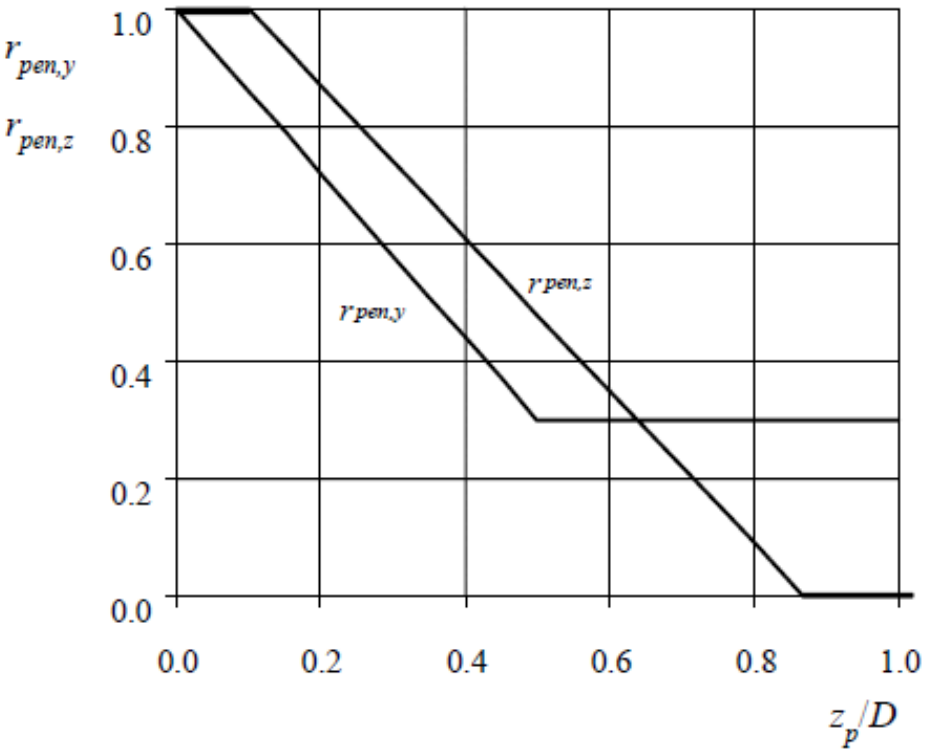


Figura 6.5 – Fator de Redução devido à penetração. [3]

Redução de Carga Devido a Formação de Trincheiras

Para levar em conta a redução de carga devido a um entrincheiramento de profundidade z_t, como ilustrado na figura a seguir, introduzem-se também fatores que afetam tanto a direção vertical quanto a horizontal. A profundidade da trincheira deve ser medida com relação ao leito marinho e sua largura deve ser menor que 3D (três vezes o diâmetro externo do duto). Os fatores são dados pelas seguintes expressões [3]:

$$r_{tr,y} = 1.0 - 1.18\,(\theta - 5)^{0.25}\left(\frac{z_t}{D}\right)^{0.42}, \qquad 5 \le \theta \le 45 \tag{6.18}$$

$$r_{tr,z} = 1.0 - 1.14\,(\theta - 5)^{0.43}\left(\frac{z_t}{D}\right)^{0.46}, \qquad 5 \le \theta \le 45 \tag{6.19}$$

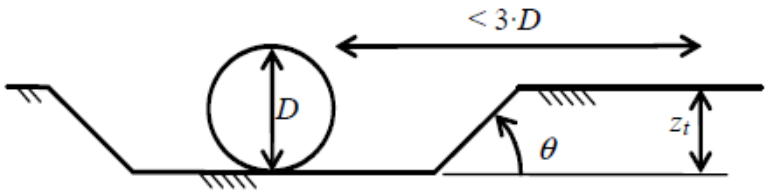


Figura 6.6 - Definição dos Parâmetros do Entrincheiramento. [3]

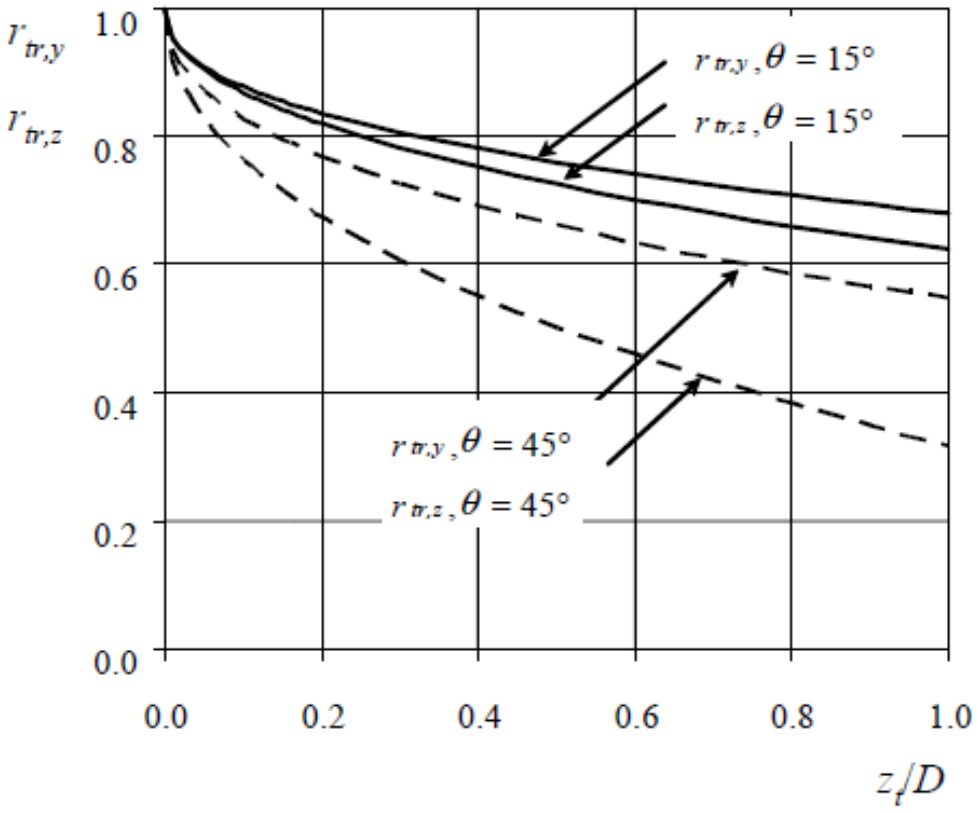


Figura 6.7 – Fator de Redução devido ao Entrincheiramento. [3]

6.4.3 CÁLCULO DAS FORÇAS HIDRODINÂMICAS ACRESCIDAS DOS FATORES DE REDUÇÃO

Finalmente, reescrevem-se a seguir as expressões para o cálculo das forças hidrodinâmicas pela fórmula de Morison, levando em conta os fatores de redução devido à interação solo-duto apresentados no item anterior.

Pode-se definir um fator total de redução da carga pela seguinte expressão:

$$r_{tot,i} = r_{perm,i}\, r_{pen,i}\, r_{trench,i} \tag{6.20}$$

Conforme proposto no item 3.6.4 da norma DNV-RP-F109 [3], no contexto do método de estabilidade absoluta, as cargas hidrodinâmicas horizontal e vertical ajustadas por este fator de redução podem ser calculas através das fórmulas apresentadas a seguir:

Força Horizontal, $$F_y^* = r_{tot,y} \frac{1}{2} \rho_{sw} D C_y^* (U^* + V^*)^2 \tag{6.21}$$

Força de Vertical, $$F_z^* = r_{tot,z} \frac{1}{2} \rho_{sw} D C_z^* (U^* + V^*)^2 \tag{6.22}$$

onde:

ρ_{sw} - Massa específica da água;

U^* - Amplitude da velocidade oscilatória para a onda regular de projeto, perpendicular ao duto;

V^* - Valor médio da velocidade constante associada à oscilação de projeto.

Valores para os coeficientes de pico de carga horizontal C_y^* e vertical C_z^*: definidos em [3] são apresentados respectivamente na Tabela 6.2 / Figura 6.8, e na Tabela 6.3 / Figura 6.9.

Tabela 6.2 – Coeficiente de pico de carga horizontal. [3]

C_Y^*		K^*										
		2.5	*5*	*10*	*20*	*30*	*40*	*50*	*60*	*70*	*100*	*≥140*
M^*	0.0	13.0	6.80	4.55	3.33	2.72	2.40	2.15	1.95	1.80	1.52	1.30
	0.1	10.7	5.76	3.72	2.72	2.20	1.90	1.71	1.58	1.49	1.33	1.22
	0.2	9.02	5.00	3.15	2.30	1.85	1.58	1.42	1.33	1.27	1.18	1.14
	0.3	7.64	4.32	2.79	2.01	1.63	1.44	1.33	1.26	1.21	1.14	1.09
	0.4	6.63	3.80	2.51	1.78	1.46	1.32	1.25	1.19	1.16	1.10	1.05
	0.6	5.07	3.30	2.27	1.71	1.43	1.34	1.29	1.24	1.18	1.08	1.00
	0.8	4.01	2.70	2.01	1.57	1.44	1.37	1.31	1.24	1.17	1.05	1.00
	1.0	3.25	2.30	1.75	1.49	1.40	1.34	1.27	1.20	1.13	1.01	1.00
	2.0	1.52	1.50	1.45	1.39	1.34	1.20	1.08	1.03	1.00	1.00	1.00
	5.0	1.11	1.10	1.07	1.06	1.04	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

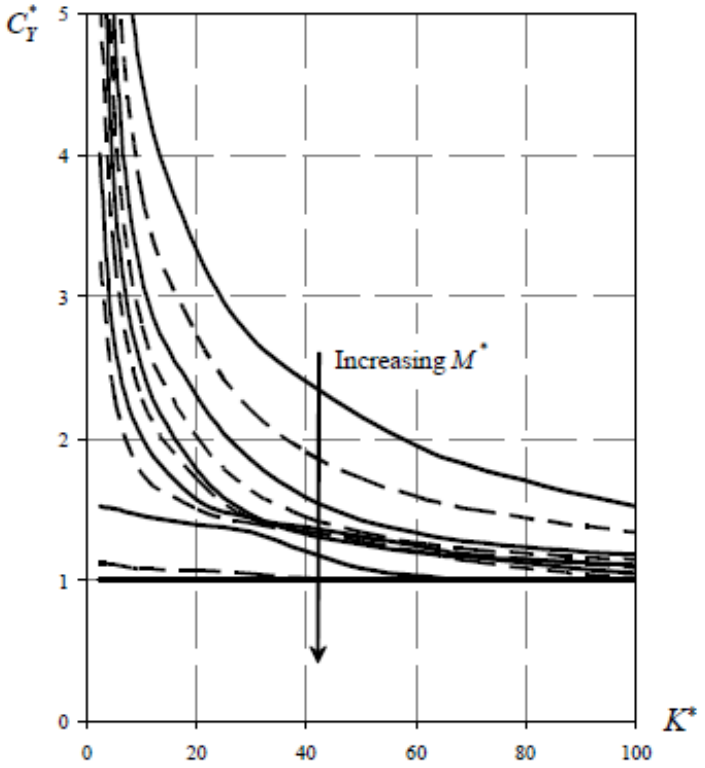


Figura 6.8 – Gráfico relativo ao coeficiente de pico de carga horizontal. [3]

Tabela 6.3 – Coeficiente de pico de carga vertical. [3]

C_Z^*		K^*										
		≤ 2.5	*5*	*10*	*20*	*30*	*40*	*50*	*60*	*70*	*100*	*≥140*
M^*	0.0	5.00	5.00	4.85	3.21	2.55	2.26	2.01	1.81	1.63	1.26	1.05
	0.1	3.87	4.08	4.23	2.87	2.15	1.77	1.55	1.41	1.31	1.11	0.97
	0.2	3.16	3.45	3.74	2.60	1.86	1.45	1.26	1.16	1.09	1.00	0.90
	0.3	3.01	3.25	3.53	2.14	1.52	1.26	1.10	1.01	0.99	0.95	0.90
	0.4	2.87	3.08	3.35	1.82	1.29	1.11	0.98	0.90	0.90	0.90	0.90
	0.6	2.21	2.36	2.59	1.59	1.20	1.03	0.92	0.90	0.90	0.90	0.90
	0.8	1.53	1.61	1.80	1.18	1.05	0.97	0.92	0.90	0.90	0.90	0.90
	1.0	1.05	1.13	1.28	1.12	0.99	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
	2.0	0.96	1.03	1.05	1.00	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
	5.0	0.91	0.92	0.93	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
	10	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90

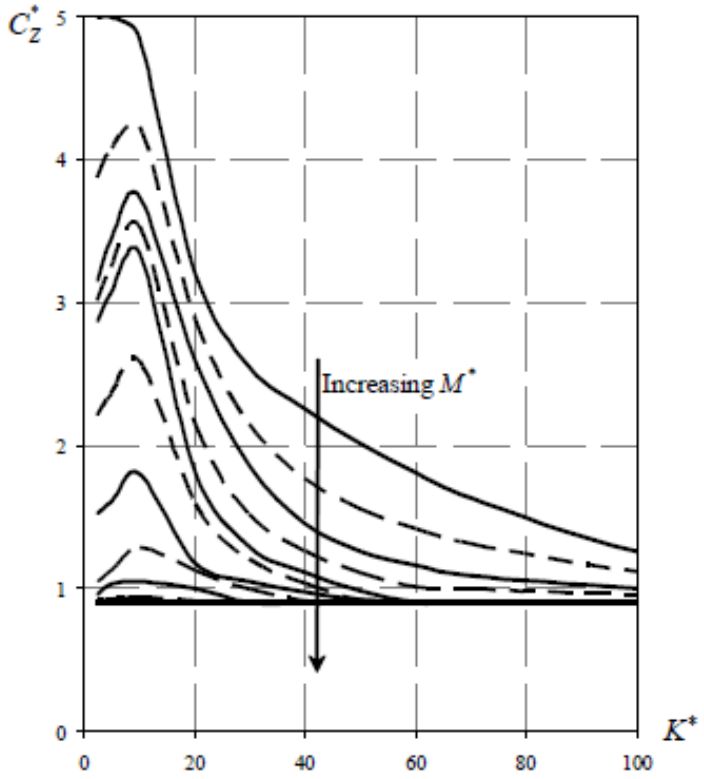


Figura 6.9 – Gráfico relativo ao coeficiente de pico de carga vertical. [3]

7 IMPLEMENTAÇÃO

7.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta as marchas de cálculo desenvolvidas em planilhas *Mathcad*, com base nas recomendações apontadas pela norma DNV-RP-F109 [3], a fim de alcançar os objetivos propostos.

A norma DNV-RP-F109 [3] recomenda três metodologias para análise de estabilidade de dutos apoiados no solo marinho:

i. Estabilidade Estática Absoluta, apresentado no item 5.3;

ii. Estabilidade Generalizada, apresentado no item 5.4;

iii. Análise Dinâmica de Estabilidade, comentado no item 5.5.

A presente dissertação se limita aos métodos de cálculo de estabilidade: Estabilidade Estática Absoluta e Estabilidade Generalizada, sendo o terceiro método apresentado além do escopo do presente trabalho.

7.2 MÉTODO DE ESTABILIDADE ESTÁTICA ABSOLUTA

A planilha *Mathcad* referente a esta metodologia é apresentada no Apêndice A. A planilha consiste em análises estáticas sob carregamentos ambientais de onda e corrente, os quais precisam ser atribuídos pelo projetista de forma bastante criteriosa a fim de representar adequadamente o ambiente de projeto.

As seguintes suposições são realizadas:

i. Teoria da Onda Linear é usada para descrever a cinemática da onda;

ii. As forças hidrodinâmicas são admitidas estacionárias e podem ser calculadas através da formulação de Morison.

A resistência do solo, como dito no capítulo 4, é função do coeficiente de atrito estático, da força normal aplicada ao solo e da força de resistência passiva (dependente do enterramento do duto).

Os dados do duto requeridos pela planilha de cálculo são:

i. diâmetro externo;

ii. espessura da parede de aço;

iii. densidade do aço;

iv. espessura da camada anticorrosiva;

v. densidade da camada anticorrosiva;

vi. espessura do revestimento de concreto;

vii. densidade do revestimento de concreto;

viii. Coeficientes hidrodinâmicos do duto.

Os dados de onda e corrente requeridos pela planilha de cálculo são:

i. Altura, período e direção de ataque da onda de projeto;

ii. Velocidade e direção de ataque da corrente de projeto;

A seguir é apresentado o fluxograma referente à planilha de cálculo de Estabilidade Estática Absoluta, apresentada no apêndice A.

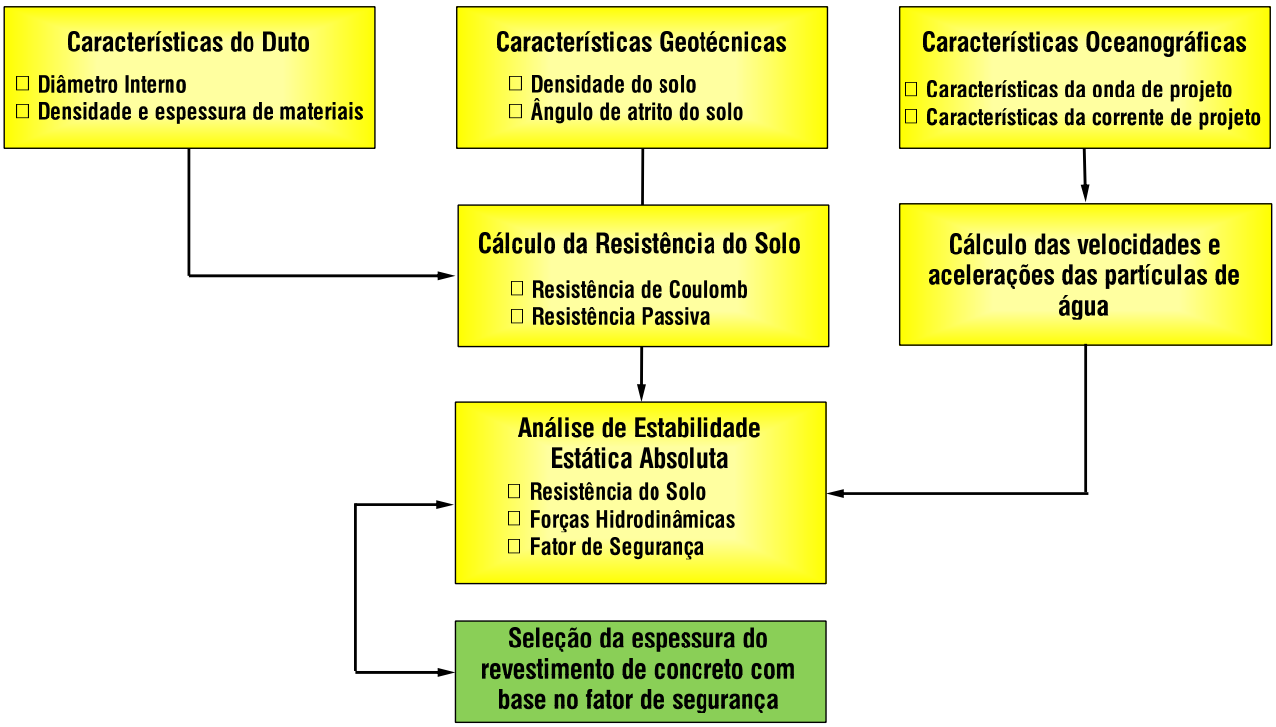


Figura 7.1 – Fluxograma da Planilha de Cálculo de Estabilidade Estática Absoluta. [4]

7.3 MÉTODO DE ESTABILIDADE GENERALIZADA

A planilha *Mathcad* referente a esta metodologia é apresentada no Apêndice B. Ao contrário da lógica apresentada no item anterior, esta planilha consiste em fixar um valor máximo de deslocamento lateral para o duto, sob a ação correnteza e de um espectro de onda oscilatória de projeto. O valor admissível para o deslocamento lateral deve ser tal que não resulte em solicitações superiores às admissíveis pela tubulação, evitando problemas como deformações ou tensões excessivas.

Os dados do duto requeridos pela planilha de cálculo são:

i. diâmetro externo;

ii. espessura da parede de aço;

iii. densidade do aço;

iv. espessura da camada anticorrosiva;

v. densidade da camada anticorrosiva;

vi. espessura do revestimento de concreto;

vii. densidade do revestimento de concreto;

Percebe-se que os dados requeridos pela planilha de Estabilidade Generalizada são praticamente os mesmo da planilha descrita no item 7.2 a menos dos coeficientes hidrodinâmicos, uma vez que a verificação a ser realizada envolve os deslocamentos e não o balanço de forças, como descrito no item anterior.

A seguir é apresentado o fluxograma referente à planilha de cálculo de Estabilidade Generalizada, apresentada no apêndice B.

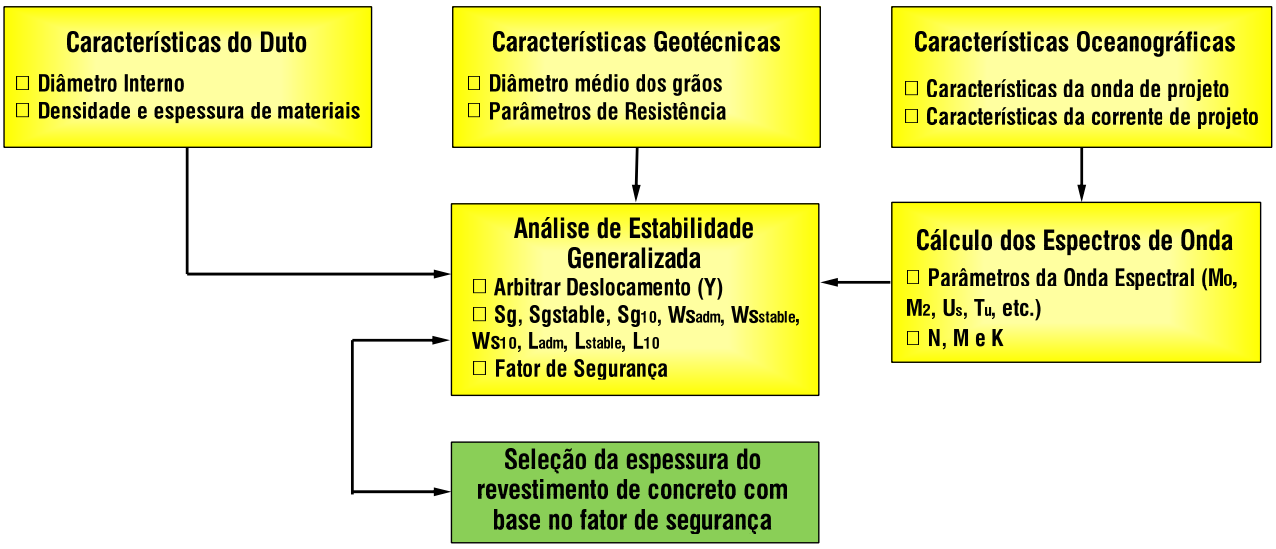


Figura 7.2 – Fluxograma da Planilha de Cálculo de Estabilidade Generalizada. [4]

7.4 CÁLCULO DO PESO SUBMERSO DO DUTO

Os procedimentos de cálculo de estabilidade de dutos descritos nas seções anteriores dependem do cálculo detalhado do peso submerso do duto. Para determinar o peso do duto, este item descreve uma seção transversal típica de um duto, Figura 7.3, que é composta pelos seguintes componentes, como já mencionado no item 2.3 e ilustrado na figura abaixo:

i. Revestimento de Aço, t ;

ii. Revestimento anticorrosivo interno, t_L ;

iii. Revestimento anticorrosivo externo, t_{cc} ;

iv. Revestimento isolante, t_{ic} ;

v. Revestimento de concreto, t_c ;

vi. Crescimento de craca, t_{mg} ;

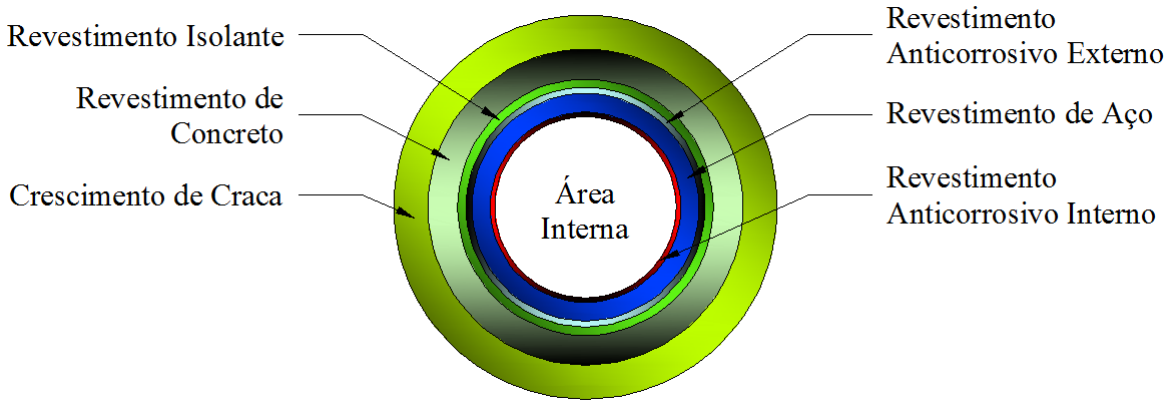


Figura 7.3 – Seção Transversal do Duto [10]

O diâmetro hidrodinâmico D do duto pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$D = D_{sp} + 2\left(t_{cc} + t_{ic} + t_c + t_{mg}\right) \qquad (7.1)$$

Onde D_{sp} é o diâmetro externo do duto.

O diâmetro interno D_i é dado por

$$D_i = D_{sp} - 2t - 2t_L \qquad (7.2)$$

O peso no ar de cada uma das camadas é calculado pelas seguintes expressões, respectivamente para a camada de aço W_{cs}, o revestimento anticorrosivo interno W_L, o revestimento

anticorrosivo externo W_{cc}, o revestimento isolante W_{ic}, o revestimento de concreto W_c, e a camada de craca W_{mg} :

$$W_{cs} = \pi \left(D_{sp} - t\right) t\, \rho_{sp} \tag{7.3}$$

$$W_L = \pi \left(D_{sp} - 2t - t_L\right) t_L\, \rho_L \tag{7.4}$$

$$W_{cc} = \pi \left(D_{sp} + t_{cc}\right) t_{cc}\, \rho_{cc} \tag{7.5}$$

$$W_{ic} = \pi \left(D_{sp} + 2t_{cc} + t_{ic}\right) t_{ic}\, \rho_{ic} \tag{7.6}$$

$$W_c = \pi \left(D_{sp} + 2t_{cc} + 2t_{ic} + t_c\right) t_c\, \rho_c \tag{7.7}$$

$$W_{mg} = \pi \left(D_{sp} + 2t_{cc} + 2t_{ic} + 2t_c + t_{mg}\right) t_{mg}\, \rho_{mg} \tag{7.8}$$

O peso do fluido interno W_i é dado por

$$W_i = \frac{\pi}{4} D_i^2\, \rho_i \tag{7.9}$$

O peso do material corroído W_{corr} é dado por

$$W_{corr} = \left[\pi \left(D - 2t + t_{ca}\right) t_{ca}\right] \rho_{sp}\, \eta\, ca \tag{7.10}$$

onde t_{ca} é a espessura do material corroído, η_{ca} - Fator limitante da corrosão

ρ_c - Densidade do revestimento de concreto

ρ_{cc} - Densidade do revestimento anticorrosivo externo

ρ_L - Densidade do revestimento anticorrosivo interno

ρ_i - Densidade do fluido interno

ρ_{ic} - Densidade do revestimento isolante

ρ_{mg} - Densidade da camada de craca

ρ_{sp} - Densidade do aço

Finalmente, o empuxo do duto, seu peso submerso e gravidade específica podem ser calculados como se segue:

Empuxo do duto, B

$$B = \frac{\pi}{4} D^2\, \rho_{sw} \tag{7.11}$$

Peso submerso do duto, W_s

$$W_s = W - B \tag{7.12}$$

Gravidade específica do duto, S_g

$$S_g = \frac{W}{B} \tag{7.13}$$

8 ESTUDOS DE CASO

8.1 INTRODUÇÃO

Todas as formulações apresentadas nas seções anteriores foram programadas em planilhas de cálculo *Mathcad* com o intuito de consolidar os conhecimentos a respeito do cálculo de estabilidade.

Nesta seção, apresentam-se os resultados do estudo semelhante ao existente no documento do PRCI V.2 [4], a fim de validar as implementações realizadas em planilha Mathcad, apresentadas nos apêndices A e B.

8.2 DADOS DO PROBLEMA

A partir da formulação do cálculo de estabilidade exposta, foi executado um estudo de caso com os dados do exemplo 1 do manual do PRCI (AGA) V.2.[4] com o intuito de validar o procedimento de cálculo da estabilidade para as metodologias: Estabilidade Estática Absoluta e Estabilidade Generalizada.

Os parâmetros de entrada para as análises de estabilidade são descritos na Tabela 8.1:

Tabela 8.1 – Dados de entrada do problema.

Coeficiente de atrito do solo, μ	0.70
Ângulo de ataque da onda, θ [°]	90.00
Altura da onda, H [m]	13.716
Período da onda, T [s]	14.10
Velocidade da correnteza, $U_c \left[\frac{m}{s}\right]$	0.305
Profundidade da água, d [m]	91.44
Diâmetro externo do duto, D_{st} [m]	0.762
Espessura parede de aço, t [m]	0.013
Espessura revestimento anticorrosivo externo, t_{cc} [m]	0.004
Variação da espessura da camada de concreto, t_c [m]	1 a 4 (incremento de 0.003 m)
Peso Específico do aço, $\rho_{sp} \left[\frac{N}{m^3}\right]$	7.698×10^4
Peso Específico do revestimento anticorrosivo, $\rho_{cc} \left[\frac{N}{m^3}\right]$	1.807×10^4
Peso Específico do concreto, $\rho_c \left[\frac{N}{m^3}\right]$	2.985×10^4
Coeficiente de força de *drag*, C_D	0.70
Coeficiente de força de *lift*, C_L	0.90
Coeficiente de força de inércia, C_M	3.29

8.3 MÉTODO DE ESTABILIDADE ESTÁTICA ABSOLUTA

8.3.1 ANÁLISE COMPARATIVA: AGA X PLANILHA DE CÁLCULO

A Tabela 8.2 a seguir resume os resultados fornecidos pela implementação, em planilhas *Mathcad*, do cálculo de estabilidade efetuada no presente trabalho (destacados em amarelo), comparando-os com os resultados do exemplo 1 do documento do PRCI (AGA) V.2 [4] (indicados em branco).

Observe que os valores referentes ao ângulo de fase da onda, dispostos na 2ª coluna da Tabela 8.2, apresentam variação angular. Tal parâmetro teve que ser incorporado a planilha de cálculo em detrimento da coerência entre as comparações.

A linha em destaque vermelho na Tabela 8.2, refere-se à menor espessura de revestimento de concreto que confere estabilidade ao duto, perceba que os revestimentos de concreto com espessura superior a 0.075m apresentam fatores de segurança vertical e horizontal maiores que 1.1.

Tabela 8.2 – Tabela comparativa entre os resultados do PRCI (destacados em amarelo) e Planilha de Cálculo de Estabilidade (Estabilidade Estática Absoluta).

CONCRETE THICKNESS [m]	PH.ANGLE THETA [°]	PIPE SUB. WEIGHT [N/m]		SPECIFIC GRAVITY		PART. VELOC. [m/s]		PART. ACCEL. [m/s²]		DRAG FORCE [N/m]		LIFT FORCE [N/m]		INER. FORCE [N/m]		HORIZ. SAFETY FACT AT THETA		ERROR	VER. SAFETY FACT AT THETA		ERROR	MINIMUN	ERROR
0.025	-	-949.78	-	0.82	-	1.18	-	0.00	-	409.54	-	526.55	-	0.00	-	-2.52	-	-	-1.80	-	-	-1.80	-
0.028	-	-787.05	-	0.85	-	1.18	-	0.00	-	412.75	-	530.64	-	0.00	-	-2.23	-	-	-1.48	-	-	-1.48	-
0.031	-	-623.16	-	0.89	-	1.18	-	0.00	-	415.96	-	534.72	-	0.00	-	-1.95	-	-	-1.17	-	-	-1.17	-
0.034	-	-457.96	-	0.92	-	1.18	-	0.00	-	419.02	-	538.81	-	0.00	-	-1.66	-	-	-0.85	-	-	-0.85	-
0.038	-	-291.59	-	0.95	-	1.18	-	0.00	-	422.23	-	542.89	-	0.00	-	-1.38	-	-	-0.54	-	-	-0.54	-
0.041	-	-123.90	-	0.98	-	1.18	-	0.00	-	425.44	-	546.98	-	0.00	-	-1.10	-	-	-0.23	0.00	-	-0.23	-
0.044	85.00	45.10	**43.77**	1.01	**1.01**	0.35	0.34	0.40	0.40	38.37	36.48	49.46	46.69	784.80	783.48	0.00	**0.00**	-	0.91	**0.94**	3.19%	0.08	**0.08**	0.00%
0.047	58.00	215.26	**214.47**	1.04	**1.04**	0.75	0.73	0.34	0.34	176.39	172.16	226.87	220.31	678.00	676.98	0.00	**0.00**	-	0.95	**0.97**	2.06%	0.39	**0.39**	0.00%
0.050	37.00	386.74	**385.18**	1.06	**1.06**	1.00	0.98	0.24	0.24	310.91	304.93	399.77	392.47	488.33	487.31	0.00	**0.00**	-	0.97	**0.98**	1.02%	0.69	**0.70**	1.43%
0.053	0.00	559.53	**557.34**	1.09	**1.09**	1.18	1.16	0.00	0.00	438.14	431.86	563.17	554.42	0.00	0.00	0.00	**0.01**	-	0.99	**1.01**	1.98%	0.99	**1.01**	1.98%
0.056	14.00	733.49	**732.42**	1.12	**1.12**	1.15	1.16	0.10	0.10	421.36	414.36	541.73	533.99	202.07	201.34	0.22	**0.23**	4.35%	1.35	**1.37**	1.46%	1.29	**1.31**	1.53%
0.059	22.00	908.62	**907.50**	1.15	**1.14**	1.11	1.10	0.15	0.15	396.12	389.55	509.34	501.90	317.33	316.60	0.39	**0.40**	2.50%	1.78	**1.81**	1.66%	1.59	**1.61**	1.24%
0.063	28.00	1085.06	**1082.58**	1.17	**1.17**	1.07	1.07	0.19	0.19	370.73	364.75	476.66	469.80	403.41	402.68	0.55	**0.56**	1.79%	2.28	**2.31**	1.30%	1.89	**1.91**	1.05%
0.066	32.00	1262.82	**1260.58**	1.20	**1.20**	1.04	1.04	0.21	0.21	351.76	345.78	452.29	445.00	461.77	461.04	0.70	**0.71**	1.41%	2.79	**2.83**	1.41%	2.18	**2.21**	1.36%
0.069	36.00	1441.89	**1440.03**	1.22	**1.22**	1.01	1.01	0.24	0.24	330.61	325.36	425.01	418.73	519.55	519.40	0.84	**0.85**	1.18%	3.39	**3.44**	1.45%	2.47	**2.50**	1.20%
0.072	39.00	1622.12	**1619.49**	1.24	**1.24**	0.98	0.98	0.25	0.25	314.12	309.31	403.85	396.85	564.05	563.17	0.97	**0.98**	1.02%	4.02	**4.07**	1.23%	2.76	**2.79**	1.08%
0.075	42.00	1803.53	**1801.87**	1.27	**1.27**	0.95	0.95	0.27	0.27	296.76	291.80	381.53	374.96	607.97	606.94	1.10	**1.11**	0.90%	4.73	**4.80**	1.46%	3.05	**3.08**	0.97%
0.078	44.00	1986.24	**1984.24**	1.29	**1.29**	0.93	0.92	0.28	0.28	285.23	281.59	366.79	361.83	639.92	639.04	1.22	**1.23**	0.81%	5.41	**5.49**	1.46%	3.33	**3.37**	1.19%
0.081	46.00	2170.27	**2168.07**	1.31	**1.31**	0.90	0.88	0.29	0.29	273.56	269.92	351.76	345.78	671.72	671.14	1.35	**1.36**	0.74%	6.17	**6.26**	1.44%	3.62	**3.66**	1.09%
0.084	48.00	2355.47	**2353.37**	1.34	**1.34**	0.88	0.88	0.30	0.30	261.45	258.24	336.15	331.19	703.38	703.24	1.46	**1.47**	0.68%	7.00	**7.11**	1.55%	3.90	**3.94**	1.02%
0.088	49.00	2541.98	**2540.12**	1.36	**1.36**	0.87	0.85	0.31	0.31	256.20	252.41	329.44	323.90	724.10	723.66	1.58	**1.59**	0.63%	7.71	**7.82**	1.41%	4.18	**4.22**	0.95%
0.091	51.00	2729.81	**2726.87**	1.38	**1.38**	0.84	0.82	0.31	0.31	243.80	240.74	313.39	309.31	755.62	754.30	1.69	**1.70**	0.59%	8.71	**8.83**	1.36%	4.46	**4.50**	0.89%
0.094	52.00	2918.80	**2916.54**	1.40	**1.40**	0.83	0.82	0.32	0.32	238.25	234.90	306.24	302.01	776.33	776.19	1.80	**1.81**	0.55%	9.53	**9.66**	1.35%	4.74	**4.78**	0.84%
0.097	53.00	3109.11	**3106.21**	1.42	**1.42**	0.82	0.82	0.32	0.32	232.71	229.06	299.10	294.72	797.34	796.61	1.91	**1.92**	0.52%	10.39	**10.53**	1.33%	5.01	**5.06**	0.99%
0.100	54.00	3300.58	**3297.34**	1.44	**1.44**	0.81	0.79	0.33	0.33	227.02	224.69	291.80	287.42	818.35	817.04	2.01	**2.02**	0.50%	11.31	**11.45**	1.22%	5.28	**5.33**	0.94%

As figuras 8.1, 8.2, 8.3, apresentam os gráficos correspondentes aos fatores de segurança vertical e horizontal.

Os gráficos apresentados nas figuras 8.1 e 8.2 correspondem aos fatores de segurança obtidos em função da variação da espessura do revestimento de concreto, com base na desfazem da onda representada pela segunda coluna da Tabela 8.2.

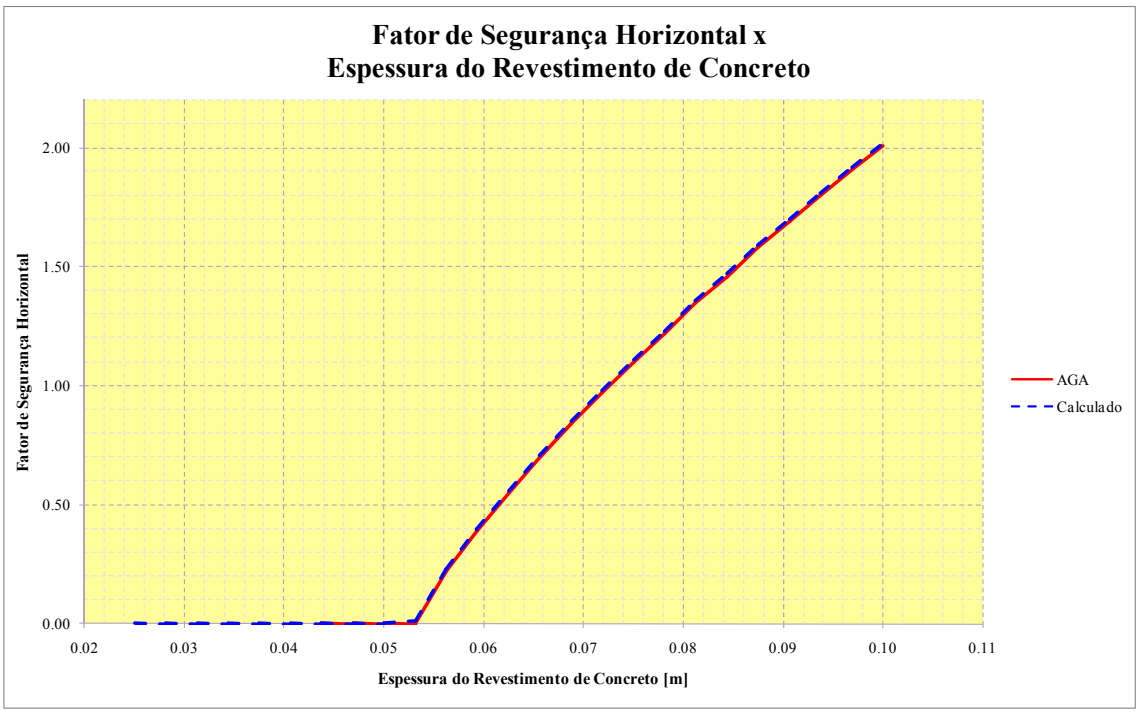


Figura 8.1 – Gráfico do fator de segurança horizontal com base na variação da fase da onda.

Analisando o gráfico acima percebe-se um patamar de fator de segurança horizontal zero para espessuras de revestimento de concreto entre 0.024m e 0.054m. Com base na equação 5.1, pode-se afirmar que tal fenômeno ocorre quando o peso submerso do duto é nulo, indicando que o peso total do duto é igual ao seu empuxo.

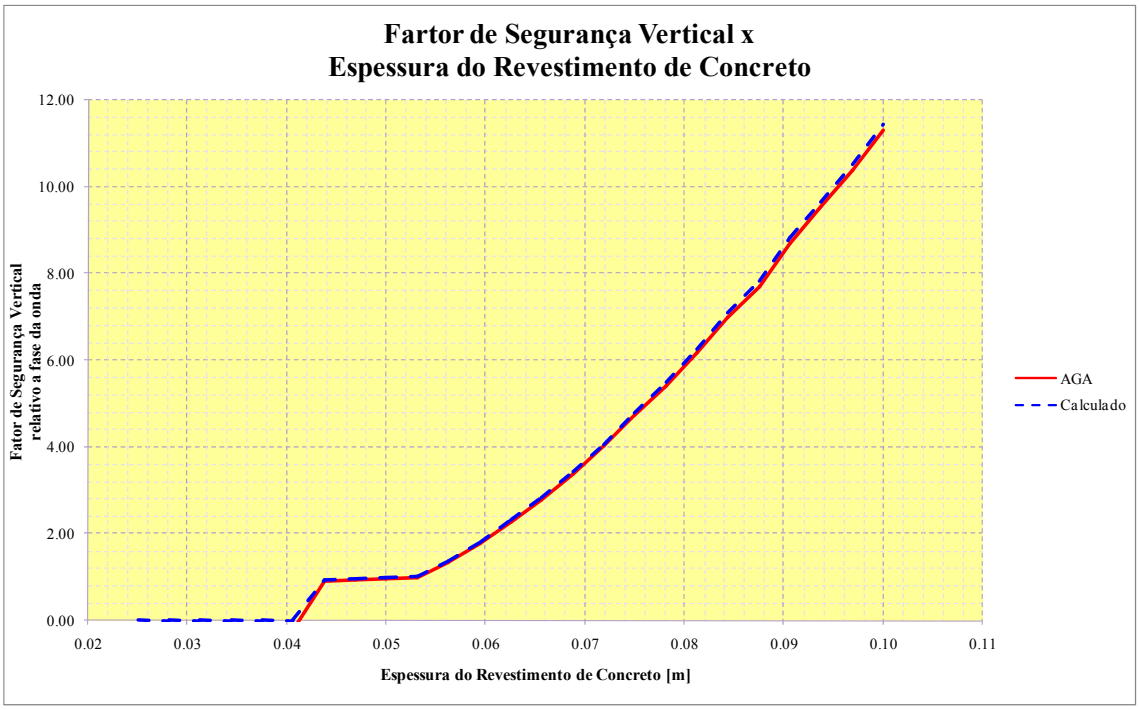


Figura 8.2 – Gráfico do fator de segurança vertical com base na variação da fase da onda.

Analisando o gráfico acima e a Tabela 8.2 percebe-se uma variação muito pouco expressiva do fator de segurança vertical para espessuras de revestimento de concreto entre 0.044m e 0.054m. Com base na equação 5.2, pode-se afirmar que tal fenômeno ocorre quando o peso submerso do duto atinge valores muito próximos da força de *lift*.

Analisando-se a Tabela 8.2 e os gráficos acima apresentados percebe-se que a estabilidade vertical é atingida antes da horizontal. A estabilidade do duto se verifica quando os fatores de segurança vertical e horizontal apresentam valores iguais ou superiores a 1.1, que no caso em estudo ocorre quando a espessura do revestimento de concreto atinge o valor de 0.075m.

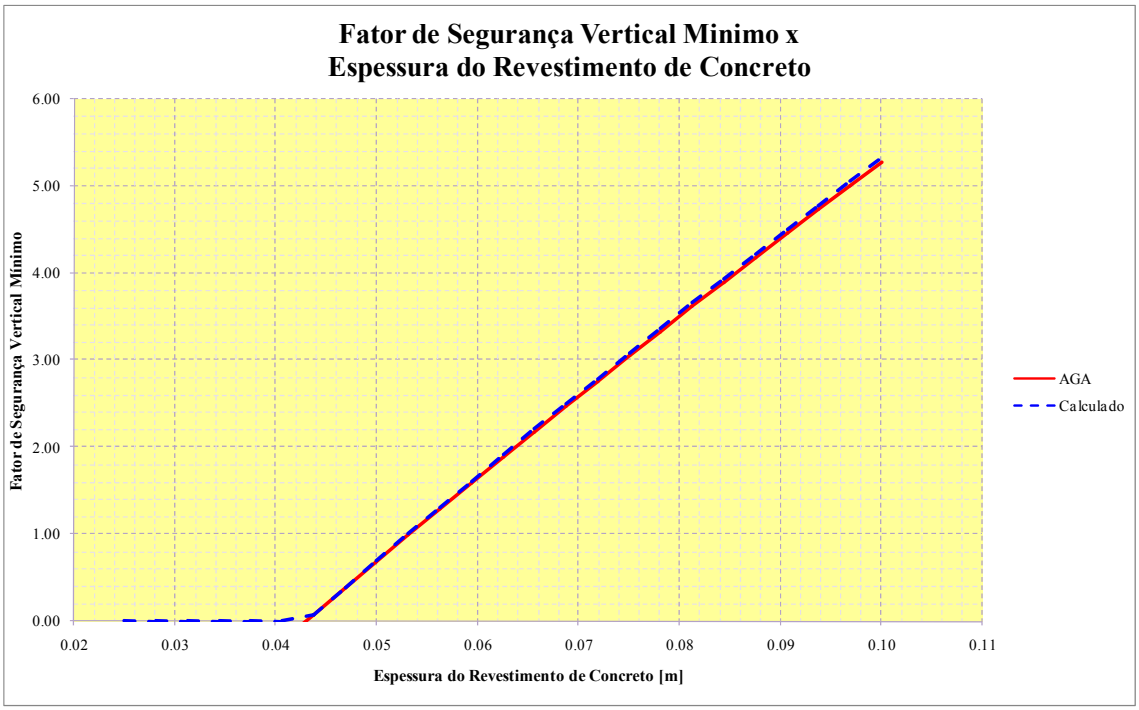


Figura 8.3 – Gráfico do Fator de Segurança Vertical (ângulo de fase da onda 0º).

O gráfico apresentado na Figura 8.3 corresponde ao fator de segurança vertical mínimo obtido em função da espessura do revestimento de concreto, não considerando a variação do ângulo de fase da onda.

Analisando-se a tabela e os gráficos apresentados acima, pode-se observar uma excelente concordância entre os resultados do PRCI [4] e planilha de cálculo, o que valida a implementação do procedimento de cálculo baseada na metodologia de Estabilidade Estática Absoluta.

8.3.2 ESTUDOS PARAMÉTRICOS DE SENSIBILIDADE

A análise paramétrica consiste em avaliar o comportamento de uma estrutura variando-se os parâmetros de interesse do estudo, enquanto os demais parâmetros permanecem inalterados.

Este tópico apresenta análises paramétricas do cálculo de estabilidade de um duto apoiado no solo marinho sujeito a cargas de onda e correnteza. Analisou-se o comportamento do duto apoiado no solo em relação a:

i. Parâmetros característicos do duto;

ii. Parâmetros característicos da onda;

iii. Parâmetros geotécnicos.

Para a realização das análises utilizou-se uma planilha de cálculo em Mathcad, apresentada no apêndice A.

Efeito dos Parâmetros Característicos do Duto

Os parâmetros característicos do duto que afetam o cálculo de estabilidade são:

i. Peso submerso;

ii. Diâmetro externo;

iii. Rugosidade.

Muitos fatores podem ser variados para alterar um ou mais destes parâmetros. Estes incluem os parâmetros descritos nos itens 2.3 e 7.4.

Como descrito no item 3.3, o diâmetro do duto deve ser definido com base na vazão requerida para transportar o fluido a uma taxa esperada de produção, mantendo-se inalterado na fase de cálculo de estabilidade. O mesmo vale para o parâmetro rugosidade, determinada em função do tipo de revestimento de concreto e pelo crescimento de craca esperado. Portanto o parâmetro a ter o efeito mais significativo sobre o cálculo de estabilidade é o peso submerso.

A Tabela 8.3 apresenta resultados obtidos no estudo paramétrico do peso submerso, no qual se varia a espessura do revestimento de concreto, estes valores estão graficamente representados na Figura 8.4.

Tabela 8.3 – Estudo Paramétrico: Peso Submerso do Duto.

Estudo Paramétrico: Peso Submerso			
Esp. Revest. Concreto t_c [m]	Peso Submerso Ws [N/m]	Fator de Segurança	
		Vertical	Horizontal
0.044	45.10	0.91	0.00
0.047	215.26	0.95	0.00
0.050	386.74	0.97	0.00
0.053	559.53	0.99	0.00
0.056	733.49	1.35	0.22
0.059	908.62	1.78	0.39
0.063	1085.06	2.28	0.55
0.066	1262.82	2.79	0.70
0.069	1441.89	3.39	0.84
0.072	1622.12	4.02	0.97
0.075	1803.53	4.73	1.10
0.078	1986.24	5.41	1.22
0.081	2170.27	6.17	1.35
0.084	2355.47	7.00	1.46
0.088	2541.98	7.71	1.58
0.091	2729.81	8.71	1.69
0.094	2918.80	9.53	1.80
0.097	3109.11	10.39	1.91
0.100	3300.58	11.31	2.01

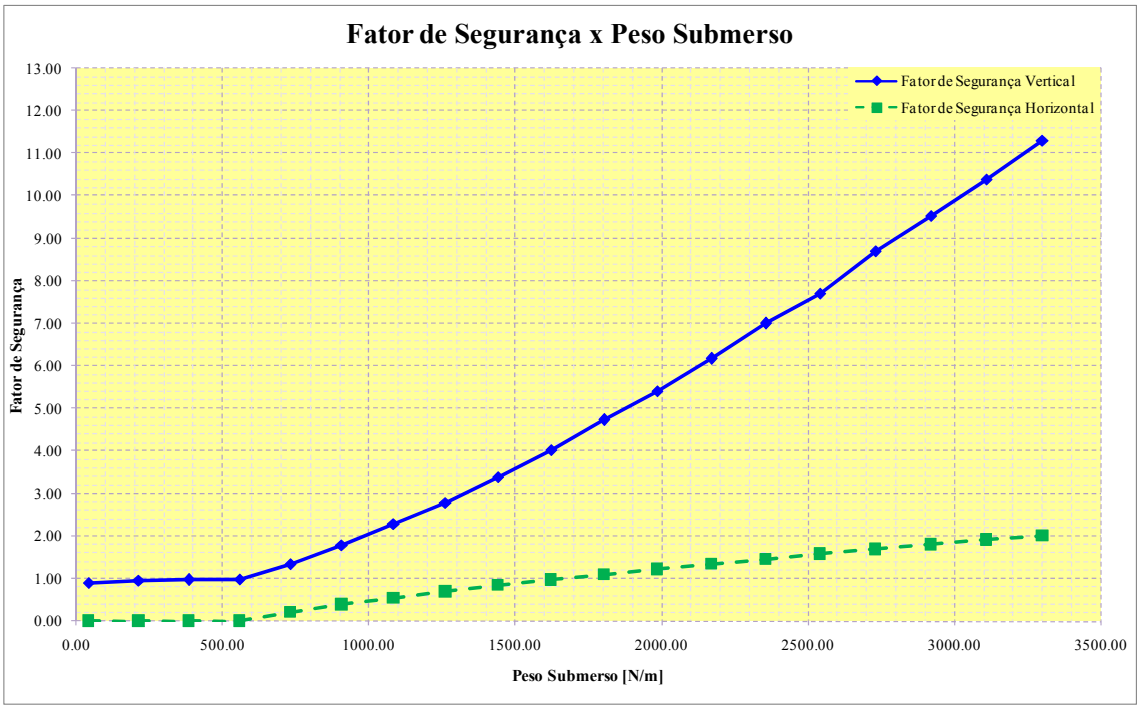


Figura 8.4 – Gráfico Fator de Segurança x Peso Submerso do Duto.

Analisando-se o gráfico acima se pode perceber que:

- A estabilidade vertical é atingida (≥ 1.1) no início do estudo, enquanto a estabilidade horizontal somente é atingida (≥ 1.1) para pesos submersos a partir de 1803 N/m.
- A condição de estabilidade horizontal domina o processo de estabilidade do duto: atendendo-se a estabilidade horizontal atende-se também a estabilidade vertical.

Efeito dos Parâmetros Característicos da Onda

Os parâmetros característicos da onda que afetam o cálculo da estabilidade são:

i. Lâmina d'água;

ii. Altura significativa;

iii. Período de pico;

iv. Parâmetros espectrais (somente no Método de Estabilidade Generalizada);

v. Direção de ataque;

vi. Espalhamento da onda (somente no Método de Estabilidade Generalizada);

vii. Semente aleatória (somente no Método de Análise Dinâmica de Estabilidade).

Os parâmetros que apresentam maior influência sobre o cálculo de estabilidade de dutos, com base na Metodologia de Estabilidade Estática Absoluta são: lâmina d'água, altura significativa e período de pico.

Lâmina d'água

A Tabela 8.4 apresenta os resultados obtidos no estudo paramétrico da lâmina d'água, estes valores estão graficamente representados na Figura 8.5.

Para se chegar ao peso submerso mínimo requerido pela estabilidade é necessário variar os pesos submersos através de incremento ou redução da espessura do revestimento de concreto, até que os fatores de segurança (vertical e horizontal) atinjam a estabilidade (≥ 1.1) simultaneamente.

Neste estudo variou-se o valor da profundidade de lâmina d'água, fixando-se os demais parâmetros apresentados no item 8.2.

Tabela 8.4 – Estudo Paramétrico: Lâmina d'água.

Estudo Paramétrico: Lâmina d'água				
Lâmina d'água Z [m]	Esp. Revest. Concreto t_c [m]	Peso Submerso Mínimo Ws [N/m]	Fator de Segurança	
			Vertical	Horizontal
91.50	0.066	1305.73	2.23	1.11
106.75	0.058	845.43	2.23	1.11
122.00	0.053	573.40	2.25	1.12
137.25	0.050	400.61	2.24	1.11
152.50	0.048	293.34	2.23	1.11
167.75	0.047	224.89	2.23	1.11
183.00	0.046	181.11	2.24	1.12
198.25	0.046	151.19	2.24	1.12
213.50	0.045	130.76	2.24	1.11
228.75	0.045	117.19	2.24	1.12
244.00	0.045	107.56	2.25	1.12
259.25	0.045	100.84	2.25	1.12
274.50	0.045	95.30	2.24	1.11
289.75	0.045	92.67	2.26	1.13
305.00	0.045	89.90	2.25	1.13
320.25	0.045	87.27	2.23	1.11

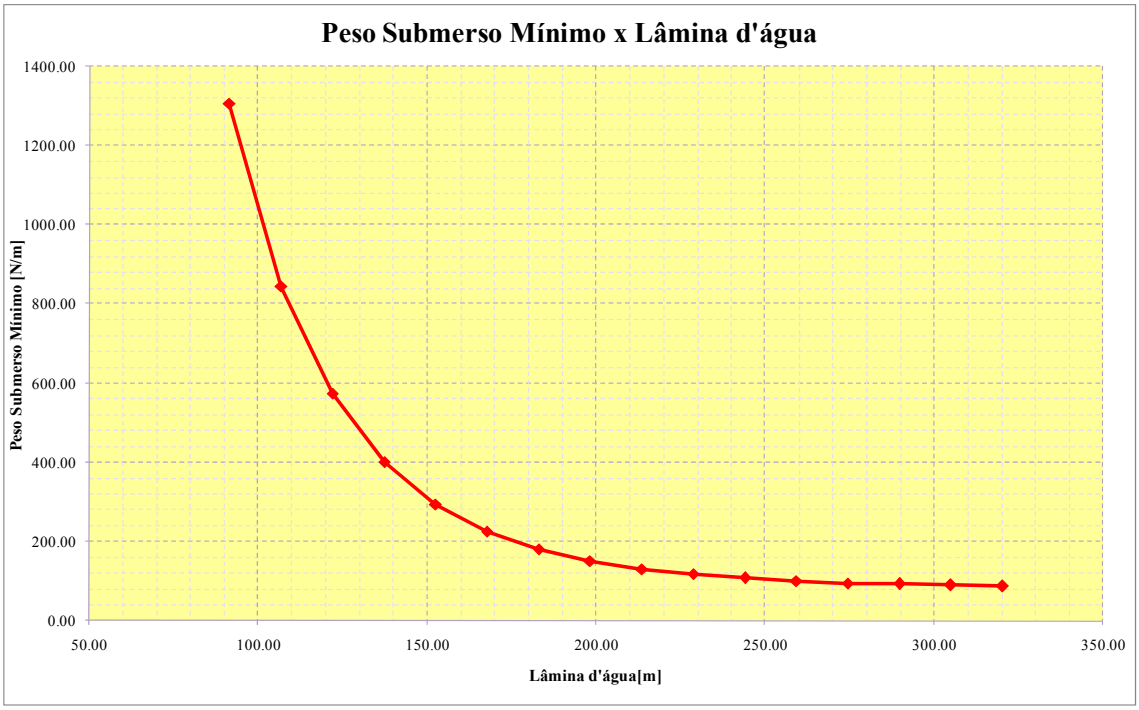


Figura 8.5 – Gráfico Peso Submerso Mínimo x Lâmina d'água.

A Figura 8.5 apresenta o gráfico correspondente ao peso submerso mínimo versus lâmina d'água. Analisando este gráfico percebe-se que o peso submerso mínimo é inversamente proporcional a lâmina d'água: em pequenas profundidades é necessário utilizar dutos com grandes pesos submersos para se atingir à estabilidade, em contrapartida, em lâminas d'água cada vez mais profundas pode-se instalar dutos com pesos submersos menores. Percebe-se também que a relação entre peso submerso mínimo e lâmina d'água é não-linear: a variação de peso submerso mínimo entre 100 e 150m de lâmina d'água é muito maior que entre 250 e 300m.

Altura Significativa da Onda

A Tabela 8.5 apresenta os resultados obtidos no estudo paramétrico da altura da onda de projeto, estes valores estão graficamente representados na Figura 8.6.

Como descrito no item anterior, para se chegar ao peso submerso mínimo requerido pela estabilidade é necessário variar os pesos submersos através de incremento ou redução da espessura do revestimento de concreto, até que os fatores de segurança (vertical e horizontal) atinjam a estabilidade (≥ 1.1), simultaneamente.

Neste estudo variou-se o valor da altura da onda de projeto, fixando-se os demais parâmetros apresentados no item 8.2.

Tabela 8.5 – Estudo Paramétrico: Altura da Onda de Projeto.

Estudo Paramétrico: Altura da Onda				
Altura da Onda H [m]	Esp. Revest. Concreto t_c [m]	Peso Submerso Mínimo Ws [N/m]	Fator de Segurança	
			Vertical	Horizontal
1.50	0.046	147.11	2.3	1.17
2.50	0.047	194.83	2.26	1.13
3.50	0.048	249.56	2.23	1.11
4.50	0.049	318.00	2.26	1.13
5.50	0.050	386.74	2.23	1.11
6.50	0.052	469.49	2.24	1.12
7.50	0.053	566.39	2.27	1.14
8.50	0.055	663.74	2.26	1.14
9.50	0.057	761.37	2.24	1.11
10.50	0.059	873.45	2.23	1.11
11.50	0.061	1000.27	2.24	1.11
12.50	0.063	1127.68	2.23	1.11
13.50	0.066	1269.97	2.23	1.11
14.50	0.069	1427.44	2.24	1.11

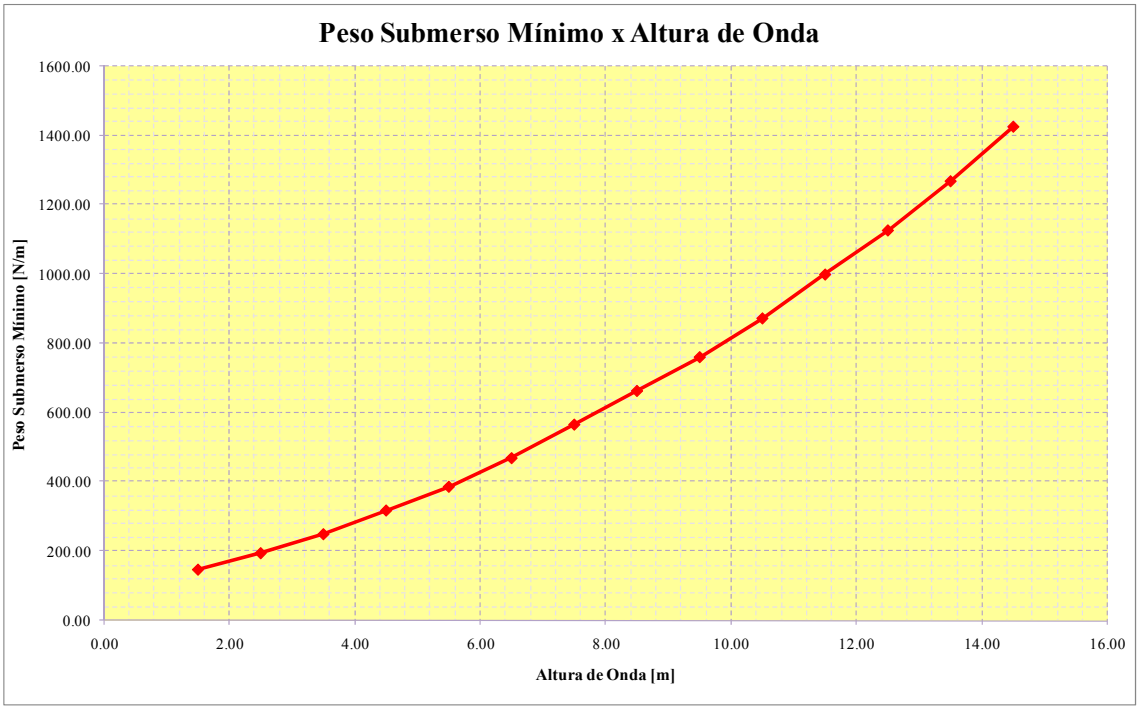


Figura 8.6 – Gráfico Peso Submerso Mínimo x Altura da Onda de Projeto.

A Figura 8.6 apresenta o gráfico correspondente ao peso submerso mínimo versus altura da onda de projeto. Analisando este gráfico percebe-se que o peso submerso é diretamente proporcional a altura da onda: dutos solicitados por ondas de baixa amplitude atingem a estabilidade sob menores pesos submersos, já os dutos solicitados por ondas de grande amplitude atingem a estabilidade somente com maiores pesos submersos.

Período da Onda

A Tabela 8.6 apresenta os resultados obtidos no estudo paramétrico do período da onda de projeto, estes valores estão graficamente representados na Figura 8.7.

Como descrito nos itens anteriores, para se chegar ao peso submerso mínimo requerido pela estabilidade é necessário variar os pesos submersos através de incremento ou redução da espessura do revestimento de concreto, até que os fatores de segurança (vertical e horizontal) atinjam a estabilidade (≥ 1.1), simultaneamente.

Neste estudo variou-se o valor do período da onda de projeto, fixando-se os demais parâmetros apresentados no item 8.2.

Tabela 8.6 – Estudo Paramétrico: Período da Onda de Projeto.

Estudo Paramétrico: Período da Onda				
Período da Onda T [s]	Esp. Revest. Concreto t_c [m]	Peso Submerso Mínimo Ws [N/m]	Fator de Segurança	
			Vertical	Horizontal
5	0.044	83.19	2.26	1.13
6	0.044	83.19	2.25	1.12
7	0.045	85.81	2.23	1.11
8	0.045	102.16	2.25	1.13
9	0.046	144.33	2.23	1.11
10	0.047	235.84	2.23	1.11
11	0.050	397.83	2.25	1.12
12	0.054	628.86	2.23	1.11
13	0.060	928.32	2.24	1.11
14	0.066	1269.97	2.23	1.11
15	0.072	1633.65	2.24	1.11
16	0.078	1993.69	2.23	1.11
17	0.084	2340.59	2.23	1.11
18	0.090	2669.53	2.23	1.11
19	0.095	2964.33	2.23	1.11
20	0.099	3239.14	2.24	1.11

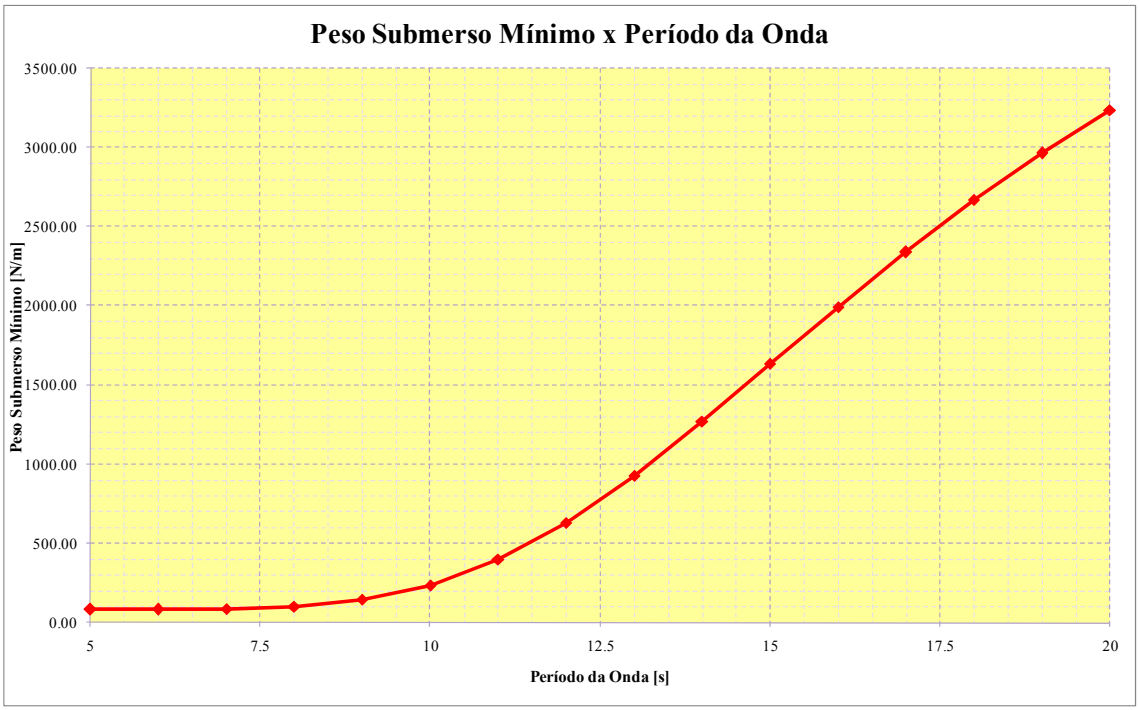


Figura 8.7 – Gráfico Peso Submerso Mínimo x Período da Onda de Projeto.

A Figura 8.7 apresenta o gráfico correspondente ao peso submerso mínimo versus período da onda de projeto. Analisando este gráfico percebe-se um patamar para o peso submerso mínimo quando o duto é solicitado por ondas de período entre 5.0 e 7.0s. Percebe-se também que ondas com períodos superiores a 11.0s, levam a pesos submersos bastante elevados, em contrapartida, ondas com períodos inferiores a 11.0s levam a pesos submersos bem menores.

Efeitos dos Parâmetros Geotécnicos

Os parâmetros geotécnicos que afetam a estabilidade de dutos submarinos são:

i. Tipo de solo;

ii. Propriedades características do solo (fator de atrito e coesão);

estes incluem os parâmetros descritos capítulo 4.

Neste estudo, optou-se pelo fator de fricção do solo para representar a variação dos parâmetros indicados acima.

A Tabela 8.7 apresenta os resultados obtidos no estudo paramétrico do fator de fricção do solo, estes valores estão graficamente representados na Figura 8.8.

Como descrito nos itens anteriores, para se chegar ao peso submerso mínimo requerido pela estabilidade é necessário variar os pesos submersos através de incremento ou redução da espessura do revestimento de concreto, até que os fatores de segurança (vertical e horizontal) atinjam a estabilidade (≥ 1.1), simultaneamente.

Neste estudo variou-se o fator de atrito do solo, fixando-se os demais parâmetros apresentados no item 8.2.

Tabela 8.7 – Estudo Paramétrico: Fator de Atrito do Solo.

Estudo Paramétrico: Fator de Atrito do Solo				
Fator de Atrito do Solo (φ)	Esp. Revest. Concreto t_c [m]	Peso Submerso Mínimo Ws [N/m]	Fator de Segurança	
			Vertical	Horizontal
0.2	0.101	3346.70	5.32	1.11
0.25	0.091	2752.43	4.46	1.11
0.3	0.084	2355.47	3.87	1.11
0.35	0.080	2081.83	3.46	1.11
0.4	0.077	1891.09	3.16	1.11
0.45	0.074	1730.85	2.91	1.11
0.5	0.072	1614.83	2.73	1.11
0.55	0.070	1513.84	2.57	1.11
0.6	0.069	1434.59	2.44	1.11
0.65	0.067	1362.93	2.33	1.11
0.7	0.066	1305.73	2.23	1.11

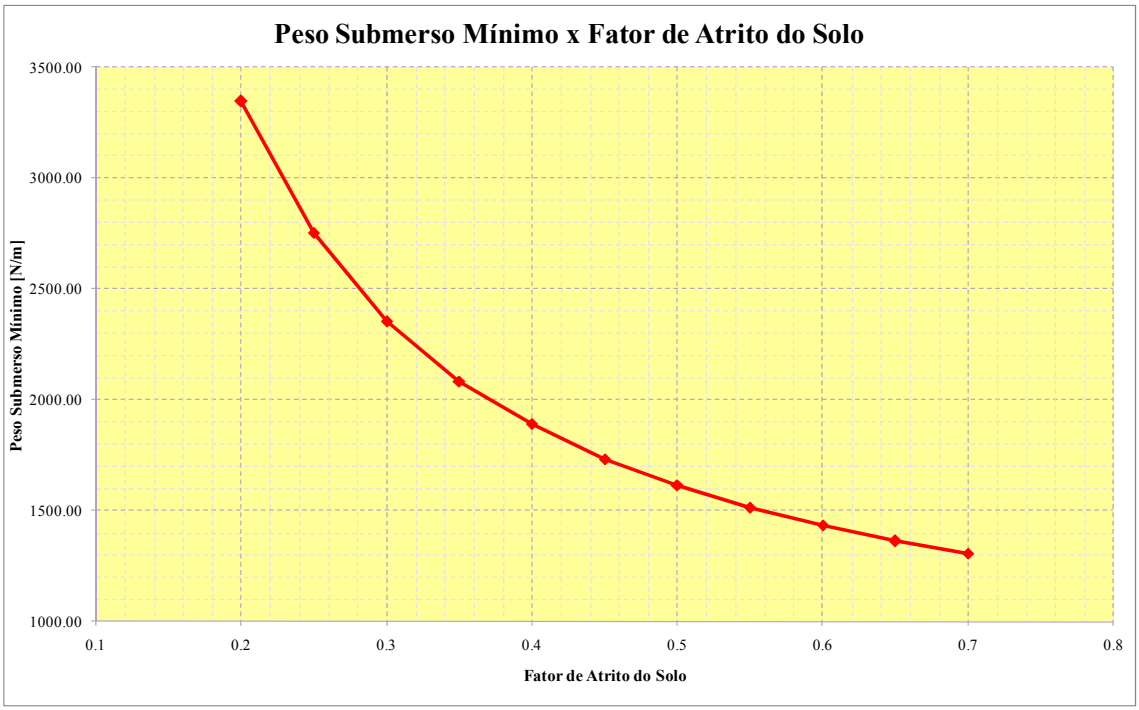


Figura 8.8 – Gráfico Peso Submerso Mínimo x Fator de Atrito do Solo.

A Figura 8.8 apresenta o gráfico correspondente ao peso submerso mínimo versus fator de atrito do solo. Analisando este gráfico percebe-se que o peso submerso e o fator de atrito são inversamente proporcionais: fatores de atrito baixos levam a elevados pesos submersos. Percebe-se também uma não-linearidade entre o peso submerso mínimo e o fator de atrito do solo: a variação de peso submerso mínimo entre os fatores de atrito 0.2 e 0.3 é muito maior que entre 0.6 e 0.7.

8.4 MÉTODO DE ESTABILIDADE GENERALIZADO

Nesta metodologia não foi possível realizar comparações com exemplos correspondentes do PRCI (AGA) [4], pois as lógicas dos cálculos dos fatores de estabilidade são diferentes das recomendadas pela norma DNV-RP-F109 [3], porém será apresentada uma comparação entre as metodologias abordadas, supondo que a energia da onda irregular utilizada neste exemplo seja equivalente a energia da onda regular apresentada no item 8.2.

A onda irregular arbitrada apresenta a seguinte característica:

- Altura significativa, 13.72m;
- Período de piso, 14.1s;

A Tabela 8.8, a seguir, resume os resultados fornecidos pela implementação em planilhas *Mathcad* do mesmo exemplo estudado no item anterior, entretanto seguindo a abordagem do método de Estabilidade Generalizado.

A linha em destaque vermelho na Tabela 8.8, refere-se à menor espessura de revestimento de concreto que confere estabilidade ao duto, perceba que os revestimentos de concreto com espessura superior a 0.075m apresentam fatores de segurança vertical e horizontal maiores que 1.1.

Tabela 8.8 – Estudo Paramétrico: Peso submerso.

Estudo Paramétrico: Peso Submerso																		
Diâmetro Externo com revestimentos D [m]	Esp. Revest. Concreto t_c [m]	Deslocamento Admitido $Y_{(adm)}$ = 5 D [m]	Peso Submerso [N/m]	Gravidade Específica S_g	N	M	K	Gravidade Específica $S_{g\ (stable)}$	$L_{(stable)}$	Peso Submerso $W_{s\ (stable)}$ [N/m]	Gravidade Específica $S_{g\ (10)}$	$L_{(10)}$	Peso Submerso $W_{s\ (10)}$ [N/m]	$L_{(adm)}$	Peso Submerso $W_{s\ (adm)}$ [N/m]	Fator de Segurança	
																Vertical	Horizontal
0.845	0.044	4.226	51.34	1.009	**Sg < 1.05** a estabilidade deve ser calculada seguindo a metotodologia de Estabilidade Estática Absoluta												
0.852	0.047	4.258	221.68	1.038													
0.858	0.050	4.289	393.25	1.066	0.00571	0.441	13.653	1.548	11.045	3286.44	1.238	4.786	1424.02	5.407	1609.00	0.97	0.244406
0.864	0.053	4.320	566.10	1.093	0.00571	0.441	13.554	1.546	11.074	3318.94	1.234	4.755	1425.26	5.38	1612.51	0.99	0.351069
0.870	0.056	4.351	740.21	1.12	0.00571	0.442	13.457	1.543	11.102	3351.50	1.231	4.725	1426.49	5.353	1615.99	1.35	0.458051
0.877	0.059	4.383	915.55	1.146	0.00571	0.442	13.361	1.541	11.13	3384.10	1.228	4.696	1427.72	5.326	1619.45	1.78	0.565348
0.883	0.063	4.414	1092.16	1.172	0.00571	0.442	13.266	1.538	11.158	3416.75	1.225	4.666	1428.93	5.3	1622.91	2.28	0.672961
0.889	0.066	4.445	1270.01	1.197	0.00571	0.443	13.173	1.536	11.185	3449.45	1.222	4.637	1430.15	5.274	1626.36	2.79	0.780896
0.895	0.069	4.476	1449.14	1.222	0.00571	0.443	13.081	1.533	11.213	3482.20	1.219	4.609	1431.36	5.248	1629.78	3.39	0.889161
0.902	0.072	4.508	1629.51	1.246	0.00571	0.443	12.99	1.531	11.24	3515.00	1.216	4.581	1432.58	5.222	1633.20	4.02	0.997739
0.908	0.075	4.539	1811.13	1.27	0.00571	0.444	12.901	1.529	11.267	3547.85	1.214	4.553	1433.79	5.197	1636.60	4.73	1.106642
0.914	0.078	4.570	1994.01	1.293	0.00571	0.444	12.813	1.526	11.293	3580.74	1.211	4.526	1435.00	5.172	1639.99	5.41	1.215868
0.920	0.081	4.601	2178.14	1.316	0.00571	0.444	12.726	1.524	11.32	3613.68	1.208	4.499	1436.20	5.148	1643.36	6.17	1.325421
0.927	0.084	4.633	2363.53	1.338	0.00571	0.445	12.64	1.522	11.346	3646.67	1.206	4.472	1437.41	5.124	1646.71	7	1.435299
0.933	0.088	4.664	2550.17	1.36	0.00571	0.445	12.555	1.519	11.372	3679.70	1.203	4.446	1438.60	5.1	1650.06	7.71	1.545505
0.939	0.091	4.695	2738.08	1.381	0.00571	0.445	12.471	1.517	11.398	3712.78	1.201	4.42	1439.80	5.076	1653.38	8.71	1.656048
0.945	0.094	4.726	2927.24	1.402	0.00571	0.446	12.389	1.515	11.424	3745.91	1.198	4.395	1440.98	5.052	1656.71	9.53	1.766896
0.952	0.097	4.758	3117.64	1.423	0.00571	0.446	12.308	1.513	11.449	3779.08	1.196	4.369	1442.18	5.029	1660.01	10.39	1.878088
0.958	0.100	4.789	3309.31	1.443	0.00571	0.446	12.227	1.51	11.475	3812.29	1.193	4.344	1443.38	5.006	1663.31	11.31	1.989594

Admitiu-se um deslocamento de cinco diâmetros para a verificação da estabilidade, como mostrado na tabela acima (3ª coluna).

Perceba na tabela acima que as espessuras de revestimento de concreto de 0.044m e 0.047m apresentaram valores de gravidade especifica inferiores ao estabelecido na DNV-RP-F109 [3] e segundo a mesma, não podem ser avaliadas pelo critério de Estabilidade Generalizado, devendo ser verificados pelo critério de Estabilidade Estática Absoluta.

A Figura 8.9 apresenta o gráfico correspondente aos fatores de segurança horizontal e vertical relacionados ao peso submerso do duto.

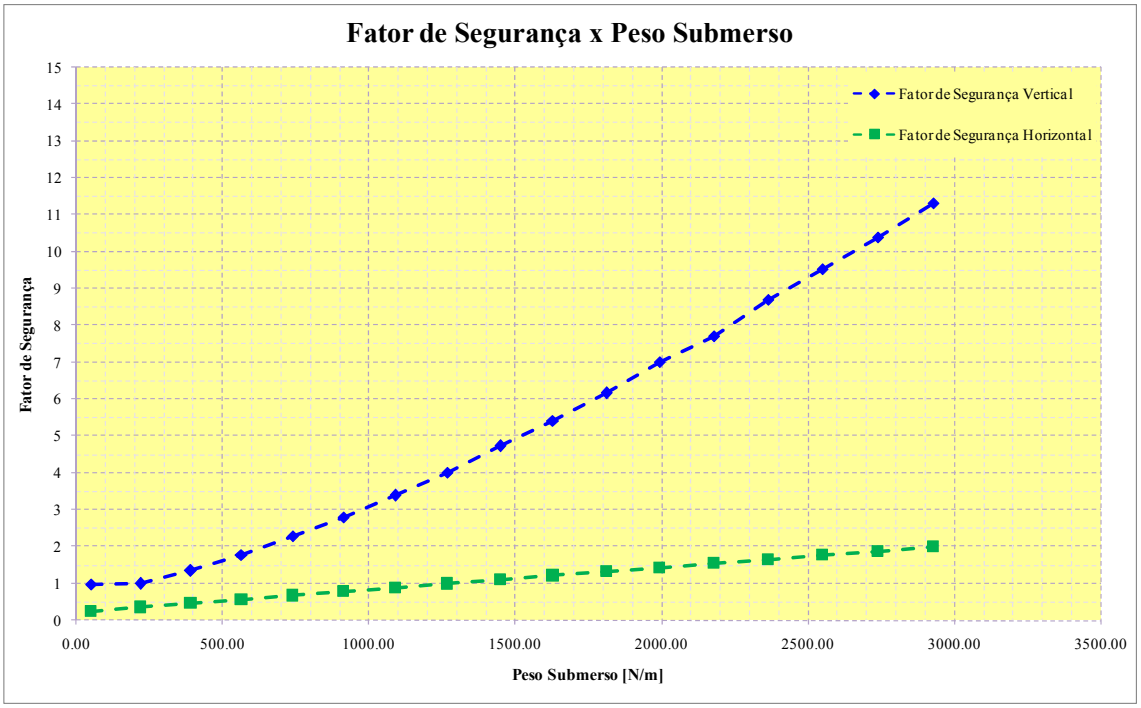


Figura 8.9 – Gráfico Fator de Segurança x Peso Submerso.

Analisando o gráfico acima se pode perceber que a estabilidade horizontal domina o processo de estabilidade de dutos, uma vez que a estabilidade vertical é atingida (≥ 1.1) logo no início da análise, enquanto o fator de segurança horizontal é nulo. A estabilidade horizontal se verifica somente quando o peso submerso atinge valor em torno de 1811 N/m.

É importante documentar que o valor arbitrado para o deslocamento é da ordem de cinco diâmetros e quanto mais restritivo for este deslocamento menor será o fator de estabilidade horizontal.

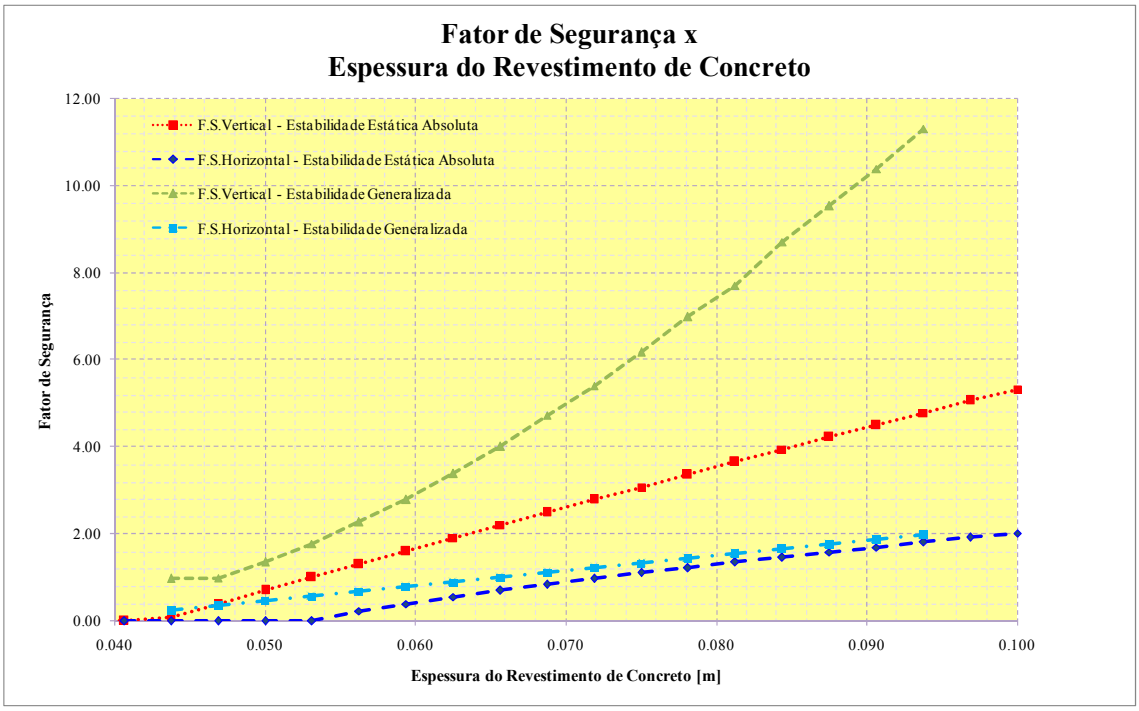


Figura 8.10 – Gráfico Fator de Segurança x Espessura do Revestimento de Concreto (comparação entre as metodologias).

A Figura 8.10 apresenta gráficos comparativos entre as metodologias de estabilidade: Estática Absoluta e Generalizada, com base nos parâmetros de fator de segurança e espessura de revestimento de concreto. Analisando estes gráficos percebe-se nitidamente que os gráficos correspondentes aos fatores de segurança vertical são bastante distintos: o Método Generalizado resulta em valores bem maiores que o Método Estático Absoluto, que apresenta um gráfico praticamente linear a partir de 0.045m de espessura de revestimento de concreto. Já os gráficos relativos aos fatores de segurança horizontal são mais próximos, principalmente para espessuras de concreto superiores a 0.075m. É importante ressaltar que a Metodologia de Estabilidade Generalizada apresenta fatores de segurança superiores à Metodologia Estática Absoluta, para uma mesma espessura de revestimento de concreto.

9 CONCLUSÃO

9.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo do comportamento de dutos apoiados no leito marinho tem estado cada vez mais em voga, devido à necessidade de escoar a produção de óleo em distâncias e lâminas d'água cada vez maiores, com maior eficiência e segurança.

Um grande projeto de pesquisa foi realizado para que se pudessem atingir os objetivos deste trabalho, que é a verificação dos critérios de estabilidade de dutos apoiados no leito marinho.

A análise comparativa realizada no item 8.3.1 demonstrou que o procedimento de cálculo de estabilidade (com base na metodologia de Estabilidade Estática Absoluta) implementado em planilha *Mathcad* é consistente, uma vez que os resultados obtidos são compatíveis com os resultados apresentados no manual do PRCI (AGA) V.2.[4].

As análises paramétricas realizadas no item 8.3.2 demonstraram:

- O fator de segurança horizontal domina a estabilidade de dutos apoiados no leito marinho, ou seja, atendendo-se a estabilidade horizontal está atendida a estabilidade vertical;
- A estabilidade do duto é drasticamente afetada pelas características da onda;
- A lâmina d'água é inversamente proporcional ao peso submerso mínimo: quanto menor a profundidade da região de instalação do duto maior o peso submerso requerido para a estabilidade;
- A altura significativa da onda é diretamente proporcional ao peso submerso mínimo: quanto maior a altura da onda na região onde o duto será instalado, maior o peso submerso mínimo requerido para a estabilidade;
- O período da onda é diretamente proporcional ao peso submerso mínimo: quanto maior o período da onda na região onde a tubulação será instalada, maior o peso submerso mínimo requerido para a estabilidade;

- A estabilidade do duto é drasticamente afetada pelas características do solo que o apóia;
- O fator de atrito do solo é inversamente proporcional ao peso submerso mínimo: quanto menor o fator de atrito maior o peso submerso requerido para a estabilidade.

Com base nos estudos paramétricos realizados (segundo a metodologia de Estabilidade Generalizada) chegou-se às seguintes conclusões:

- O fator de segurança horizontal domina a estabilidade de dutos apoiados no leito marinho: atendendo-se a estabilidade horizontal está atendida a estabilidade vertical;
- O deslocamento admitido para o duto interfere no fator de segurança horizontal;
- A metodologia de Estabilidade Generalizada apresenta fatores de segurança superiores à metodologia de Estabilidade Estática Absoluta, o que vem corroborar a validação das metodologias implementadas, uma vez que o método Estático Absoluto sendo mais restritivo que o Generalizado deve resultar em fatores de segurança realmente menores.

Sem dúvida este trabalho atingiu seu objetivo, mas vale ressaltar que não foi possível avaliar a contribuição de todos os parâmetros envolvidos no cálculo de estabilidade. O campo da estabilidade de dutos é bastante complexo e deve ser profundamente estudado e discutido nos ambientes acadêmicos visando seu aperfeiçoamento.

9.2 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Um trabalho futuro de grande importância seria o cálculo da estabilidade lateral em regiões inclinadas, ou seja, a seção transversal do duto estaria assentada em um plano inclinado e, portanto sujeita aos efeitos de deslizamento e/ou tombamento da tubulação.

Outro trabalho bastante significativo seria implementar em um programa de análise a metodologia de Análise Dinâmica de Estabilidade de dutos submarinos. Está implementação facilitaria a compreensão das curvas de projeto apresentadas pela norma DNV–RP-F109 [3] para o cálculo de estabilidade baseado no método de Estabilidade Generalizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] PETROBRAS. Disponível em:
http://www.petrobras.com.br
Acesso em: 24 de Fevereiro de 2010, 19:00:16.

[2] PETROLEUM ECONOMIST. Disponível em:
http://www.petroleum-economist.com
Acesso em: 24 de Fevereiro de 2010, 19:13:22.

[3] DNV – RP – F109, *"On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines"*, Det Norske Veritas, 2008.

[4] PRCI, *"Submarine Pipeline On-Bottom Stability"*, Pipeline Research Council International, Vol 1 e 2, 2002.

[5] DNV – RP – E305, *"On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines"*, Det Norske Veritas, 1988.

[6] DNV – OS – F101, *"Submarine Pipeline Systems"*, Det Norske Veritas, 2007.

[7] GUO, B., SONG, S., CHACKO, J., GHALAMBOR, A., *"Offshore Pipelines"*, United States, Elsevier, 2005.

[8] FMG TECHNOLOGIES. Disponível em:
http://www.fmctechnologies.com/en.aspx
Acesso em: 17 de Março de 2009, 12:31:15.

[9] CLEAN BETA. Disponível em:
http://cleantechlawandbusiness.com/cleanbeta/index.php/1357/ormen-lange-the-worlds-most-cutting-edge-offshore-gas
Acesso em: 17 de Março de 2009, 12:33:10.

[10] HANIFFAH, M.R.B.M., *"On Bottom Stability Analysis and Design of Submarine Pipeline"*, Bachelor Degree in Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering University Technology of the Malaysia, Malaysia, 2007.

[11] BAI, Y., BAI, Q., *"Subsea Pipelines and Risers"*, 1ª Edition, Elsevier, 2005.

[12] BRAESTRUP, M.W., ANDERSEN ,J.B, ANDERSEN ,L.W, Bryndum, M., CHRISTENSEN, C.J., NIELSEN, N.J.R., *"Design and installation of marine pipelines"*, Blackwell Science Ltd, 1ª Edition, 2005.

[13] MASSA, A.L.L., *"Contribuição ao Estudo de Flambagem em Dutos Rígidos Submarinos Conduzindo Fluidos Aquecidos"*, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2003.

[14] MEISINGSET, H., JOAKIM, H., OLSEN, G., *"Optimization Of Pipeliness Routes"*, Proceedings of The Fourteenth (2004) international Offshore and polar Engineering Conference, Toulon, France, May 23 – 28, 2004.

[15] FERNANDES, D.H.F., JACOB, B.P., LIMA, B.S.L.P., ALBRECHT, C.H., *"Offshore pipelines Route Assessment Via Evolutionary Algorithms"*, Anais do CILAMCE 2008 – XXIX Congresso Ibero Latino-Americano sobre Métodos Computacionais em Engenharia, Maceió, Brazil, Nov 04 – 07, 2008.

[16] SEAS. Disponível em:
http://www.allseas.com/uk/123/multimedia/photo-gallery/pipeline-installation.html
Acesso em: 11 de Março de 2010, 12:31:15.

[17] FISHER OFFSHORE. Disponível em:
http://www.fisheroffshore.com/hydrodigger.htm
Acesso em: 11 de Março de 2010, 12:33:19.

[18] GIAKOUMATOS, E.: "Nonlinear Finite Element Analysis of Steel Pipe Elements Under Pressure and Bending", 2002. Disponível em: http://www.mie.uth.gr/labs/mex-lab/e3.htm Acesso em: 24 de Fevereiro de 2010, 15:22:26.

[19] DNV – RP – F105, *"Free Spanning Pipelines Course"*.

[20] DNV – RP – F105, *"Free Spanning Pipelines"*, Det Norske Veritas, 2006.

[21] GALGOUL, E.C., *"Simulação Numérica de Procedimentos de Instalação de Dutos Submarinos"*, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2009.

[22] JACOVAZZO, B.M., *"Simulação Numérica de Procedimentos para Instalação de Sistemas Offshore"*, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2008.

[23] SILVA, D.M.L., *"Ferramentas Computacionais Para Análise e Projeto de Instalação de Dutos Submarinos"*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2009.

[24] KYRIAKIDES, S., CORONA, E., *"Mechanics of Offshore Pipelines"*, Volume 1: Buckling and Collapse, Elsevier, 2007.

[25] GLOBAL INDUSTRIES. Disponível em: http://www.globalind.com/Operations/Pages/Vessels.aspx Acesso em: 17 de Março de 2009, 12:31:15.

[26] CARDOSO, C.O., *"Metodologia Para Análise e Projeto de Dutos Submarinos Submetidos a Altas Pressões e Temperaturas Via Aplicação do Método dos Elementos Finitos"*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2005.

[27] VERLEY, R. L. P., SOTBERG, T., *"A Soil Resistance Model for Pipelines Placed on Sandy Soils"*, OMAE – Volume 5-A, 1992.

[28] VERLEY, R. L. P., LUND, K. M., *"A Soil Resistance Model for Pipelines Placed on Clay Soils"*, OMAE – Volume 5, 1995.

[29] ASCE, Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe, American Society of Civil Engineers, July, 2001.

[30] BRIDGE, C. D., HOWELLS, H. A., "Observations and Modeling of Steel Catenary Riser Trenches", Proceedings of the Sixteenth (2007) International Offshore and Polar Engineering Conference, Lisbon, Portugal, July 1-6, 2007.

[31] WORLEY: "Subsea & Pipelines Capability", 2004. Disponível em: www.eng.nus.edu.sg/.../WorleySubseaPipelinesCapabilityProfile.pdf Acesso em: 24 de Março de 2009, 12:45:15.

[32] CHAKRABARTI, S.K., *"Hydrodynamics of Offshore Structures"*, Pipeline Research Council International, Vol 1 e 2, 2002.

APÊNDICE A:

DETALHAMENTO DA PLANILHA DE CÁLCULO:

ESTABILIDADE ESTÁTICA ABSOLUTA

Para ilustrar o procedimento de cálculo detalhado da planilha *Mathcad*, a seguir transcreve-se o procedimento referente a penúltima linha da tabela 0, em destaque vermelho.

A.1. PROPRIEDADES FÍSICAS E GEOMÉTRICAS DO DUTO

$OD = 30in$ $OD = 0.76m$ (diâmetro externo do duto)

$t = 0.50in$ (defasagem angular) $t = 0.01m$ (espessura da parede do duto)

$t_p = 0.15625in$ $t_p = 3.97 \times 10^{-3} m$ (espessura do revestimento corrosivo)

$t_c = 3.875in$ $t_c = 0.1m$ (espessura do revestimento concreto)

$D = OD + 2(t_p + t_c)$ $D = 0.97m$ (diâmetro hidrodinâmico)

$Lc_{jc} = 15.00in$ $Lc_{jc} = 0.38m$ (corte da junta de campo)

$m_s = 7850 \frac{kg}{m^3}$ (massa específica do aço)

$\gamma_s = m_s \cdot g$ $\gamma_s = 490.06 \frac{lbf}{ft^3}$ (peso específico do aço)

$\gamma_p = 115 \frac{lbf}{ft^3}$ $\gamma_p = 115 \frac{lbf}{ft^3}$ (peso específico do rev. corr)

$\gamma_{jc} = 190 \frac{lbf}{ft^3}$ $\gamma_{jc} = 190 \frac{lbf}{ft^3}$ (peso específico da junta de campo)

$\gamma_c = 190 \frac{lbf}{ft^3}$ $\gamma_c = 190 \frac{lbf}{ft^3}$ (peso específico do concreto)

$\gamma_i = 0 \frac{tf}{m^3}$ $\gamma_i = 0 \frac{lbf}{m^3}$ (peso específico do fluido interno)

$\gamma_{água} = 1.025 \frac{tf}{m^3}$ $\gamma_{água} = 63.99 \frac{lbf}{ft^3}$ (peso específico da água)

$\theta_{ph} = 53deg$ (âng. de fase da onda)

$\theta_{duto} = 0deg$ (âng. do duto com relação ao Norte)

A.2. PROPRIEDADES HIDRODINÂMICAS

$C_d = 0.7($ (coeficiente de drag)

$C_l = 0.9($ (coeficiente de lift)

$C_i = 3.2$ (coeficiente de inércia)

A.3. CARACTERÍSTICAS DAS CARGAS AMBIENTAIS

$H = 45.00\text{ft}$ $H = 13.72\text{m}$ (altura da onda)

$Prof = 300.00\text{ft}$ $Prof = 91.44\text{m}$ (lâmina d'água)

$T = 14.1\text{sec}$ (período da onda)

$\theta_{onda} = 90\text{deg}$ (âng. de ataque da onda com relação ao Norte')

$\gamma_{água} = 1.03\frac{tf}{m^3}$ (peso específico da água)

$g = 9.81\frac{m}{sec^2}$ (aceleração da gravidade)

$\rho = \frac{\gamma_{água}}{g}$ $\rho = 1.13\frac{ton}{m^3}$ (massa específica da água)

$\theta_{corr} = 90\text{deg}$ (âng. de ataque da correnteza com relação ao Norte')

$U_c = 1.00\frac{ft}{sec}$ $U_c = 0.3\frac{m}{sec}$ (velocidade da corrente)

$w = 2\cdot\frac{\pi}{T}$ $w = 0.45\frac{1}{sec}$ (frequência angular da onda)

$f = \frac{1}{T}$ $f = 0.07\text{Hz}$ (frequência da onda)

A.4. DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE ONDA K

$k = 0.02\text{m}^{-1}$ (número da onda)

$L = \frac{g\cdot T^2}{2\pi}\cdot\tanh(k\cdot Prof)$ $L = 297.51\text{m}$ (comprimento da onda)

$c = \sqrt{\frac{g\cdot L}{2\cdot\pi}\cdot\tanh\left(\frac{2\cdot\pi\cdot Prof}{L}\right)}$ $c = 21.1\frac{m}{sec}$ (celeridade da onda)

$s = \frac{H}{L}$ $s = 0.05$ (steepness - relação entre a altura da onda e o comprimento da onda)

$a = \frac{H}{2}$ $a = 6.86\text{m}$ (amplitudes da onda)

A.5. RESISTÊNCIA DO SOLO

$\phi_{ff_solo} = 0.7($ (fator de fricção do solo)

A.6. CÁLCULO DO PESO DO DUTO

$As = \pi \cdot \frac{\left[OD^2 - (OD - 2t)^2\right]}{4}$ $As = 0.03m^2$ (área de aço)

$Ws = As \cdot \gamma_s$ $Ws = 157.7 \frac{lbf}{ft}$ (peso do aço)

$Ai = \pi \cdot \frac{(OD - 2 \cdot t)^2}{4}$ $Ai = 4.59ft^2$ (área interna)

$Wi = Ai \cdot \gamma_i$ $Wi = 0 \frac{lbf}{ft}$ (peso do fluido interno)

$Ap = \pi \cdot \frac{\left[(OD + 2t_p)^2 - OD^2\right]}{4}$ $Ap = 0.1ft^2$ (área do revest. anti-corr)

$Wp = Ap \cdot \gamma_p$ $Wp = 11.82 \frac{lbf}{ft}$ (peso revest.anti-corr)

$Ac = \pi \cdot \frac{\left[(OD + 2t_p + 2 \cdot t_c)^2 - (OD + 2t_p)^2\right]}{4}$ $Ac = 0.27m^2$ (área de concreto)

$Wc = Ac \cdot \gamma_c$ $Wc = 1.8 \times 10^3 \frac{lbf}{m}$ (peso do concreto)

$OD_t = OD + 2 \cdot (t_p + t_c)$ $OD_t = 0.97m$ (diâmetro total externo)

$Wt = Wc + Wp + Wi + Ws$ $Wt = 718.66 \frac{lbf}{ft}$ (peso total do duto)

A.7. CÁLCULO DO EMPUXO

$At = \pi \cdot \frac{OD_t^2}{4}$ $At = 7.9ft^2$ (área total do duto)

$We = At \cdot \gamma_{água}$ $We = 505.62 \frac{lbf}{ft}$ (peso do fluido deslocado = Empuxo)

A.8. CÁLCULO DO PESO SUBMERSO

$W_s = Wt - We$ $\quad W_s = 213.04 \frac{lbf}{ft}$ (peso submerso)

A.9. CÁLCULO DA GRAVIDADE ESPECÍFICA

$SG = \frac{Wt}{We}$ $\quad SG = 1.42$ (gravidade Específica)

A.10. CÁLCULO DAS VELOCIDADES HORIZONTAIS E VERTICAL

A.10.1. CONCEITO

$u(z,x,t) = a \cdot w \cdot \frac{\cosh[k \cdot (-z + Prof)]}{\sinh(k \cdot Prof)} \cdot \cos\left(k \cdot x - w \cdot t + \theta_{ph}\right)$ (velocidade horizontal)

$u_n(z,x,t) = u(z,x,t) \cdot \sin\left(\theta_{onda} - \theta_{duto}\right) + U_c \cdot \sin\left(\theta_{corr} - \theta_{duto}\right) \cdot 0.9$ (velocidade horizontal normal)

$u_t(z,x,t) = u(z,x,t) \cdot \cos\left(\theta_{onda} - \theta_{duto}\right) + U_c \cdot \cos\left(\theta_{corr} - \theta_{duto}\right) \cdot 0.9$ (velocidade horizontal tangencial)

$v(z,x,t) = a \cdot w \cdot \frac{\sinh[k \cdot (-z + Prof)]}{\sinh(k \cdot Prof)} \cdot \sin\left(k \cdot x - w \cdot t + \theta_{ph}\right)$ (velocidade vertical)

A.10.2. REGIÃO PRÓXIMA AO SEABED

$u(Prof, 0m, 0sec) = 1.79 \frac{ft}{sec}$

$u_n(Prof, 0m, 0sec) = 2.69 \frac{ft}{sec}$ (velocidade horizontal normal)

$u_t(Prof, 0m, 0sec) = -1.03 \times 10^{-15} \frac{ft}{sec}$ (velocidade horizontal tangencial)

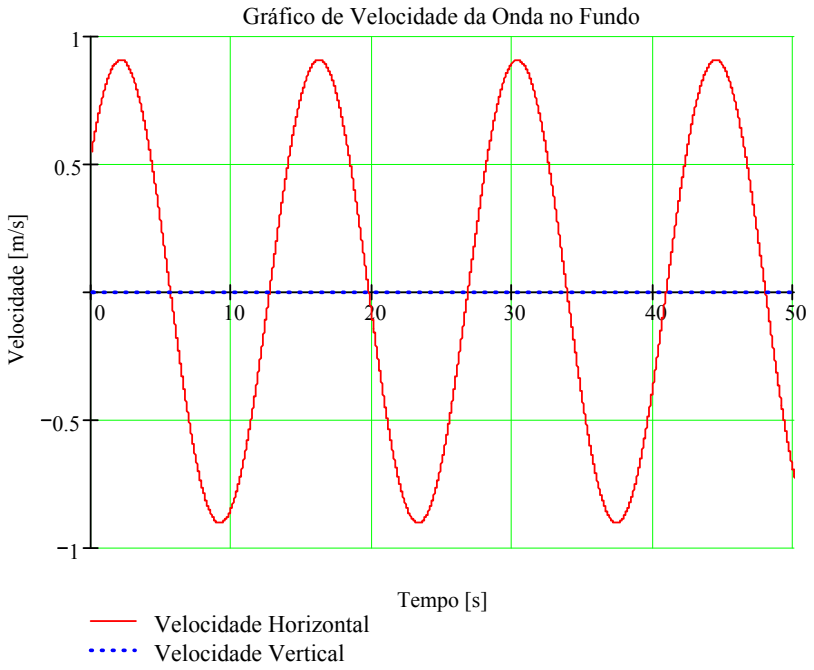


Figura A.1 – Gráfico de Velocidade das Partículas de Água no Fundo devido a Passagem da Onda.

A.11. CÁLCULO DAS ACELERAÇÕES

A.11.1. CONCEITO

$$acel(z,x,t) = a\cdot w^2\cdot\frac{\cosh[k\cdot(-z+Prof)]}{\sinh(k\cdot Prof)}\cdot\sin\left(k\cdot x - w\cdot t + \theta_{ph}\right)$$ (aceleração horizontal)

$$acel_n(z,x,t) = acel(z,x,t)\cdot\sin\left(\theta_{onda} - \theta_{duto}\right)$$ (aceleração horizontal normal)

$$acel_t(z,x,t) = acel(z,x,t)\cdot\cos\left(\theta_{onda} - \theta_{duto}\right)$$ (aceleração horizontal tangencial)

A.11.2. REGIÃO PRÓXIMA AO SEABED

$$acel(Prof, 0m, 0sec) = 1.06\frac{ft}{sec^2}$$ (aceleração horizontal)

$$acel_n(Prof, 0m, 0sec) = 1.06\frac{ft}{sec^2}$$ (aceleração horizontal normal)

$$acel_t(Prof, 0m, 0sec) = 0\frac{ft}{sec^2}$$ (aceleração horizontal tangencial)

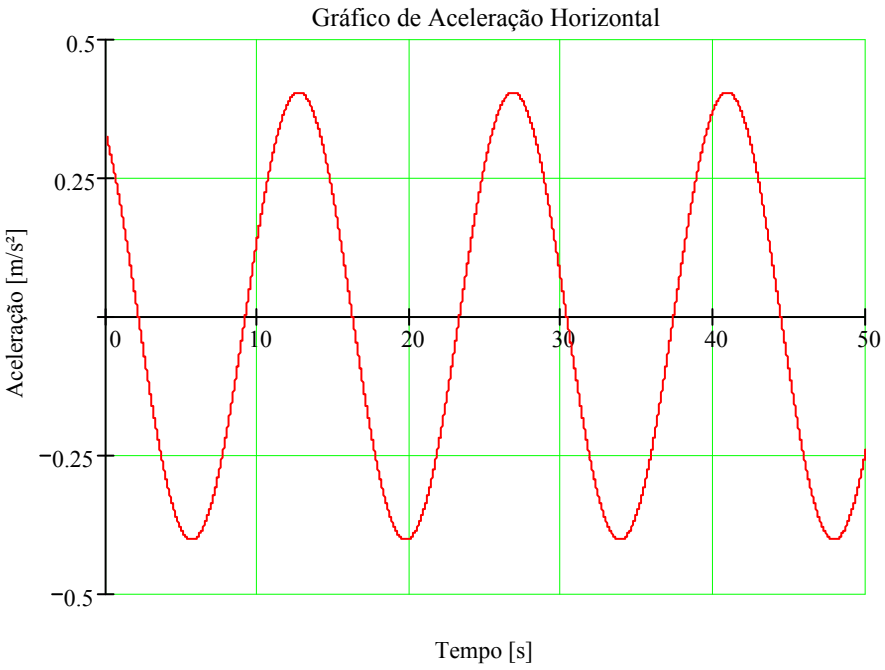


Figura A.2 – Gráfico de Aceleração das Partículas de Água no Fundo devido a Passagem da Onda.

A.12. CÁLCULO DA ELEVAÇÃO DA ONDA

$$n(x,t) = a\cdot\cos\left(w\cdot t - k\cdot x + \theta_{ph}\right)$$ (elevação da superfície da onda)

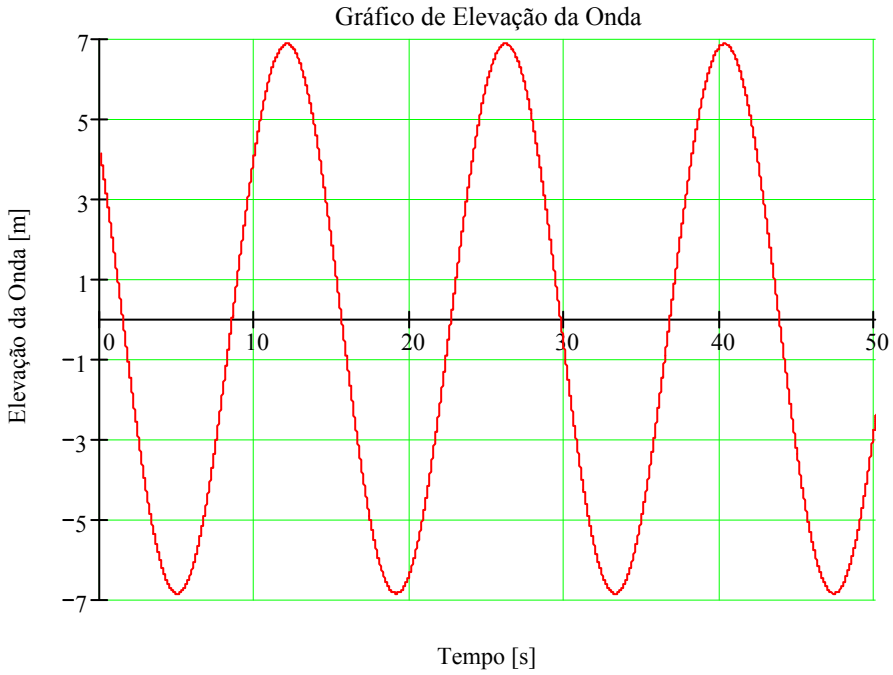


Figura A.3 – Gráfico de Elevação da Onda.

A.13. CÁLCULO DAS FORÇAS HIDRODINÂMICAS

A.13.1. CONCEITO

$$F_d(U) = \frac{1}{2}\cdot\rho\cdot OD_t\cdot C_d\cdot|U|\cdot U \qquad \text{(força de drag)}$$

$$F_i(Acel) = \frac{\pi}{4}\cdot\rho\cdot OD_t^{2}\cdot C_i\cdot Acel \qquad \text{(força de inércia)}$$

$$F_l(U) = \frac{1}{2}\cdot\rho\cdot OD_t\cdot C_l\cdot U^{2} \qquad \text{(força de lift)}$$

$$F_r(U) = \phi_{ff_solo}\cdot\left(W_s - F_l(U)\right) \qquad \text{(resistência passiva do solo)}$$

A.13.2. REGIÃO PRÓXIMA AO SEABED

$$F_d\left(u_n(Prof, 0m, 0sec)\right) = 15.95\frac{lbf}{ft} \qquad \text{(força de drag)}$$

$$F_i\left(acel_n(Prof, 0m, 0sec)\right) = 54.67\frac{lbf}{ft} \qquad \text{(força de inércia)}$$

$$F_l\left(u_n(Prof, 0m, 0sec)\right) = 20.51\frac{lbf}{ft} \qquad \text{(força de lift)}$$

$$F_r\left(u_n(Prof, 0m, 0sec)\right) = 134.77\frac{lbf}{ft} \qquad \text{(resistência passiva do solo)}$$

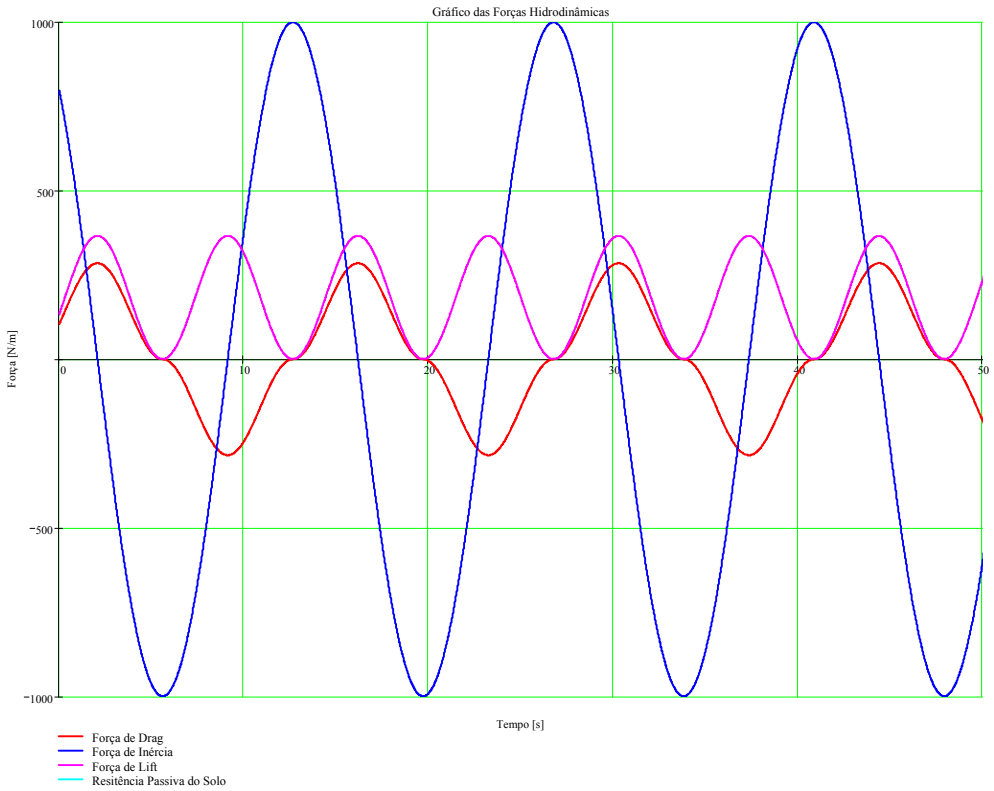


Figura A.4 – Gráfico das Forças Hidrodinâmicas Atuantes no Duto.

A.14. VERIFICAÇÃO DOS FATORES DE SEGURANÇA

A.14.1. HORIZONTAL

$$SF_{horiz} = \frac{F_r\left(u_n(Prof, 0\cdot m, 0\cdot sec)\right)}{F_d\left(u_n(Prof, 0\cdot m, 0\cdot sec)\right) + F_i\left(acel_n(Prof, 0\cdot m, 0\cdot sec)\right)}$$

$SF_{horiz} = 1.91$

A.14.2. VERTICAL

$$SF_{vert} = \frac{W_s}{F_l\left(u_n(Prof, 0m, 0sec)\right)}$$

$SF_{vert} = 10.39$

APÊNDICE B:

DETALHAMENTO DA PLANILHA DE CÁLCULO:

ESTABILIDADE GENERALIZADA

Método Generalizado para o Cálculo de Estabilidade Lateral em Dutos Apoiados no Leito Marinho

1. Introdução

Para isto pode ser mostrado, veja por exemplo Ref. /1/, que o deslocamento lateral Y é governado por um grande conjunto de parâmetros adimensionais. Este parâmetros são definidos abaixo:

$$Y = f\left(L, K, M, N, \tau, G_S, G_c\right)$$

Onde:

D é o diâmetro externo incluindo os revestimentos;

ρ_W é a densidade da água, $\rho_W = 1025\frac{kg}{m^3}$;

w_S é o peso submerso por unidade de comprimento;

U_S é a velocidade oscilatória (amplitude significativa) derivada do espectro da onda de projeto;

T_u é a período de cruzamento da onda de projeto;

L é o Peso significativo, $L = \frac{w_S}{0.5 \cdot \rho_W \cdot D \cdot U_S^{\,2}}$

K é o número significativo de Keulegan-Carpenter, $K = \frac{U_S \cdot T_u}{D}$

M é a relação entre a velocidade oscilatória e o espectro de projeto, $M = \frac{V}{U_S}$

N é o fator de aceleração espectral, $N = \frac{U_S}{g \cdot T_u}$

τ é o número de oscilações no espectro da velocidade de projeto no fundo, $\tau = \frac{T}{T_u}$

G_S é o parâmetro de densidade do solo(areia), $G_S = \frac{\gamma_S}{g \cdot \rho_W}$

G_c é o parâmetro de resistência do solo (argila), $G_c = \frac{S_u}{D \cdot \gamma_S}$

Desde então há um número relativamente limitado de parâmetros de contribuição significantes, o problema de estabilidade no fundo é bem apropriado para estabelecer bancos de dados nos quais o deslocamento é determinado para um conjunto de parâmetros de contribuição.

O projetista pode tirar proveito de uma grande redução de peso permitindo um deslocamento lateral da tubulação limitado a um valor incapaz de resultar em solicitações superiores as admissíveis pelo duto.

As análises dinâmicas que resultam em pesos submersos estão baseadas em um solo oceânico plano que negligencia efeito de forças axiais devido por exemplo a temperatura elevada, pressão e condições de contorno do duto.

2. Curvas de Projeto

Esta seção provê curvas de projeto para o projeto de estabilidade no fundo com um deslocamento lateral na escala de menos do que a metade do diâmetro da tubulação, isto é, para uma tubulação virtualmente estável, até um deslocamento significativo de 10 diâmetros durante o estado de mar adotado. O peso necessário a obtenção de uma tubulação virtualmente estável é aqui denotado por L_{stable}, enquanto que o peso requerido para a obtenção de um deslocamento lateral da tubulação de 10 vezes seu diâmetro é denominado L10. As curvas são obtidas avaliando-se um grande número de análises dinâmicas dimensionais em um fundo oceânico plano, desprezando o alongamento do duto.

Note que todos os casos com valores elevados de N, K e M não representam necessariamente circunstâncias físicas realísticas. Os valores dados são inválidos para os casos extremos que requerem um duto com peso específico (s_g) maior que 3. Nenhum deste métodos deve ser usado para $s_g < 1.05$. O peso específico de um tubo é determinado por:

$$s_g = 1 + \frac{2}{\pi} \cdot N \cdot K \cdot L \qquad \text{(eq. 3.33 - DNV F109)}$$

Em águas profundas, K pode ser muito pequeno quando comparado ao valor de M, visto que a presença de corrente acarreta uma grande elevação no valor de M. Neste casos recomenda-se atender aos critérios estabelecidos em **Absolute Lateral Static Stability Method** (item 3.6 - DNV F109).

L_{stable} independe da duração do estado de mar, enquanto L_{10} é válido para 1000 ondas e pode ser assumido como proporcional ao número de ondas (τ) do estado de mar. Se $L < L_{stable}$, então o deslocamento será considerado de modo conservador variando linearmente com o número de ondas no estado de mar.

$$Y_\tau = 0.5 + (10 - 0.5) \cdot \frac{\tau}{1000} = 0.5 + 0.0095\tau \qquad \text{(eq. 3.34 - DNV F109)}$$

Por exemplo, um estado de mar de três horas com $T_u > 10.8s$ exporá a tubulação a menos de 1000 ondas, e o deslocamento esperado poderá ser reduzido adequadamente.

Os valores de M e K podem ser obtidos através de uma interporlação linear.

O peso requerido para um critério intermediário de deslocamento pode ser calculado de acordo com a seguinte fórmula:

$$\log(L_Y) = \log(L_{stable}) + \frac{\log\left(\frac{L_{stable}}{L_{10}}\right)}{\log\left(\frac{0.5}{0.01\cdot\tau}\right)} \qquad \text{(eq. 3.35 - DNV F109)}$$

Esta aproximação é aplicável a $N \leq 0.02$ para argilas e $N \leq 0.04$ para areias.

A interpolação pode ser executada em G_c para argilas assumindo L proporcional a $\sqrt{G_c}$.(Foi desconsiderado o efeito de variação da densidade do solo para as tubulações assentes em areia.) Note que as curvas são válidas somente para $G_c \leq 2.7$. Para valores mais elevados de G_c recomenda-se respeitar os critérios estabelecidos em **Absolute Lateral Static Stability Method** (item 3.6 - DNV F109).

O peso mínimo requerido do duto para obter uma configuração virtualmente estável pode ser obtido com base nas tabelas a seguir (note que para $K \geq 10$ o peso mínimo independe de N):

tabela 1 - Peso mínimo, $\frac{L_{stable}}{(2+M)^2}$, para dutos em areia, $K \geq 10$

K / M	10	15	20	30	40	60
0	1.5	1.42	1.35	1.25	1.22	1.22
0.2	1.5	1.42	1.35	1.25	1.22	1.22
0.4	1.82	1.7	1.61	1.53	1.5	1.5
0.5	2.19	1.97	1.83	1.69	1.61	1.61
0.6	2.65	2.35	2.18	1.99	1.85	1.72
0.8	3.05	2.55	2.32	2.13	2.01	1.9
1.0	3.05	2.55	2.4	2.2	2.06	1.95
1.5	2.65	2.45	2.36	2.24	2.11	2.09
2.0	2.5	2.4	2.35	2.27	2.22	2.19
4.0	2.45	2.4	2.39	2.37	2.37	2.37
10.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5

Para $K \leq 5$, o peso mínimo do duto requerido para obter uma configuração virtualmente estável pode ser obtido com base na tabela a seguir (note que o peso mínimo depende de N):

Rotina para calcular gráfico

tabela 2 - Peso mínimo, $\frac{L_{stable}}{(2+M)^2}$, para dutos em areia, $K \leq 5$

M \ N	0.003	0.006	0.012	0.024	0.048
0.2	1.55	1.45	1.34	1.24	1.13
0.4	2	1.65	1.34	1.24	1.13
0.5	3.3	2.6	1.91	1.24	1.13
0.6	3.75	3.07	2.38	1.7	1.13
0.8	4	3.45	2.9	2.36	1.81
1.0	3.9	3.5	3.1	2.71	2.31
1.5	3.25	3.13	3	2.88	2.75
2.0	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75
4.0	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
10.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5

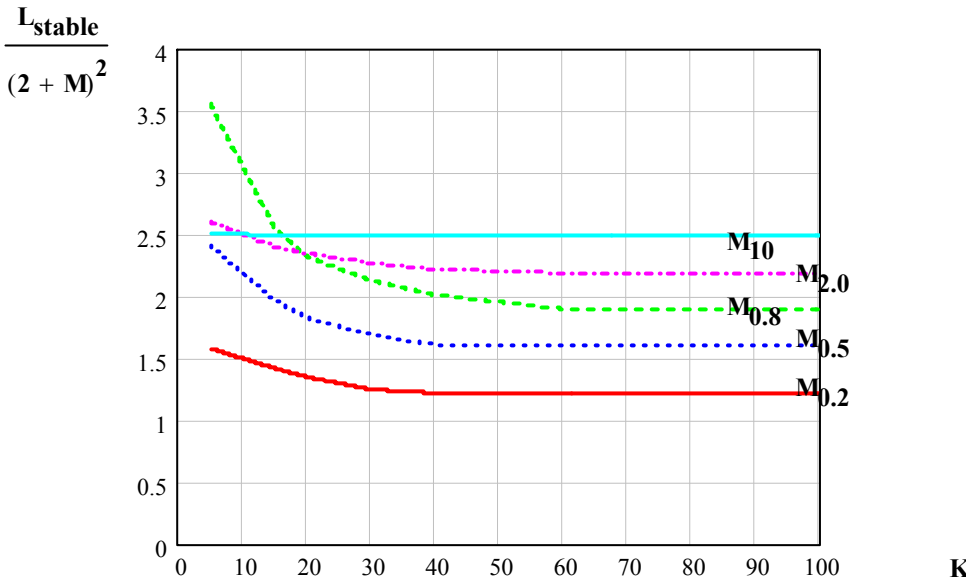


Figura 1 - Peso mínimo, $\frac{L_{stable}}{(2+M)^2}$, para dutos em areia, $K \leq 5$

O peso mínimo da tubulação requerido para limitar o deslocamento lateral a 10 diâmetros do duto para as tubulações na areia pode ser obtido com base na tabela a seguir:

tabela 3 - Peso mínimo, $\frac{L_{10}}{(2 + M)^2}$, para dutos em areia, $K \leq 5$

M \ K	5	10	15	20	30	40	60	100
0.0	0.20	0.41	0.61	0.81	0.69	0.69	0.69	0.69
0.2	0.20	0.41	0.61	0.81	0.69	0.69	0.69	0.69
0.4	0.31	0.62	0.93	0.81	0.75	0.72	0.70	0.70
0.5	0.34	0.69	1.03	0.93	0.83	0.78	0.75	1.00
0.6	0.79	1.20	1.13	1.10	1.07	1.05	1.03	1.02
0.8	0.85	1.40	1.37	1.35	1.33	1.33	1.32	1.31
1.0	1.60	1.50	1.47	1.45	1.43	1.43	1.42	1.41
1.5	1.80	1.70	1.67	1.65	1.63	1.63	1.62	1.61
2.0	1.90	1.80	1.77	1.75	1.73	1.73	1.72	1.71
4.0	2.10	2.00	1.97	1.95	1.93	1.93	1.92	1.91
10.0	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50

Rotina para calcular gráfico

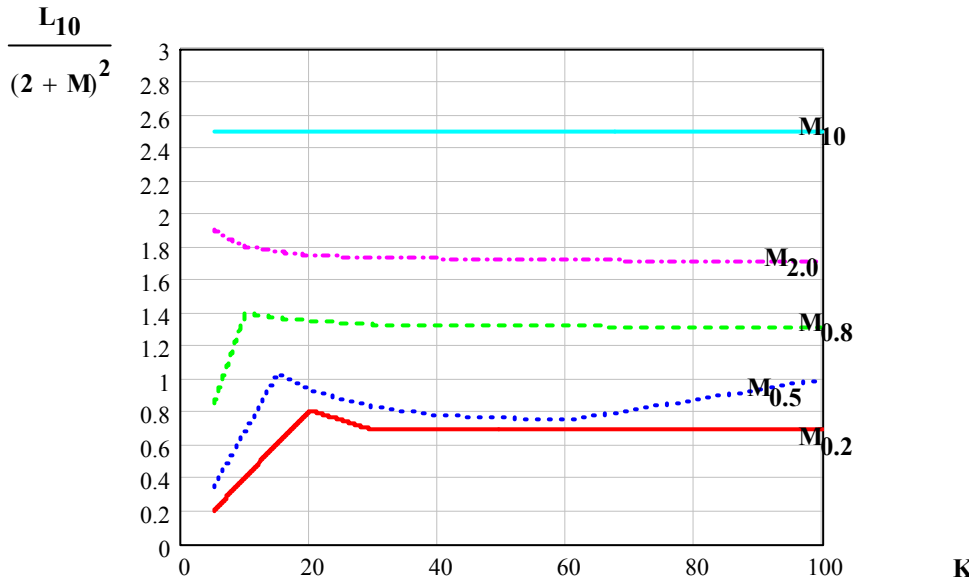


Figura 2 - Peso mínimo, $\frac{L_{10}}{(2 + M)^2}$, para dutos em areia, $K \leq 5$

O peso mínimo da tubulação requerido para limitar o deslocamento relativo máximo (Y) a 0.5 em solo argiloso pode ser calculado pelas fórmulas a seguir:

$$L_{stable} = 90 \cdot \sqrt{\frac{G_c}{N^{0.67} \cdot K}} \cdot f(M)$$ (eq. 3.36 - DNV F109)

$$f(M) = \left[0.58 \cdot (\log(M))^2 + 0.60 \cdot (\log(M) + 0.47) \right]^{1.1}$$

Esta fórmula pode resultar em pesos elevados para grandes valores de G, podendo ser aplicada caso o critério estabelecido em **Absolute Lateral Static Stability Method** (item 3.6 - DNV F109) resultar em uma tubulação mais leve.

O peso mínimo da tubulação requerido para limitar o deslocamento relativo máximo (Y) a $10 \cdot \frac{\tau}{1000}$ na argila, pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$\frac{L_{10}}{(2 + M)^2} = \begin{cases} C_1 + \dfrac{C_2}{K^{C_3}} & \text{if } K \geq K_b \\ C_1 + \dfrac{C_2}{K_b^{C_3}} & \text{otherwise} \end{cases}$$ (eq. 3.37 - DNV F109)

com os coeficientes tabulados no apendice A.