



ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE DUTOS RÍGIDOS SUBMARINOS SUJEITOS À AÇÃO DE ONDAS E CORRENTES MARINHAS

Juliana Oliveira Queiroz

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Gilberto Bruno Ellwanger

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2011

ANÁLISE DE ESTABILIDADE EM DUTOS RÍGIDOS SUBMARINOS
SUJEITOS À AÇÃO DE ONDAS E CORRENTES MARINHAS

Juliana Oliveira Queiroz

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO
DE ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinada por:

Prof. Gilberto Bruno Ellwanger, D.Sc.

Prof. José Antonio Fontes Santiago, D.Sc.

José Renato Mendes de Sousa, Pesquisador.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
FEVEREIRO de 2011

Queiroz, Juliana Oliveira

Análise de Estabilidade em Dutos Rígidos Submarinos
Sujeitos à Ação de Ondas e Correntes Marinhas/ Juliana
Oliveira Queiroz. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola
Politécnica, 2011.

X, 61 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Gilberto Bruno Ellwanger

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/
Curso de Engenharia Civil, 2011.

Referencias Bibliográficas: p.61.

1. Dutos Submarinos. 2. Estruturas *Offshore*. 3.
Estabilidade Hidrodinâmica. I. Ellwanger, Gilberto Bruno.
II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola
Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Título.

Dedico este trabalho aos meus
pais, sem os quais eu nada seria.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família que sempre me apoiou em todas as decisões e que me permitiu o bem mais precioso que nada poderá me tirar, o conhecimento.

À minha mãe, Ana, pelo amor incondicional, paciência, carinho, atenção e dedicação.

Ao meu pai, Fernando, pessoa de quem tenho muito orgulho e em quem me espelho. Pelo amor e pelos valores transmitidos.

À minha irmã, Viviana, por estar sempre ao meu lado.

À minha madrinha e tia, Alda, pelo amor ofertado, amizade, carinho e companheirismo.

Ao meu namorado, Renato, pelo amor, carinho, compreensão, paciência e por estar ao meu lado ao longo dos cinco anos de faculdade, me dando todo o apoio e incentivo que eu precisei.

Aos meus amigos, que nunca me faltaram com apoio.

Aos amigos da SUPORTE, em especial à equipe de dutos que me recebeu com muito carinho e aos Eng^{os} Nelson Szilard, Elton Charles e Elson Nascimento por terem me dado a oportunidade de estagiar na SUPORTE.

Ao professor Gilberto Ellwanger, pelo voto de confiança depositado, pela orientação neste projeto, pelos ensinamentos e paciência.

Aos membros da banca, professor José Antônio Santiago e Eng^o José Renato de Sousa, pela disposição em avaliar o trabalho.

Aos meus colegas de turma da faculdade, que tornaram a caminhada menos árdua durante esses anos.

Aos meus amigos de trabalho, Felipe e Victor Bandeira, pelo aprendizado, pelo tempo despendido, pela paciência, pela amizade e por terem me ensinado muito que hoje sei a respeito de dutos submarinos.

Ao Eng^o André Massa, pelas dicas e pelo incentivo durante a elaboração do trabalho.

Agradeço a cada um que, de alguma forma, contribuiu para a minha formação ao longo do meu caminho até aqui, mas agradeço em especial às pessoas que contribuíram mais diretamente para a conclusão deste trabalho.

Por fim, agradeço a Deus por iluminar minha trajetória, colocar cada uma dessas pessoas em meu caminho e permitir a realização de mais uma importante etapa da minha vida.

Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Análise de Estabilidade em Duros Rígidos Submarinos Sujeitos à Ação de Ondas e Correntes Marinhas

Juliana Oliveira Queiroz

Fevereiro/2011

Orientador: Gilberto Bruno Ellwanger

Curso: Engenharia Civil

Este projeto apresenta os conceitos e formulações fundamentais para a realização de uma análise de estabilidade de dutos submarinos sujeitos à ação de ondas e correntes marinhas e tem por objetivo calcular a espessura de revestimento de concreto necessária para manter um oleoduto com diâmetro de 20 pol (51 cm) na rota pré-definida.

No projeto, foram consideradas as condições de instalação, operação e teste hidrostático com combinações de ondas e correntes de diferentes períodos de recorrência.

A análise de estabilidade do duto foi executada de acordo com as recomendações da norma DNV-RP-F109[4], através da utilização de planilha Mathcad. Também foi realizado um estudo de sensibilidade para avaliar o efeito da variação de alguns dos principais parâmetros envolvidos no cálculo da estabilidade de fundo do duto.

Palavras-chave: Dutos Submarinos, Estruturas Offshore, Estabilidade Hidrodinâmica.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

STABILITY ANALYSIS IN SUBMARINE PIPELINES SUBJECT TO THE ACTION OF WAVES AND MARINE CURRENTS.

Juliana Oliveira Queiroz

February /2011

Advisor: Gilberto Bruno Ellwanger

Course: Civil Engineering

This project presents the fundamental concepts and formulations for performing a stability analysis of submarine pipelines subjected to the action of waves and ocean currents and aims to calculate the coating thickness of concrete required to maintain a pipeline with a diameter of 20 inches (51 cm) within the desired route.

In this project, pipeline on-bottom stability has been assessed for installation, hydrotest and operation conditions with combinations of waves and currents of different periods of recurrence.

The stability analysis of the pipe was performed in accordance with the recommendations present in international code, DNV-RP-F109 [4], by using Mathcad worksheet. Furthermore, it was performed a sensitivity study to evaluate the variation effect of the main parameters involved in the calculation of pipeline on-bottom hydrodynamic stability.

Keywords: Submarine Pipelines, Offshore Structure, Hydrodynamic Stability.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTO	1
1.2 MOTIVAÇÃO	2
1.3 OBJETIVO E ESCOPO.....	2
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	3
2. DUTOS RÍGIDOS SUBMARINOS	4
2.1 INTRODUÇÃO	4
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS DUTOS.....	5
2.3 COMPOSIÇÃO DOS DUTOS	8
2.4 ETAPAS DO PROJETO DE DIMENSIONAMENTO	9
3. ANÁLISE DE ESTABILIDADE	19
3.1 FORÇAS ATUANTES NO DUTO	19
3.2 CORRENTES.....	22
3.3 ONDAS.....	24
4. CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO DA DNV	28
4.1 MÉTODOS DE ESTABILIDADE LATERAL DE DUTOS	28
4.2 CRITÉRIO DE ESTABILIDADE VERTICAL.....	30
4.3 INTERAÇÃO SOLO-DUTO	31
4.4 CÁLCULO DAS FORÇAS HIDRODINÂMICAS	36
5. ESTUDO DO CASO	40
5.1 GERAL	40
5.2 PROFUNDIDADE D' ÁGUA MÁXIMA	41
5.3 CARACTERÍSTICAS DO DUTO	41
5.4 DADOS METEOCENOGRÁFICOS.....	42
5.5 DADOS DE SOLO	44
5.6 DADOS DE ENTRADA DA ANÁLISE.....	45
6. RESULTADOS	46
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
7.1 CONCLUSÕES	59
7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
8. REFERÊNCIAS BLIBIOGRÁFICAS	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Estruturas utilizadas para a exploração de petróleo [1].....	1
Figura 1.2 - Meta da Petrobrás para a produção de óleo e gás natural [2].....	1
Figura 2.1 - Sistema de dutos submarinos [6].....	4
Figura 2.2 - Exemplo de duto flexível [7].....	5
Figura 2.3 - Exemplo de duto rígido em processo de construção [7].....	6
Figura 2.4 - Flowlines conectados ao PLEM [13].....	6
Figura 2.5 - Dutos de Exportação [8].....	7
Figura 2.6 - Dutos de importação/injeção [3].....	7
Figura 2.7 - Seção transversal do duto [6].....	8
Figura 2.8 - Exemplo do traçado em planta da rota de um duto [9].....	9
Figura 2.9 - Forças atuantes m uma seção de duto [10].....	10
Figura 2.10 - Vão livre ao longo da rota do duto submarino [14].....	11
Figura 2.11 - Exemplos típicos de vão livre [10].....	11
Figura 2.12 - Escavação de trincheira em solos arenosos e argilosos respectivamente [10].....	12
Figura 2.13 - Blocos de cimento para correção de vão livre [10].....	12
Figura 2.14 - Exemplos de anodos de sacrifício para proteção catódica [7].....	13
Figura 2.15 - Configuração do duto no método <i>S-Lay</i> [3].....	15
Figura 2.16 - Foto da Balsa Solitaire [13].....	15
Figura 2.17 - Configuração do duto no método <i>J-Lay</i> [3].....	16
Figura 2.18 - Foto da balsa <i>J-Lay Balder</i> [13].....	17
Figura 2.19 - Configuração do duto no método <i>Reel-Lay</i> [3].....	18
Figura 2.20 - Foto da embarcação <i>Deep Blue</i> [13].....	18
Figura 3.1 - Forças atuantes em dutos submarinos [10].....	19
Figura 3.2 - Cargas ambientais atuantes em um duto submarino [11].....	21
Figura 3.3 - Perfil de velocidade de corrente típico [15].....	22
Figura 3.4 - Esquema da aplicação da corrente no duto [7].....	23
Figura 3.5 - Modelo de iteração kh de equação transcendental [16].....	25
Figura 3.6 - Fator de redução devido ao espreadimento e directionaly da onda [4].....	27
Figura 4.1 - Parâmetros da penetração [4].....	34
Figura 4.2 - Fator de Redução devido à penetração [4].....	34
Figura 4.3 - Definição dos Parâmetros do Entrincheiramento [4].....	35
Figura 4.4 - Fator de Redução devido ao Entrincheiramento [4].....	35
Figura 4.5 - Gráfico relativo ao coeficiente de pico de carga horizontal [4].....	38
Figura 4.6 - Gráfico relativo ao coeficiente de pico de carga vertical [4].....	39
Figura 5.1 - Diretriz do duto de 20pol na Bacia de Campos [12].....	40
Figura 6.1 - Gráfico de correlação Fator de Segurança x Peso submerso.....	48
Figura 6.2 - Gráfico de correlação Peso submerso mínimo x Velocidade de corrente.....	50
Figura 6.3 - Gráfico de correlação Peso submerso mínimo x Profundidade d'água.....	52
Figura 6.4 - Gráfico de correlação Peso submerso mínimo x Altura da onda.....	54
Figura 6.5 - Gráfico de correlação Peso submerso mínimo x Período da onda.....	56
Figura 6.6 - Gráfico de correlação Peso submerso mínimo x Fator de atrito do solo.....	57

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Rugosidade do solo do leito marinho [4].....	23
Tabela 3.2 - Fatores de redução de Força.....	29
Tabela 4.1 - Fator de Segurança: Tempestade de Inverno no Mar do Norte [4].....	37
Tabela 4.2 - Fator de Segurança: Tempestade de Inverno no Golfo do México e no Mar do Sul [4].....	37
Tabela 4.3 - Coeficiente de pico de carga horizontal [4].....	37
Tabela 4.4 - Coeficiente de pico de carga vertical [4].....	38
Tabela 5.1 - Características dos dutos.....	41
Tabela 5.2 - Carregamentos ambientais de Onda e Corrente.....	42
Tabela 5.3 - Valores de Intensidade da Corrente (m/s) por Período de Retorno.....	42
Tabela 5.4 - Valores Médios de Corrente para todo perfil na Bacia de Campos.....	43
Tabela 5.5 - Relação entre Alturas de Onda com o Período de Retorno.....	43
Tabela 5.6 - Períodos relacionados à Altura de Onda.....	44
Tabela 5.7 - Parâmetros para instalação com tempo de recorrência de 1 ano.....	45
Tabela 6.1 - Estabilidade do duto para coeficiente de atrito lateral ($\mu=0,6$).....	46
Tabela 6.2 - Análise de sensibilidade do peso submerso do duto.....	47
Tabela 6.3 - Análise de sensibilidade da velocidade de corrente.....	49
Tabela 6.4 - Análise de sensibilidade da Profundidade d'água.....	51
Tabela 6.5 - Análise de sensibilidade da Altura da Onda.....	53
Tabela 6.6 - Análise de Sensibilidade do Período da Onda.....	55
Tabela 6.7 - Análise de Sensibilidade do Fator de Atrito do Solo.....	57

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

O aumento da demanda mundial por petróleo e gás vem direcionando as principais empresas exploradoras à procura de reservatórios situados em águas cada vez mais profundas. Tal fato motiva o contínuo desenvolvimento de suas habilidades e capacidades para o desenvolvimento de idéias e novas tecnologias. A Figura 1.1 ilustra estruturas utilizadas para a exploração de petróleo.

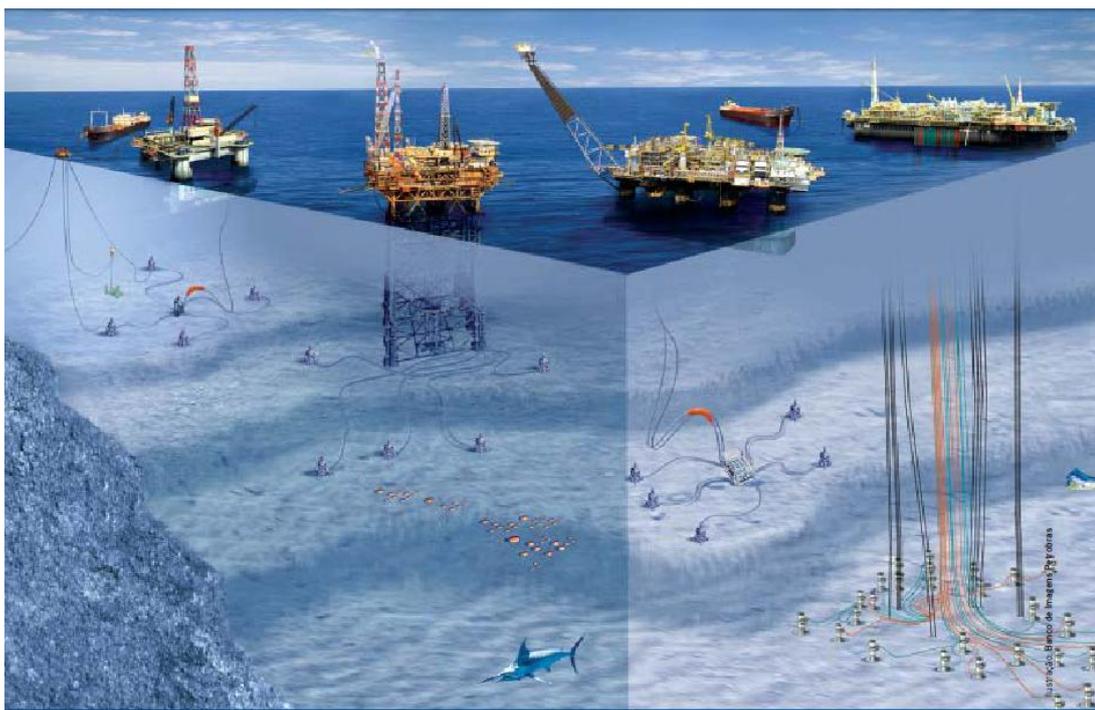


Figura 1.1 – Estruturas utilizadas para a exploração de petróleo[1].

Em poucos anos, a indústria de produtos e serviços submarinos passou de um pequeno nicho para um dos maiores mercados da indústria *offshore*.

Se na década de 1970 as companhias ainda lutavam com enormes problemas para operar em águas relativamente rasas das plataformas continentais, a 100 ou 200 m de profundidade, hoje a indústria pode contar com equipamentos projetados para uso em até 3.000 m de lâmina d'água. O resultado de tais avanços é a intensificação das atividades exploratórias e, conseqüentemente, uma perspectiva de grande aumento da produção de óleo e gás no território nacional para os próximos anos, conforme pode ser observado na Figura 1.2.

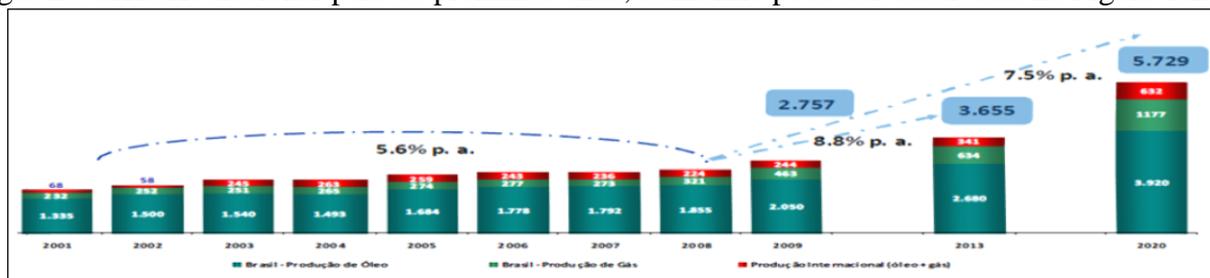


Figura 1.2 – Meta da Petrobras para a produção de óleo e gás natural [2].

1.2 MOTIVAÇÃO

A exploração de petróleo e gás vem crescendo nas últimas décadas e tem se apresentado como uma atividade de enorme importância no atual cenário sócio-econômico do país.

A descoberta de grandes reservas petrolíferas proporcionou uma demanda ainda maior pela instalação de dutos rígidos submarinos, estruturas estas responsáveis pelo escoamento da matéria-prima entre o poço de produção e o continente, e pela interligação entre as plataformas produtoras, em virtude de sua elevada resistência ao colapso em grandes profundidades e simplicidade estrutural.

Embora a utilização de dutos submarinos corresponda ao meio de transporte de fluido mais eficiente até o momento na área *offshore*, qualquer tipo de falha pode acarretar danos irreversíveis ao meio ambiente e alto custo de recuperação e reparo. Por esse motivo, tanto o dimensionamento de dutos rígidos submarinos quanto a manutenção de todos os dutos existentes devem ser realizados de forma efetiva, de modo a minimizar possíveis erros.

Um dos possíveis problemas que pode causar a falha de um duto submarino está diretamente relacionado à sua estabilidade hidrodinâmica de fundo. Sendo assim, é necessário assegurar que o duto permaneça na diretriz estabelecida em projeto durante os períodos de instalação e operação para que não haja deslocamentos que possam causar danos à integridade estrutural dos dutos.

O presente trabalho é motivado pela necessidade não só de se analisar a estabilidade de fundo em dutos rígidos sujeitos à ação de ondas e correntes marinhas, mas também de se desenvolver ferramentas práticas para o cálculo da espessura de concreto necessária para a garantia da estabilidade, através das recomendações presentes na norma DNV-RP-F109 [4], a qual reflete o estado-da-arte nas práticas atuais da indústria e pesquisas recentes.

1.3 OBJETIVO E ESCOPO

O presente trabalho tem por objetivo apresentar os critérios de estabilidade hidrodinâmica presentes na norma DNV-RP-F109 [4], bem como avaliar a estabilidade de fundo de um oleoduto localizado na região da Bacia de Campos por meio do critério estático, mais precisamente pelo Método de Estabilidade Lateral Absoluta, método este mais abrangente em projetos de dutos submarinos.

Serão consideradas as condições de instalação, operação e teste hidrostático em função dos efeitos hidrodinâmicos resultantes das ações combinadas de onda e corrente, das características físicas da tubulação e das propriedades do leito marinho, tais como: rigidez, peso específico, granulometria, coesividade, etc..

As análises foram desenvolvidas com base nos critérios preconizados pela DNV-RP-F109[4], através da utilização de planilhas executadas em ambiente MathCad.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este item destina-se a descrever sucintamente os assuntos abordados em cada capítulo, de forma a facilitar a compreensão do leitor.

O Capítulo 2 tem como objetivo dar uma visão geral dos tipos de duto, sua composição e etapas do projeto de dimensionamento de dutos.

O Capítulo 3 tem como objetivo descrever os carregamentos que atuam no duto e apresentar as formulações para o cálculo dos mesmos.

O Capítulo 4 apresenta toda a metodologia utilizada para a realização da análise de estabilidade hidrodinâmica em dutos submarinos, de acordo com a norma internacional DNV RP-F109 2010 [4].

O Capítulo 5 apresenta todos os dados utilizados no projeto.

O Capítulo 6 apresenta os resultados das simulações para as condições descritas ao longo do projeto.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões dos resultados obtidos e sugestões para prosseguimento dos estudos realizados.

O Capítulo 8 apresenta todas as referências bibliográficas utilizadas ao longo deste projeto, as quais serviram de base teórica e prática para a metodologia de avaliação da estabilidade de fundo de dutos submarinos.

2. DUTOS RÍGIDOS SUBMARINOS

2.1 INTRODUÇÃO

O sistema de dutos tem sido amplamente utilizado nas últimas décadas para transportar fluidos derivados do petróleo tanto no continente como em regiões afastadas da costa, denominadas *offshore*. Os dutos submarinos tornaram-se um dos meios mais eficientes para se transportar petróleo e seus derivados de maneira contínua e confiável entre plataformas produtoras, entre o poço e a plataforma ou entre a plataforma e um local em terra. O trecho de duto em suspensão que se conecta à plataforma é denominado de *riser* e o trecho que fica em contato com o solo marinho é denominado de duto submarino (*pipeline, flowline*). Na Figura 2.1, pode-se observar um sistema típico de dutos submarinos.

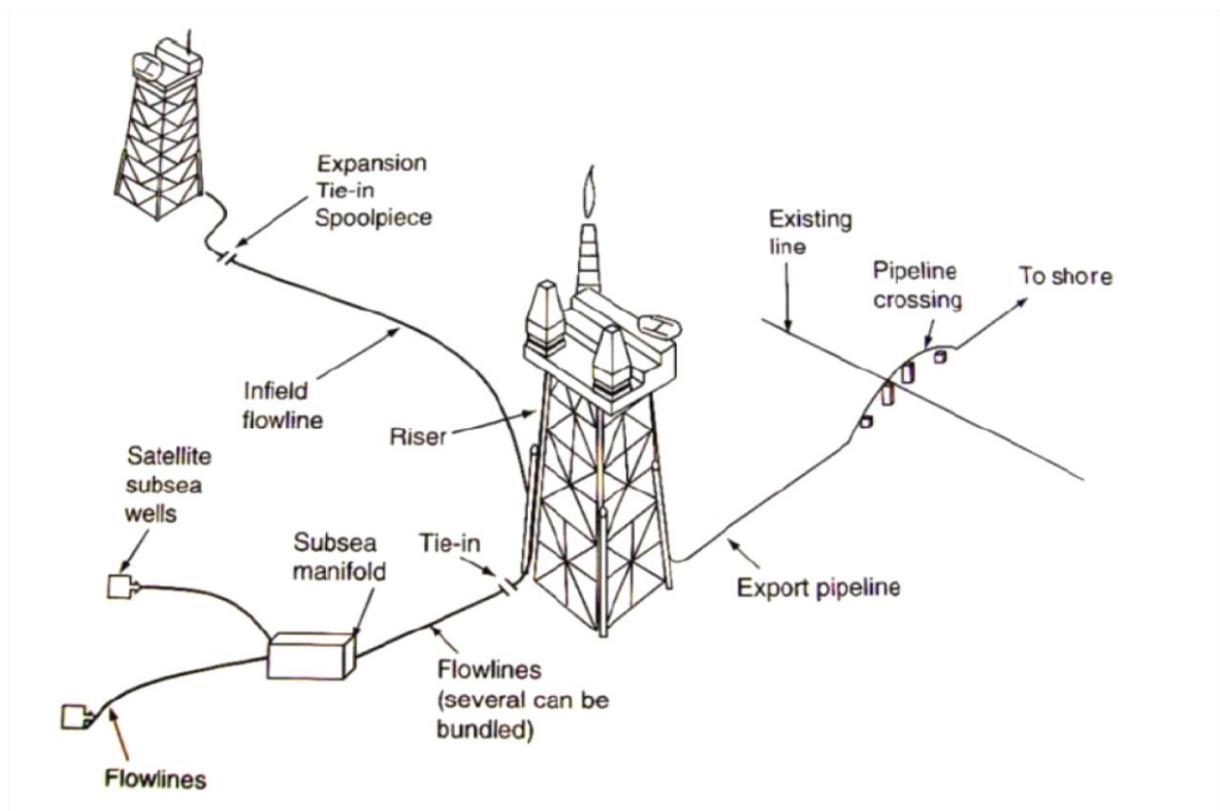


Figura 2.1 – Sistema de dutos submarinos [6].

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS DUTOS

O duto submarino, quanto ao seu material constituinte, pode ser classificado em duto flexível ou duto rígido.

a) Duto Flexível:

O duto flexível é um tipo de duto para aplicações dinâmicas ou estáticas, empregado em atividades de produção em plataformas do tipo flutuante. São responsáveis por conectar a unidade flutuante de produção a um equipamento de fundo ou a uma linha estática (*flowline*).

Principais características:

- Sua estrutura é composta por diversas camadas concêntricas de materiais metálicos e poliméricos (Figura 2.2).

Quando comparado a dutos rígidos:

- Possui maior flexibilidade de traçado devido ao menor raio de curvatura;
- Possui menor sensibilidade aos acidentes no fundo do mar (vãos, ondulações).
- Possui baixa rigidez à flexão, permitindo ajustar-se aos movimentos da plataforma, e elevada rigidez axial.

A Figura 2.2 abaixo apresenta um exemplo de duto flexível.

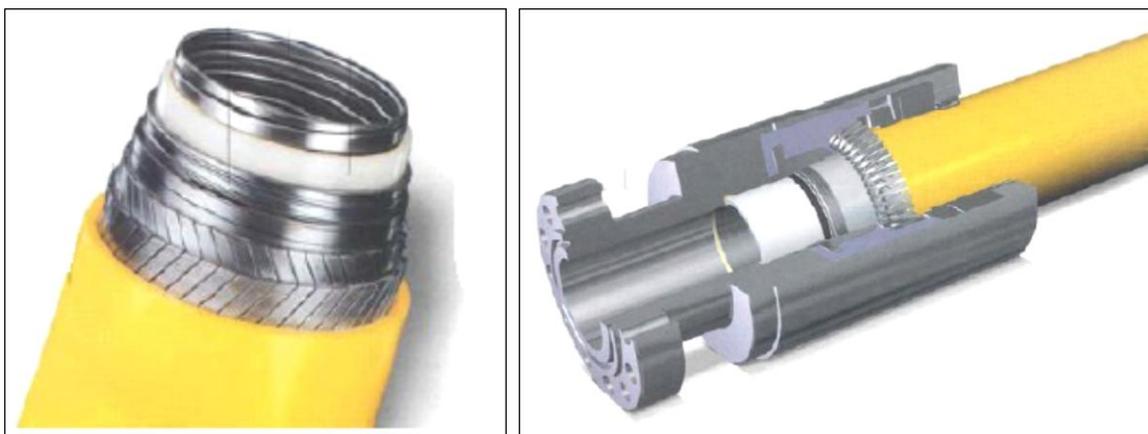


Figura 2.2 – Exemplo de duto flexível [7].

b) Duto Rígido:

Principais características:

- Necessidade de calçamento dos dutos nos trechos com grandes vãos.
- Possui, usualmente, grande rigidez e resistência a cargas axiais, radiais e de flexão (Figura 2.3).

Quando comparado a dutos flexíveis:

- Menor flexibilidade de traçado, devido ao maior raio de curvatura;
- Maior sensibilidade aos acidentes no fundo do mar;
- Possui um menor custo e são capazes de resistir a altas pressões, tornando sua utilização interessante em águas profundas e ultra profundas.

A Figura 2.3 abaixo apresenta um exemplo de duto rígido em processo de construção.



Figura 2.3 – Exemplo de duto rígido em processo de construção [7].

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

- *Flowlines* - são dutos apoiados sobre o leito marinho, que se conectam às unidades flutuantes ou fixas por meio de dutos verticais ou em catenária, chamados *risers*. Estas linhas fazem a ligação entre o poço e o *manifold* ou a plataforma.

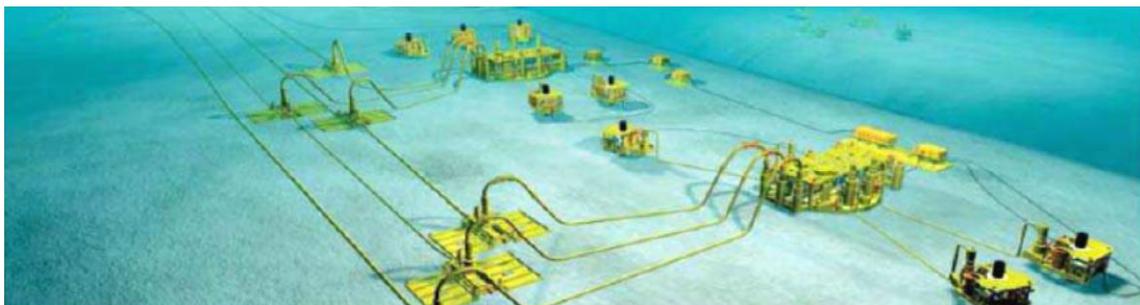


Figura 2.4 – Flowlines conectados ao PLEM [13].

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

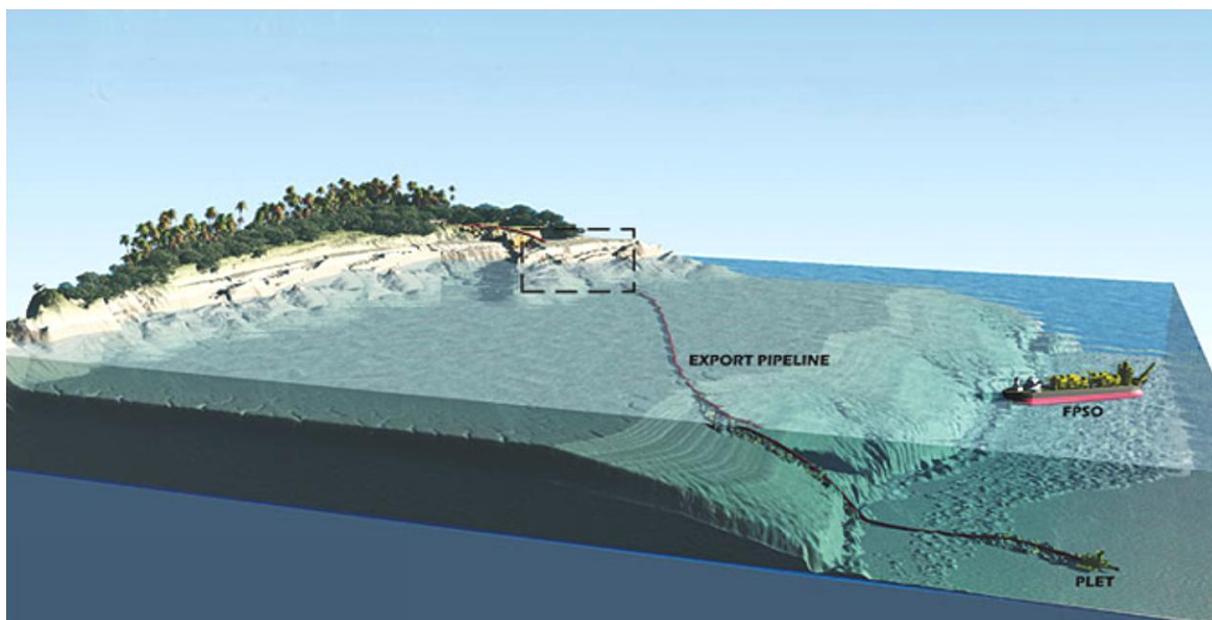


Figura 2.5 – Dutos de Exportação [8].

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

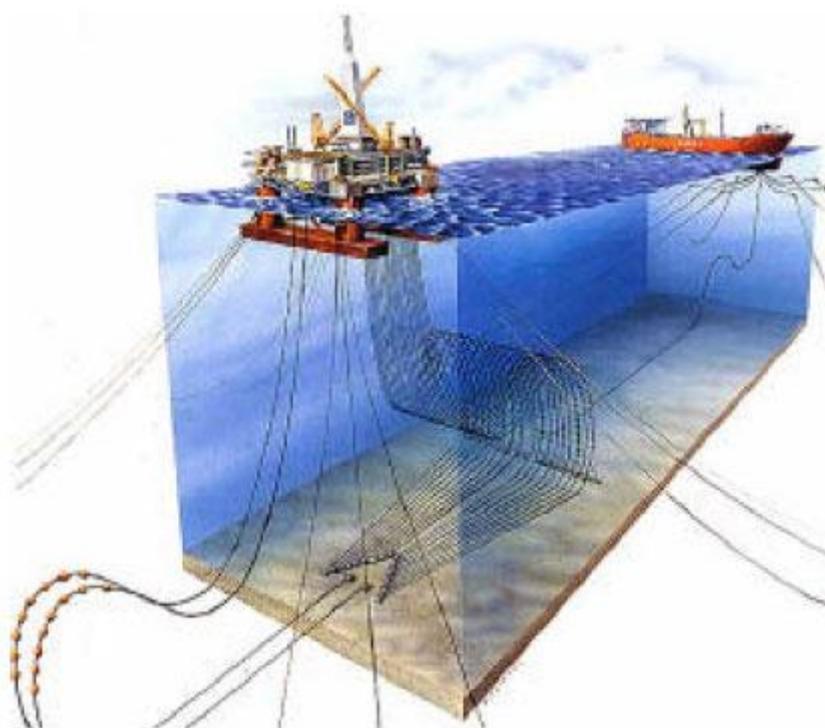


Figura 2.6 – Dutos de importação/injeção [3].

2.3 COMPOSIÇÃO DOS DUTOS

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

- i. Espessura de Aço: sua função é conferir resistência à tubulação, principalmente durante a fase de operação. Quando dimensionado de forma correta evita a flambagem e o colapso progressivo; estes aços devem possuir propriedades como: elevada resistência mecânica para suportar a pressão e o peso próprio do duto; elevada resistência à corrosão para resistir ao ambiente marinho; alta resistência à fadiga e boa soldabilidade; entre outras.
- 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;
- iv. Revestimento isolante (térmico): sua função é conferir proteção térmica durante toda vida útil do duto. É utilizado quando existe perda de temperatura do fluido para o meio ambiente e essa perda possa ocasionar problemas no escoamento do fluido.
- v. Revestimento de concreto: sua função é conferir lastro ao duto, evitando sua flutuação e aumentando a estabilidade de fundo; é adotado quando existe a necessidade de lastro para estabilidade do duto.
- vi. Área interna: região onde efetivamente ocorre o transporte de óleo, gás e etc.

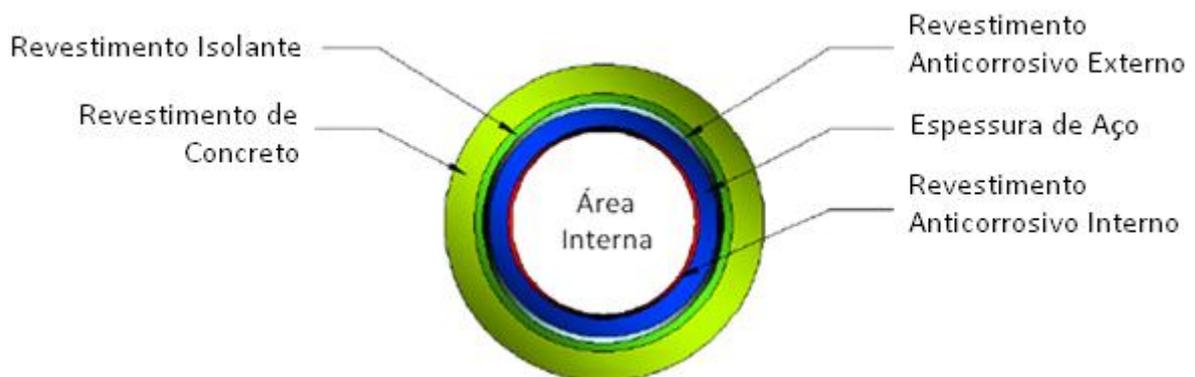


Figura 2.7 – Seção transversal do duto [6].

2.4 ETAPAS DO PROJETO DE DIMENSIONAMENTO

O projeto de dimensionamento de dutos rígidos submarinos engloba diversas etapas. No presente estudo, será tratada apenas a etapa de verificação da estabilidade hidrodinâmica dos dutos, mas para um melhor entendimento de todo o processo do projeto de dimensionamento, será apresentado a seguir uma visão geral do mesmo.

2.4.1 Definição da Diretriz

A primeira etapa de um projeto de dimensionamento de dutos submarinos é a definição da diretriz preliminar do duto. É desejável que a diretriz preliminar do duto seja uma linha reta entre os dois pontos entre os quais se deseja transportar o fluido.

De posse da diretriz preliminar, é realizado o levantamento dos dados a partir dos levantamentos batimétricos, sísmicos, por sonar e levantamentos de dados geotécnicos e oceanográficos.

Uma vez levantados os dados, são feitas análises dos dados coletados e com estas análises obtêm-se a geomorfologia da área estudada. Após o estudo dos dados levantados, define-se a diretriz definitiva do duto. A Figura 2.8 apresenta um exemplo do traçado em planta da rota de um duto.

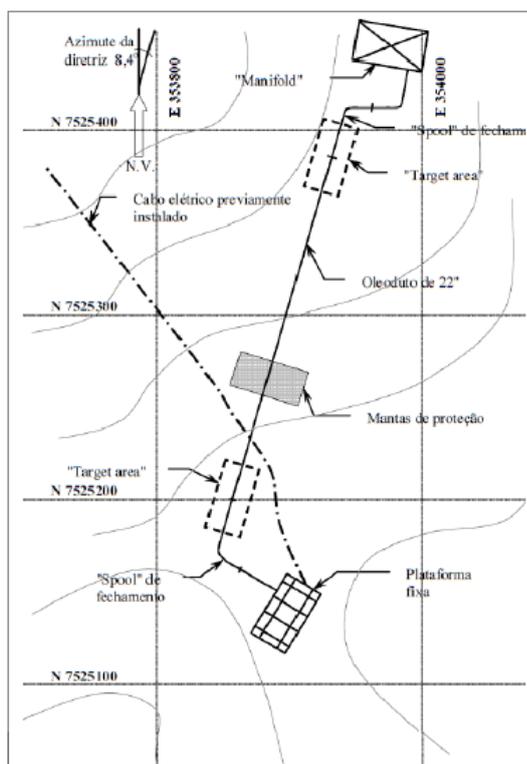


Figura 2.8 – Exemplo do traçado em planta da rota de um duto [9].

Esta diretriz é basicamente definida em função das características do solo marinho, da lâmina d'água, do vão livre máximo admissível, da presença de irregularidades no solo marinho, do raio mínimo que pode ser imposto ao duto, da existência de atividades como pesca e de obstáculos existentes no fundo do mar.

2.4.2 Dimensionamento Mecânico

O dimensionamento mecânico é a etapa do projeto onde são definidas as características geométricas e mecânicas a serem adotadas na fabricação do duto. A escolha do aço leva em conta parâmetros como a corrosividade do fluido transportado, a temperatura de projeto, a soldabilidade do material, a compatibilidade química entre o metal base e o eletrodo utilizado, além da compatibilidade com todos os outros componentes da linha.

Uma vez definido o material empregado, são feitas verificações estruturais para o dimensionamento da espessura de parede e limites de escoamento que o duto deverá possuir de forma a atender às condições de instalação, teste hidrostático e operação, determinando assim as propriedades geométricas da seção do duto. Dentre as condições normalmente consideradas para o dimensionamento estão a pressão interna e a pressão externa, relativas à fase de operação e à fase de teste hidrostático para comprovação da estanqueidade.

Nesta etapa, também é verificada a propagação de falhas devido ao colapso hidrostático. É durante a instalação que o duto está mais sujeito à propagação do colapso, uma vez que nesta fase o duto encontra-se sujeito às máximas tensões de flexão, além da pressão externa. É comum, durante o projeto, adotar-se uma redução de espessura do duto para se levar em conta o eventual desgaste do material devido à corrosão, mesmo tendo sido o aço e o projeto de proteção catódica definidos no sentido de se evitar a ocorrência da corrosão.

2.4.3 Estabilidade Hidrodinâmica

O duto submarino precisa se encontrar estável sobre o leito marinho. Se ele for demasiadamente leve, se movimentará lateral ou verticalmente sob a ação das ondas e correntes. Por outro lado, se for muito pesado, sua instalação será difícil e cara.

A verificação da estabilidade do duto no leito marinho sujeito às ações ambientais consiste em analisar a capacidade do duto em manter-se dentro de seu traçado, levando em conta as tolerâncias permitidas e as condições do solo marinho.

Para a realização desta análise, determina-se a espessura do revestimento externo de concreto para prover peso adicional ao duto, de modo a garantir a estabilidade.

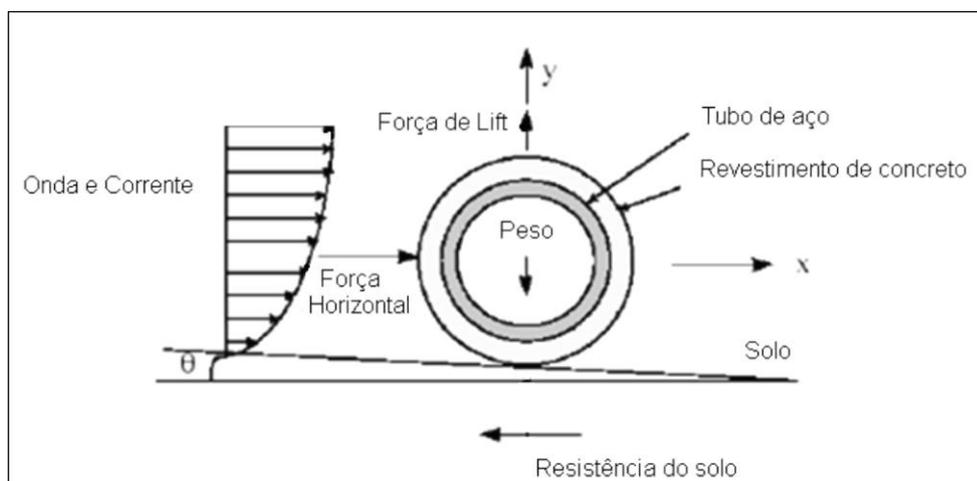


Figura 2.9 – Forças atuantes em uma seção de duto [10].

Existem outros métodos para se estabilizar um duto, a saber, aplicação de mantas, enterramento do duto e ancoragem no fundo, porém são mais onerosos que a aplicação do revestimento de concreto ou de difícil execução.

2.4.4 Análise de vãos livres

Entende-se por vãos livres (*free spans*) depressões do solo marinho onde o duto perde contato com o solo ao longo de um comprimento considerável devido às irregularidades do perfil do solo. Na Figura 2.10, podem ser observados alguns vãos livres.

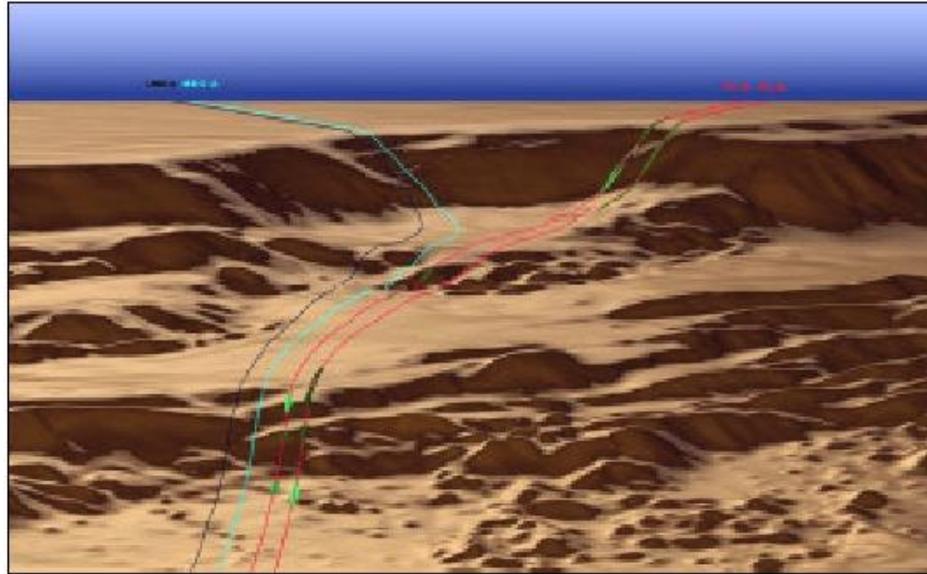


Figura 2.10 – Vão livre ao longo da rota do duto submarino [14].

Com a descoberta de novos campos, surge a necessidade de se utilizar dutos mais longos, aumentando assim a ocorrência de vãos livres. Estes por sua vez são, em geral, indesejados e problemas devido à sua existência podem levar o duto à ruptura.

Uma vez que o duto passa por uma depressão ou elevação, onde os vãos livres são formados, além das tensões induzidas pelas deformações do duto, o duto pode ficar sujeito a vibrações induzidas por desprendimento de vórtices devido à existência de correntes marinhas.

A presença de vórtices induz movimentos oscilatórios no duto, resultando assim em vibrações. Caso a frequência do desprendimento de vórtices seja próxima da frequência natural do vão, o fenômeno de ressonância pode ocorrer e ocasionar danos por fadiga no duto, especialmente nas regiões de solda e no revestimento.



Figura 2.11 – Exemplos típicos de vão livre [10].

Em regiões onde o solo marinho é arenoso ou argiloso, vãos livres de pequena extensão podem ser corrigidos naturalmente.

Devido ao seu peso próprio, o duto pode fletir verticalmente para baixo até que seu centro alcance o solo, com isso, surgirão dois vãos livres menores nas laterais do vão livre inicial, de forma que o transporte natural de sedimentos se encarrega de preencher estes vãos.

Independentemente do tipo de solo, existe um limite máximo admissível para o comprimento do vão livre. Desta forma, as extensões de vãos livres superiores a esse limite precisam ser corrigidos de alguma forma.

As técnicas atuais disponíveis para esta correção se baseiam na instalação de suportes artificiais, a saber: colchões ou sacos de areia, blocos de concreto (Figura 2.13), preenchimento do vão com rochas ou até mesmo utilizando rebaixamento de cota através da escavação de trincheiras (figura 2.12).



Figura 2.12 – Escavação de trincheira em solos arenosos e argilosos respectivamente [10].

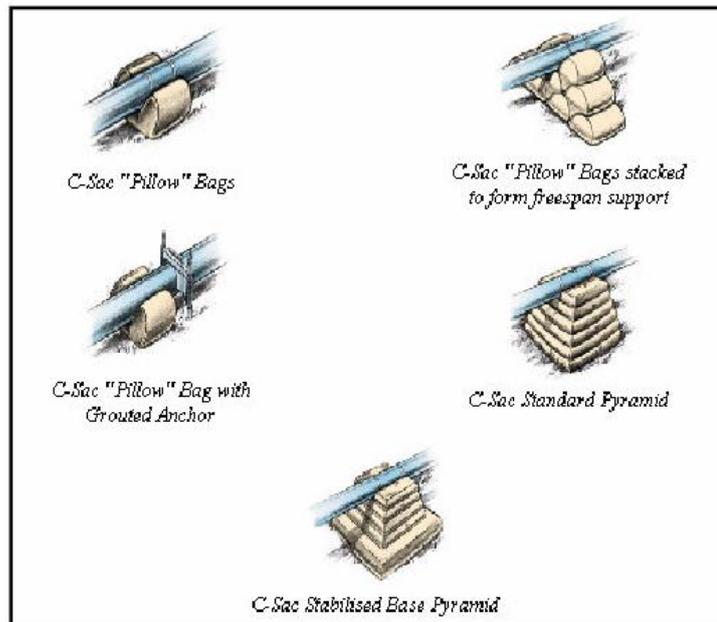


Figura 2.13 – Blocos de cimento para correção de vão livre [10].

É importante analisar cuidadosamente o nível de tensões impostas no duto na região de vão livre e adjacências, uma vez que essas tensões podem induzir grandes deformações plásticas e, conseqüentemente, ruptura do material.

2.4.5 Proteção 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. Logo, constitui-se uma boa prática de projeto utilizar uma proteção catódica como parte complementar da proteção anticorrosiva.

No dimensionamento da proteção catódica, são determinados a forma, a quantidade e o tipo de anodos de sacrifício necessários à preservação da integridade do duto durante toda a sua vida útil, em complementação ao revestimento anticorrosivo adotado para isolar a superfície externa do duto da água do mar.

A proteção catódica consiste em se colocar em contato com o material que se quer proteger um outro material de maior eletronegatividade (mais anódico), fazendo com que este seja corroído antes do aço. Como um anodo de sacrifício é efetivo para uma determinada área de aço a se proteger, faz parte do projeto de proteção catódica, o cálculo da área de aço exposta ao eletrólito, para a estimativa da massa de material anódico necessária à proteção durante toda a vida útil da estrutura. São considerados nesta etapa dados como: a corrosividade do meio, o material do duto, a salinidade e temperatura da água do mar, o material do anodo, bem como a assiduidade das inspeções.



Figura 2.14 – Exemplos de anodos de sacrifício para proteção catódica [7].

2.4.6 Pré-comissionamento e Teste Hidrostático

O pré-comissionamento e teste hidrostático fazem parte das condições e requisitos mínimos para desenvolvimento das atividades de pré-operação da linha. O pré-comissionamento ocorre logo que estejam concluídas as etapas de instalação do duto, assim como a interligação do mesmo com a plataforma, e é realizado através da verificação da integridade estrutural do duto. Após esta fase, o duto é preenchido com água, e então, o teste hidrostático é realizado visando avaliar a estanqueidade do conjunto, localizando possíveis pontos de vazamento. No caso de ocorrer algum vazamento, deve haver uma pronta substituição do elemento com problema.

2.4.7 Shore Approach

A chegada do duto à praia, conhecida como *shore approach*, é uma etapa do projeto de dutos submarinos que demanda bastante cuidado, pois o duto está exposto, entre outros carregamentos, à ação de ondas e de correntes. A instalação pode ser realizada através de dois métodos, mencionados a seguir:

- arraste do duto para a praia;
- furo direcional.

No primeiro método, arraste do duto para a praia, a instalação é feita através de barcaça típica para instalação de dutos rígidos e de uma base fixa posicionada em terra, normalmente denominada de base guincho, a qual serve para realizar o puxamento do duto a partir da embarcação instaladora em direção à praia, utilizando-se adicionalmente a ajuda de embarcações de pequeno calado no auxílio da transferência dos cabos e acessórios entre a embarcação instaladora e a base guincho. Uma vez conectado o cabo de puxamento, prossegue-se com o arraste do duto, onde a base guincho recolhe o cabo conectado ao duto enquanto a embarcação instaladora produz ou lança o duto. Na maioria das vezes em que esta metodologia é empregada, bóias de alívio são adotadas com objetivo de aliviar o peso submerso do duto, facilitando o puxamento por parte da base guincho durante a instalação do mesmo.

O segundo método de instalação consiste na execução de um furo direcional através das camadas de solo existentes e do posterior puxamento da linha pelo interior deste furo executado. Neste tipo de instalação, uma máquina típica para a realização de furos é posicionada em terra, tendo no lado marítimo o apoio de uma balsa de pequenas operações ou de uma balsa de instalação de dutos rígidos. A operação é relativamente simples: a máquina executa o furo direcional através da passagem de alargadores até se atingir o diâmetro necessário e, em seguida, efetua-se o puxamento da linha, o qual ocorre, em geral, de mar para terra. De forma a reduzir o atrito entre a parede do furo e o duto e garantir uma certa estabilidade durante a execução do alargamento, o interior do furo é preenchido com lama bentonítica.

O objetivo maior deste último método é garantir a estabilidade do duto quanto ao estado de mar sempre agressivo nesta região próxima à praia. Este método garante que não haverá por parte do duto nenhuma instabilidade por ação de ondas e correntes. Entretanto, pode tornar suscetível o surgimento de pontos de engastamento que, aliados às imperfeições e curvaturas impostas no traçado do duto durante sua instalação, podem conduzir ao surgimento de efeitos de segunda ordem, ocasionando, assim, um colapso global do mesmo.

De forma idêntica ao primeiro método, para garantir o sucesso da instalação, um procedimento deve ser elaborado para toda a operação, bem como o detalhamento de todos os itens a serem empregados neste serviço. Neste estudo, todas as considerações acerca do surgimento de efeitos de segunda ordem devem ser estudadas, no sentido de se minimizar as imperfeições, permitindo um traçado suave.

2.4.8 Análises de Instalação

Nesta etapa, são definidas as condições ambientais críticas a serem respeitadas durante a instalação e o dimensionamento de todos os acessórios requeridos para a execução da instalação da linha.

Os métodos de instalação mais empregados atualmente para a instalação dos dutos são o método *S-Lay*, o método *J-Lay*, e o método *Reel-Lay*. Além desses, também são utilizados métodos alternativos para instalação de dutos submarinos, os quais serão apresentados adiante.

No método *S-Lay*, o lançamento do duto soldado é feito a partir de uma embarcação de forma que a sua catenária adquira um formato “S” a partir do momento em que a extremidade do duto toca o solo marinho. Este método de lançamento é o mais utilizado para instalação de dutos em águas rasas. As Figuras 2.15 e 2.16 apresentam a configuração típica deste tipo de lançamento.

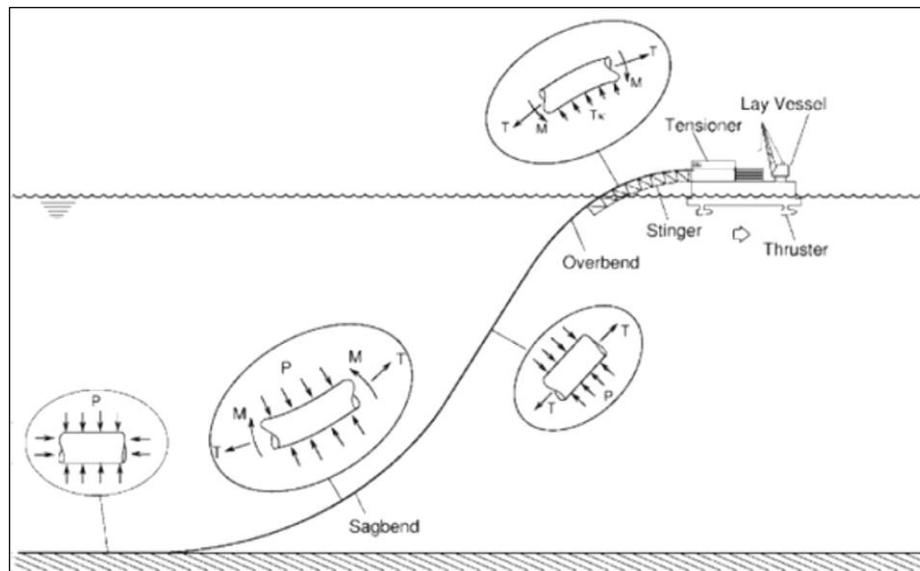


Figura 2.15 – Configuração do duto no método *S-Lay* [3].



Figura 2.16 – Foto da Balsa Solitaire [13].

O método *S-Lay* prevê que a construção da linha seja feita sobre a embarcação de lançamento em uma posição quase horizontal, criando duas regiões de flexão acentuada, uma na rampa, conhecida por *overbend* e outra junto ao fundo, denominada *sagbend*.

No momento do lançamento, o duto é apoiado sobre os roletes da embarcação e sobre o stinger - estrutura de aço conectada à popa da embarcação, usada para suavizar ou minimizar a forte variação angular que o duto sofre ao deixar a embarcação (ver Figura 2.15).

Movimentos súbitos da barça ou perda de tração podem ocasionar uma flexão excessiva do duto, acarretando uma imperfeição localizada e, posteriormente, um colapso propagante.

O projeto de instalação pelo método *S-Lay* consiste, basicamente, em definir a curvatura estabelecida por roletes discretos, instalados ao longo da rampa (ainda na embarcação) e ao longo do stinger, bem como a força a ser aplicada no tracionador, de modo a garantir a integridade estrutural do duto durante sua instalação.

O método *J-Lay*, recebe esta denominação, pois, como o duto é lançado a partir de uma posição vertical (ou aproximadamente vertical), a catenária do duto adquire um formato “J” característico ao tocar o solo marinho. Este método de lançamento foi desenvolvido para ser utilizado principalmente em águas profundas e ultraprofundas.

No método *J-Lay* não há uma rampa curva, mas apenas uma torre reta que assume a inclinação necessária em função da lâmina d’água. Quanto maior a lâmina d’água, mais a torre se aproxima da posição vertical. As Figuras 2.17 e 2.18 ilustram um lançamento utilizando o método *J-Lay*.

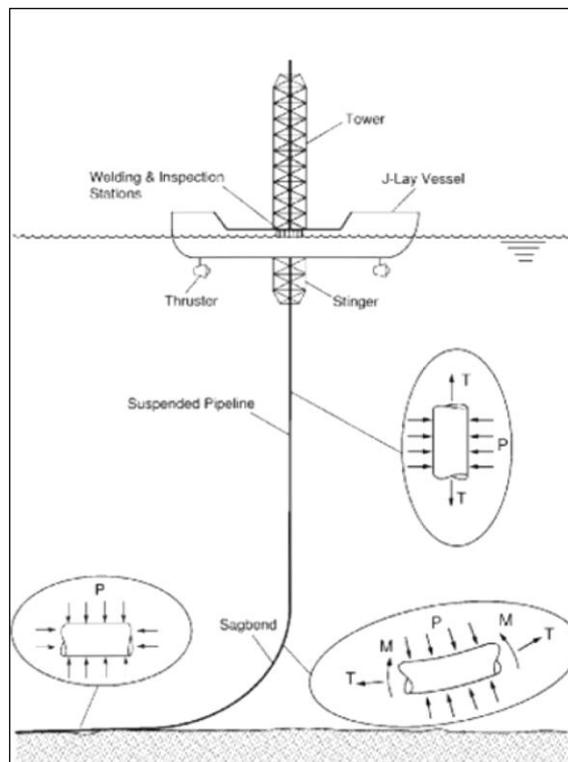


Figura 2.17 – Configuração do duto no método *J-Lay* [3].



Figura 2.18 – Foto da balsa *J-Lay* Balder [13].

O método *J-Lay* apresenta apenas uma região de grande raio de curvatura, que é o *Sagbend*, não existindo mais a região de *Overbend*.

No sistema *J-Lay*, não há compensação de tração pelo tracionador. O lançamento é feito a partir de uma torre.

As tensões atuantes no duto são relativamente menores se comparadas com as tensões despertadas no duto para a região do *Sagbend* no método *S-Lay*, em uma mesma profundidade.

No método *Reel-Lay*, a linha é fabricada em terra e estocada em rolos de grande diâmetro no convés da embarcação para transporte e instalação. A instalação do duto se dá pelo desenrolamento gradual da linha.

A vantagem deste método, em relação aos outros, é a grande velocidade de instalação, que pode ser dez vezes mais rápida do que a velocidade dos lançamentos mais tradicionais.

Contudo, este método possui limitação no que diz respeito ao diâmetro máximo do duto. O diâmetro máximo viável para este tipo de lançamento é de 16pol (41cm). Além disso, há que se considerar a impossibilidade da adoção de revestimento de concreto, uma vez que o concreto não resistiria à curvatura imposta pela estocagem. As Figuras 2.19 e 2.20 ilustram um lançamento utilizando o método *Reel-Lay*.

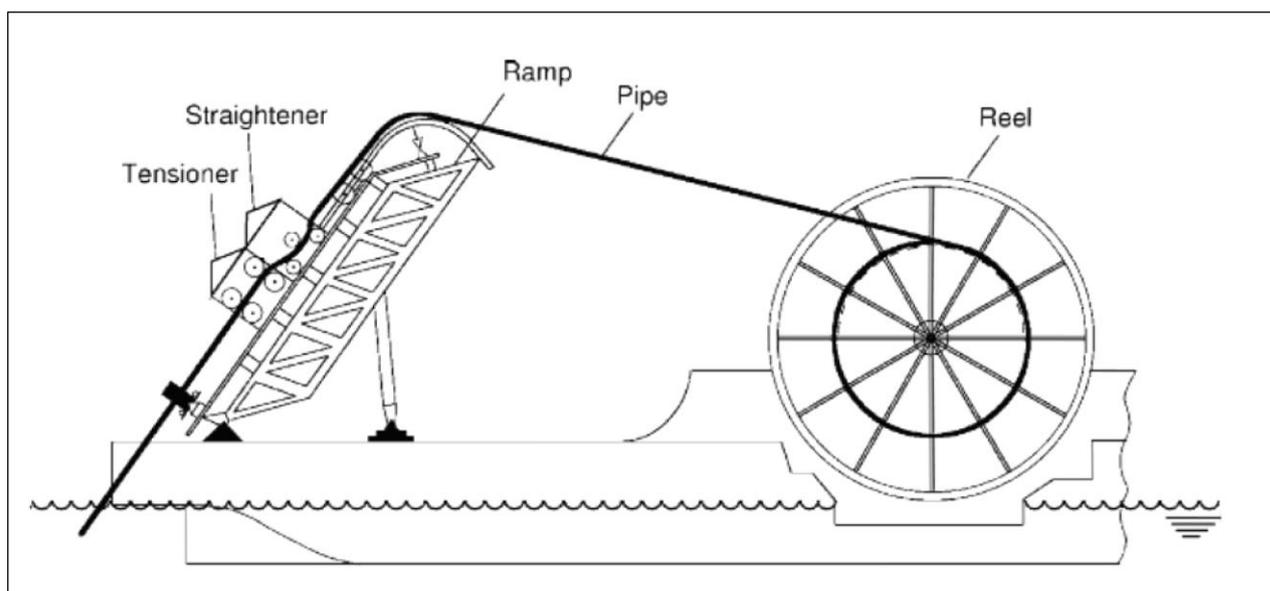


Figura 2.19 – Configuração do duto no método *Reel-Lay* [3].



Figura 2.20 – Foto da embarcação *Deep Blue* [13].

Além dos métodos de instalação pela superfície, existem ainda os métodos de instalação por arraste, onde o duto, construído em terra, é provido de flutuadores e arrastado próximo à superfície ou próximo ao fundo por rebocadores.

É também parte integrante do projeto de lançamento do duto, o dimensionamento de todos os acessórios eventualmente acoplados às extremidades da linha, tais como: flanges cegos, cabeças de início de lançamento, cabeças de teste hidrostático e cabeças de recebimento de pigs (elementos normalmente de borracha, que se movem sob pressão pelo interior do duto para limpeza, desobstrução ou para verificações dimensionais do mesmo).

3. ANÁLISE DE ESTABILIDADE

3.1 FORÇAS ATUANTES NO DUTO

As forças atuantes em dutos submarinos, admitidos em repouso sobre o leito marinho, conforme indicado na Figura 3.1, são basicamente aquelas causadas por peso próprio, empuxo, pressão hidrostática (todas estáticas) e aquelas relativas à incidência do fluxo de água sobre o duto submerso, chamadas habitualmente de hidrodinâmicas.

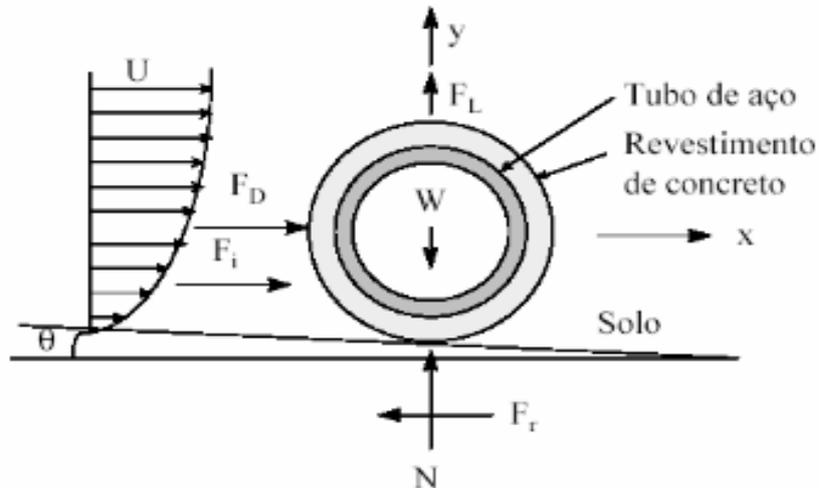


Figura 3.1 – Forças atuantes em dutos submarinos [10].

W: peso submerso do duto e peso de seu fluido interno.

F_D : força de arrasto

F_i : força de inércia

F_L : força de sustentação

F_R : força de atrito entre solo e o duto.

As forças hidrodinâmicas exercidas pela corrente e pelas ondas sobre a linha rígida, além dos movimentos dinâmicos do duto, são calculadas utilizando a equação de Morison, que é expressa através da soma do termo dependente da velocidade orbital da partícula d'água (força de arrasto - F_D), e do termo dependente da aceleração (força inercial - F_i), conforme a equação 3.1 abaixo:

$$F_{HIDRO} = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_D \cdot |\dot{u} - \dot{x}| \cdot (\dot{u} - \dot{x}) + \rho_w \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot C_m \cdot \ddot{u} - \rho_w \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot C_a \cdot \ddot{x} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Sendo:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_D \cdot |\dot{u} - \dot{x}| \cdot (\dot{u} - \dot{x}) \quad (\text{Eq. 3.2})$$

$$F_I = \rho_w \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot C_m \cdot \ddot{u} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

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

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D \cdot C_L \cdot (\dot{u} - \dot{x})^2 \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Onde:

F_{HIDRO} : força hidrodinâmica por unidade de comprimento, agindo sobre o duto;

ρ_w : massa específica da água;

D : diâmetro do duto;

C_D : coeficiente de arrasto;

C_m : coeficiente de inércia;

C_a : coeficiente de massa adicional;

C_L : coeficiente de lift;

\dot{u} : velocidade da partícula de água, perpendicular ao eixo longitudinal do duto;

\dot{x} : velocidade do duto;

\ddot{u} : aceleração da partícula de água, perpendicular ao eixo longitudinal do duto;

\ddot{x} : aceleração do duto;

A formulação de Morison é considerada semi-empírica, já que as parcelas de arrasto e inércia do fluido 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. Para dutos assentes no solo, os valores de C_L e C_m tornam-se 0,9 e 3,29, respectivamente [5].

O terceiro termo, afetado pelo coeficiente C_a (usualmente definido como $C_m - 1$) é proporcional às acelerações do corpo e está associado a efeitos de “massa adicional”.

A força hidrodinâmica F_{HIDRO} agindo sobre o duto é baseada nas componentes de velocidade e aceleração do fluido que são ortogonais ao eixo longitudinal do duto. As componentes paralelas ao eixo axial do duto são desconsideradas.

O primeiro termo da equação de Morison é a força de arrasto hidrodinâmica agindo sobre o duto. Esta força é proporcional ao quadrado da velocidade relativa entre o duto e o fluxo d'água ao redor deste. O segundo termo da equação é a força inercial exercida sobre o

duto pela aceleração da água em torno do mesmo. Esta força é proporcional à aceleração da partícula de água, expressa em termos do sistema global de coordenadas. O terceiro termo é a força inercial, resultante a partir do aumento efetivo na massa do duto, devido à presença da água em torno deste. Esta força é proporcional à aceleração do duto no sistema de coordenadas global.

A força de atrito entre o solo e o duto será estudada no capítulo 4 (item 4.3), referente à interação solo-duto.

As forças hidrodinâmicas às quais o duto submarino pode estar sujeito são uma combinação de efeitos de corrente estacionária, oscilação de corrente e forças induzidas pelas ondas. Para realizar a análise de estabilidade de dutos, as principais ações ambientais que devem ser consideradas são ondas e correntes. Ambas serão estudadas nos itens a seguir.

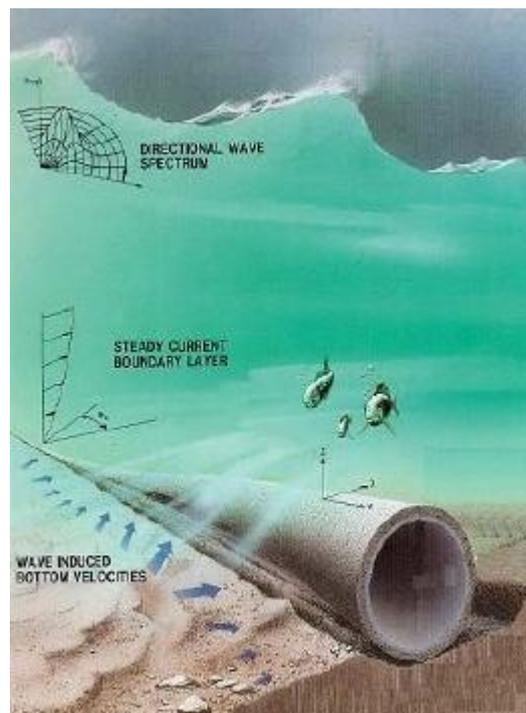


Figura 3.2 – Cargas ambientais atuantes em um duto submarino [11].

3.2 CORRENTES

A corrente pode ser induzida por ventos, marés, tempestades e diferenças de pressão. O perfil de velocidades varia normalmente com a profundidade, reduzindo-se em geral à medida que se aproxima do leito marinho, como pode ser visto na Figura 3.3.

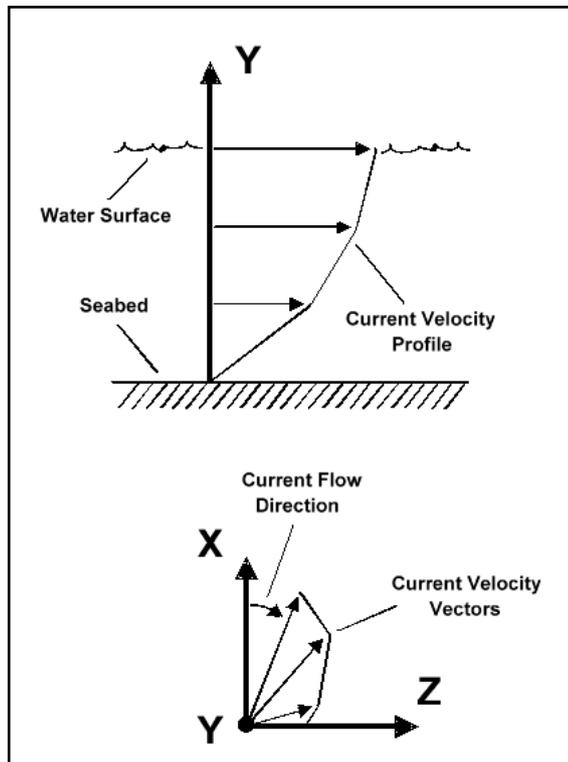


Figura 3.3 – Perfil de velocidade de corrente típico [15].

De acordo com a norma DNV-RP-F109 [4], a velocidade de corrente pode ser reduzida para levar em conta os efeitos de parede devido à presença do solo, mais precisamente os efeitos de camada limite, bem como a direcionalidade da corrente, através da seguinte expressão:

$$V(z) = V(z_r) \cdot \frac{\ln(z+z_0) - \ln(z_0)}{\ln(z_r+z_0) - \ln(z_0)} \cdot \text{sen}\theta_c \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Sendo:

- V: velocidade da corrente;
- Z: elevação acima do leito marinho;
- Z_r : altura de referência da velocidade de corrente;
- θ_c : ângulo entre a direção da corrente e o eixo do duto;

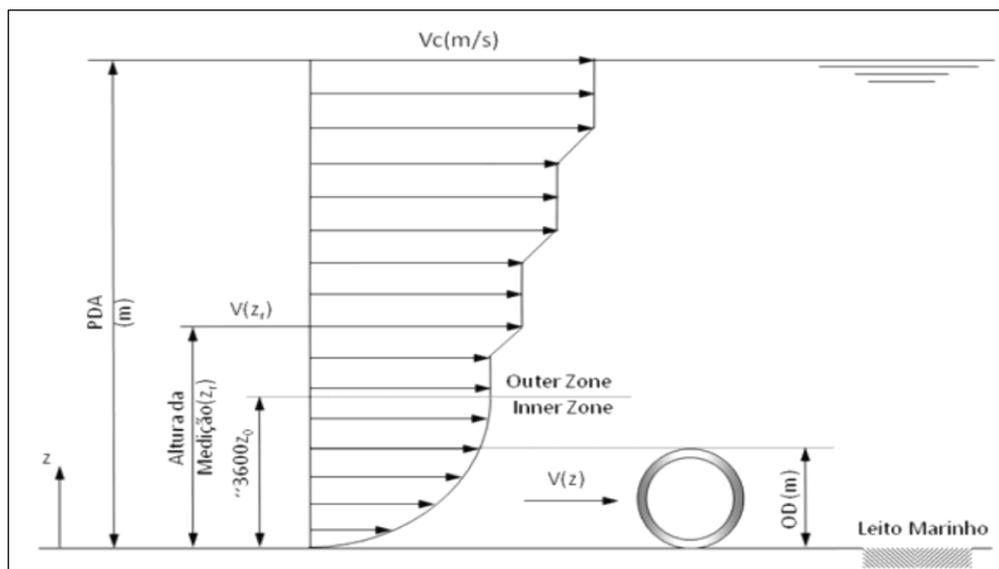


Figura 3.4- Esquema da aplicação da corrente no duto [7].

A componente normal da velocidade da corrente V_c atuando em uma tubulação com diâmetro D pode ser calculada pela seguinte fórmula [4]:

$$V(z) = V_c(z_r) \cdot \left[\frac{\left(1 + \frac{z_0}{D}\right) \cdot \ln\left(\frac{D}{z_0} + 1\right) - 1}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0} + 1\right)} \right] \cdot \text{sen}\theta_c \quad (\text{Eq. 3.6})$$

onde:

- V_c : componente normal da velocidade da corrente;
- Z_r : altura de referência da velocidade de corrente;
- θ_c : ângulo entre a direção da corrente e do duto;
- D : diâmetro do duto;

Na Tabela 3.1 podem ser encontrados valores para a rugosidade do solo z_0 , em função do tipo do solo e do diâmetro médio do grão d_{50} .

Tabela 3.1 – Rugosidade do solo do leito marinho [4].

Tipo do Solo	Diâmetro Médio do Grão, d_{50} (mm)	Rugosidade, z_0 (m)
Silte e Argila	0,0625	$\approx 5 \cdot 10^{-6}$
Areia fina	0,25	$\approx 1 \cdot 10^{-5}$
Areia média	0,5	$\approx 4 \cdot 10^{-5}$
Areia grossa	1,0	$\approx 1 \cdot 10^{-4}$
Brita fina	4,0	$\approx 3 \cdot 10^{-4}$
Brita grossa	25	$\approx 2 \cdot 10^{-3}$
Pedra	125	$\approx 1 \cdot 10^{-2}$
Rocha	500	$\approx 4 \cdot 10^{-2}$

3.3 ONDAS

Condições de Ondas de Curta Duração

A onda induzida por fluxo oscilatório ao nível do duto em vão livre pode ser calculada pelo processo numérico ou pela teoria de onda analítica. A teoria de onda será capaz de descrever as condições no local do duto, incluindo efeitos devido a águas rasas, se aplicável. Para casos mais práticos, a teoria de onda linear pode ser aplicada.

Os estados de mar de curto prazo, estacionários e irregulares podem ser descritos por um espectro de onda, assim como a função de densidade espectral da superfície do mar.

Serão consideradas ondas irregulares, representadas por um espectro de ondas, o qual foi especificado como o espectro de JONSWAP.

O espectro de JONSWAP é apropriado para a situação e sua função de densidade espectral é expressa por:

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \cdot \gamma \cdot \exp\left(-0,5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma \cdot \omega_p}\right)^2\right) \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Onde:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

ω : frequência angular da onda;

T: período;

$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

ω_p : frequência angular espectral de pico;

T_p : período de pico;

A constante de linearização de PHILLIPS é expressa por:

$$\alpha = \frac{5}{16} \cdot \frac{H_s^2 \cdot \omega_p^4}{g^2} (1 - 0,287 \ln \gamma) \quad (\text{Eq. 3.10})$$

g: aceleração da gravidade (9,806 m/s²);

H_s : altura da onda significativa;

O parâmetro espectral σ é expresso por:

$$\sigma = \begin{cases} 0,07 & \text{para } \omega \leq \omega_p \\ 0,09 & \text{para } \omega > \omega_p \end{cases} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

O fator de pico γ é expresso por:

$$\gamma = \begin{cases} 5,0, & \varphi \leq 3,6 \\ \exp(5,75 - 1,15\varphi), & 3,6 < \varphi < 5,0 \\ 1,0, & \varphi \geq 5,0 \end{cases} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

$$\varphi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

Um caso particular da equação do espectro de Jonswap é aquele correspondente à adoção do valor de γ igual a 1,0, que o transforma no espectro de Pierson-Moskowitz.

Ambos os espectros supracitados contemplam condições de mar e de vento severos.

O espectro de velocidade induzido pela onda ao nível do duto $S_{uu}(\omega)$ pode ser obtido por uma transformação espectral das ondas a nível de mar utilizando-se a teoria das ondas.

$$S_{uu}(\omega) = G^2(\omega) \cdot S_{\eta\eta}(\omega) \quad (\text{Eq. 3.14})$$

Sendo $G^2(\omega)$ a função de transferência da frequência ao nível da superfície do mar dada por:

$$G(\omega) = \frac{\omega}{\sinh(k \cdot d)} \quad (\text{Eq. 3.15})$$

onde d é a lâmina d'água e k é o número de ondas estabelecido por cada iteração da equação transcendental, conforme a equação 3.16.

$$kd = \frac{\omega^2 \cdot d}{g \cdot \sinh(k \cdot d)} \quad (\text{Eq. 3.16})$$

Sendo a iteração adotada como um ciclo de onda igual a 2π dividido por 80 passos, conforme mostrado na Figura 3.5 abaixo.



Figura 3.5 – Modelo de iteração kh de equação transcendental [16].

Os parâmetros de derivação aparecem nas seguintes equações espectrais:

O momento espectral de ordem n é definido como:

$$M_n = \int_0^{\infty} \omega^n \cdot S_{UU}(\omega) \cdot d\omega \quad (\text{Eq. 3.17})$$

A velocidade de fluxo significativo ao nível do duto é expressa por:

$$U_s = 2\sqrt{M_0} \quad (\text{Eq. 3.18})$$

O período de cruzamento zero do fluxo oscilatório ao nível do duto é expresso por:

$$T_u = 2\pi \sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \quad (\text{Eq. 3.19})$$

A razão entre a amplitude de velocidade oscilatória de uma única onda de projeto e a amplitude de velocidade oscilatória de um espectro de onda de projeto para um número de oscilações τ é dada por:

$$\frac{U^*}{U_s} = \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \ln \tau} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \cdot \ln \tau}} \right) \quad (\text{Eq. 3.20})$$

A razão entre o período de velocidade oscilatória e o período de cruzamento zero é:

$$\frac{T^*}{T_u} = \begin{cases} k_t - 5 \cdot (k_t - 1) \cdot \frac{T_n}{T_u} & \text{para } \frac{T_n}{T_u} \leq 0,2 \\ 1 & \text{para } \frac{T_n}{T_u} > 0,2 \end{cases} \quad (\text{Eq. 3.21})$$

$$k_t = \begin{cases} 1,25 & \text{para } \gamma = 1,0 \\ 1,21 & \text{para } \gamma = 3,3 \\ 1,17 & \text{para } \gamma = 5,0 \end{cases} \quad (\text{Eq. 3.22})$$

Os efeitos da direcionalidade e do espriamento da onda são introduzidos na forma de um fator de redução de sua velocidade de fluxo.

$$U_w = R_D \cdot U_\theta \quad (\text{Eq. 3.23})$$

O fator de redução é dado por:

$$R_D = \sqrt{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} D_w(\theta) d\theta} \quad (\text{Eq. 3.24})$$

A função de energia de espraiamento direcional da onda é:

$$D_w = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\Gamma(1+\frac{s}{2})}{\Gamma(0,5+\frac{s}{2})} \cdot \cos^s \theta \cdot \text{sen}^2(\theta_w - \theta), & \theta < \frac{\pi}{2} \\ 0, & \theta \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (\text{Eq. 3.25})$$

Onde:

Γ : função gama;

θ_w : ângulo entre a direção da onda e do duto;

s : parâmetro de espraiamento;

Normalmente, o valor de s está entre 2 e 8. Se não houver informação disponível, será adotado o valor mais conservador na faixa de 2 a 8. Um valor no intervalo 6 a 8 pode geralmente ser usado no mar do Norte.

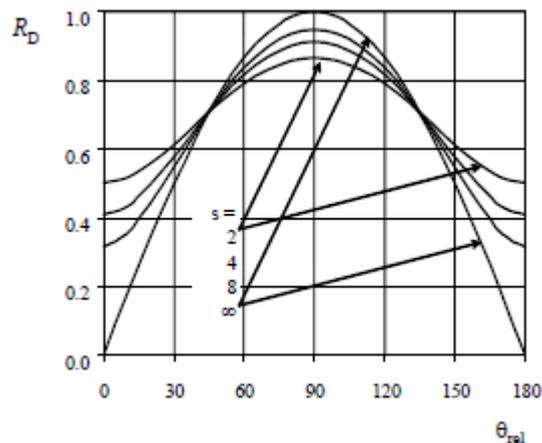


Figura 3.6 – Fator de redução devido ao espraiamento e direcionalidade da onda [4].

4. CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO DA DNV

4.1 MÉTODOS DE ESTABILIDADE LATERAL DE DUTOS

O objetivo desta seção é descrever os diferentes métodos de projeto que vêm sendo considerados no estudo de estabilidade lateral de dutos submarinos. Considera-se especificamente a norma DNV-RP-F109 [4].

De acordo com a norma DNV-RP-F109 [4], na verificação da estabilidade lateral de dutos podem ser consideradas três metodologias:

- i. Método de Estabilidade Lateral Estática Absoluta - *Absolute Lateral Static Stability Method*;
- ii. Método de Estabilidade Lateral Generalizada - *Generalized Lateral Stability Method*;
- iii. Análise Dinâmica de Estabilidade - *Dynamic Lateral Stability Analysis*.

A Estabilidade Estática Absoluta é a metodologia mais simples para verificar a estabilidade lateral de dutos apoiados no leito marinho, possuindo as seguintes características:

- segue o enfoque de Estabilidade Absoluta [4], não tolerando deslocamentos do duto;
- garante que a resultante horizontal das cargas hidrodinâmicas atuando no duto é menor do que a resistência do solo e que a carga vertical de *lift* é menor do que o peso submerso.

Este método considera as seguintes hipóteses:

- i. Tomando o carregamento de onda, toma-se uma onda de projeto extrema induzida por um ciclo oscilatório em um estado de mar considerado. Essa oscilação é caracterizada por uma amplitude de velocidade U^* e período T^* oscilatórios e a componente de corrente constante associada V^* (item 4.4);
- ii. Tomando os parâmetros da onda irregular, utiliza-se o espectro de Jonswap (descrito no item 3.3) 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 arrasto 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 4.4), supondo-se que o duto esteja estacionário;
- iv. A resistência do solo tem uma parcela determinada por um coeficiente de atrito com uma parcela puramente friccional F_μ e outra parcela correspondente à resistência passiva F_R gerada pela penetração inicial (ver item 4.3).

Ao contrário do método de estabilidade absoluta, o método de estabilidade lateral generalizada 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 [4] 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, o método de estabilidade generalizada considera 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 corrente V .

A metodologia de Análise Dinâmica de Estabilidade é baseada na geração de modelos e execução de análises dinâmicas sob carregamentos hidrodinâmicos de corrente 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.

Estes três métodos 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 [4]), ou de curvas previamente calibradas (no caso do *Generalized Lateral Stability Method* descrito no item 3.5 de [4]). Os métodos que empregam 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).

Existem programas comerciais que realizam o cálculo de estabilidade hidrodinâmica, como por exemplo, o programa AGA PRCI [5] – *Submarine On-bottom Stability Analysis*. O programa realiza análises estáticas e dinâmicas, dependendo do nível de detalhamento e dos requisitos de projeto de estabilidade. Para a maioria dos casos a análise estática é suficiente.

No presente trabalho, será utilizado o método de estabilidade estática absoluta para realizar a análise de estabilidade hidrodinâmica.

4.2 CRITÉRIO DE ESTABILIDADE VERTICAL

Além dos critérios de estabilidade lateral apresentados no item anterior, a norma DNV-RP-F109 [4] também faz considerações em relação à estabilidade vertical. Tais considerações estão descritas a seguir.

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

$$\gamma_w \cdot \frac{b}{\omega_s + b} \leq 1,0 \quad (\text{Eq. 4.1})$$

b: empuxo do duto por unidade de comprimento. $b = \rho_w \cdot g \cdot \pi \cdot D^2 / 4$

ω_s : peso submerso do duto;

γ_w : fator de segurança;

Segundo a norma DNV-RP-F109 [4], deve-se adotar para o fator de segurança γ_w o valor 1.1 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. A possibilidade de afundamento deve ser considerada com o duto cheio, enquanto que a possibilidade de flutuação deve ser considerada com o duto vazio.

Tais verificações dependem da relação entre os pesos específicos do duto e do solo, e da resistência ao cisalhamento do solo. Se o peso específico do duto for menor que o do solo, não há necessidade de verificar o afundamento; porém, em solos com baixa resistência ao cisalhamento, pode ser necessário verificar a flutuação.

4.3 INTERAÇÃO SOLO-DUTO

A interação entre os dutos submarinos e o solo marinho é um fator relevante na análise de estabilidade hidrodinâmica pois interfere diretamente na movimentação do duto.

A análise da interação solo-duto é realizada em função de como o solo responde às forças que atuam na linha.

A resistência do solo consiste em geral de duas parcelas: força de atrito de Coulomb (F_μ) e resistência passiva do solo (F_R).

A força de atrito de Coulomb (F_μ) é função do atrito no contato solo-duto e do peso submerso da tubulação.

O coeficiente de atrito lateral μ pode ser expresso como:

$$\mu = \begin{cases} 0,6, & \text{areia} \\ 0,2, & \text{argila} \end{cases} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

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 tanto em solos arenosos como em solos argilosos.

Em solos arenosos, a resistência passiva (F_R) pode ser expressa por:

$$\frac{F_R}{F_C} = \begin{cases} (5,0 \cdot \kappa_S - 0,15 \cdot \kappa_S^2) \cdot \left(\frac{z_p}{D}\right)^{1,25}, & \kappa_S \leq 26,7 \\ \kappa_S \cdot \left(\frac{z_p}{D}\right)^{1,25}, & \kappa_S > 26,7 \end{cases} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

$$\kappa_S = \frac{\gamma'_s \cdot D^2}{w_s - F_Z} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

$$F_C = w_s - F_Z \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Z_p : penetração total do duto que será explicada adiante;

κ_S : parâmetro do solo arenoso;

D : diâmetro do duto;

w_s : peso submerso do duto;

F_Z : força de sustentação do duto = F_L

F_C : força vertical de contato entre o solo e o duto;

γ'_s : peso submerso do solo. Para areias recebe normalmente o valor na faixa de 7000(areia muito fofa) e 13500N/m³ (areia muito compacta);

Em solos argilosos, a resistência passiva (F_R) pode ser expressa por:

$$\frac{F_R}{F_C} = \frac{4,1 \cdot \kappa_c}{G_C^{0,39}} \cdot \left(\frac{Z_p}{D}\right)^{1,31} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

$$G_C = \frac{S_u}{D \cdot \gamma_s} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

$$\kappa_c = \frac{S_u \cdot D}{w_s - F_Z} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Z_p : penetração total do duto que será explicada adiante;

κ_c : parâmetro do solo argiloso;

D : diâmetro do duto;

ω_s : peso submerso do duto;

F_Z : força de sustentação do duto = F_L

F_C : força vertical de contato entre o solo e o duto;

γ_s : peso seco do solo. Para argilas recebe o valor de 18000N/m³;

G_C : parâmetro de resistência do solo argiloso;

S_u : resistência não drenada da argila;

A penetração total pode ser tomada como a soma da penetração inicial Z_{pi} , devido ao peso próprio do duto e a penetração devido ao movimento do duto sob a ação de ondas e correntes Z_{pm} , como indicado na equação abaixo.

$$Z_p = Z_{pi} + Z_{pm} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

A penetração inicial em areias recomendada pela norma [4] é:

$$Z_{pi} = 0,037 \cdot \kappa_s^{-0,67} \cdot D \quad (\text{Eq. 4.10})$$

A penetração inicial em argilas recomendada pela norma [4] é:

$$Z_{pi} = 0,0071 \cdot \left(\frac{G_C^{0,3}}{\kappa_c}\right)^{3,2} \cdot D + 0,062 \cdot \left(\frac{G_C^{0,3}}{\kappa_c}\right)^{0,7} \cdot D \quad (\text{Eq. 4.11})$$

A penetração devido ao movimento do duto sob a ação de ondas e correntes Z_{pm} é considerada nula.

Abaixo, estão apresentados os fatores adotados pela norma [4] para reduzir a carga hidrodinâmica. Tais fatores levam em consideração parâmetros como a permeabilidade do leito marinho, a penetração do duto no leito marinho e o entrincheiramento.

O fator total de redução de carga pode ser expresso por:

$$r_{tot,i} = r_{perm,i} + r_{pen,i} + r_{tr,i} \quad (\text{Eq. 4.12})$$

O subscrito “i” pode ser reescrito como “y” para representar o fator de redução de cargas horizontais e como “z” para representar o fator de redução de cargas verticais.

Redução de carga devido à permeabilidade do leito marinho:

O leito marinho permeável admite fluxo de água pelos vazios do solo, passando abaixo do duto, o que pode causar uma redução de carga vertical. Para considerar este fenômeno, a norma [4] recomenda aplicar o seguinte fator de redução de carga:

-Na direção horizontal:

$$r_{perm,y} = 1 \quad (\text{Eq. 4.13})$$

-Na direção vertical:

$$r_{perm,z} = \begin{cases} 0,7 & , \mu = 0,6 \\ 1,0 & , \mu = 0,2 \end{cases} \quad (\text{Eq. 4.14})$$

Redução de carga devido à penetração do duto no solo:

Para considerar a penetração (Z_p) do duto no solo a norma recomenda aplicar o seguinte fator de redução de carga:

-Na direção horizontal:

$$r_{pen,y} = 1,0 - 1,4 \cdot \frac{z_p}{D} \geq 0,3 \quad (\text{Eq. 4.15})$$

-Na direção vertical:

$$r_{pen,z} = 1,0 - 1,3 \cdot \left(\frac{z_p}{D} - 0,1 \right) \geq 0 \quad (\text{Eq. 4.16})$$

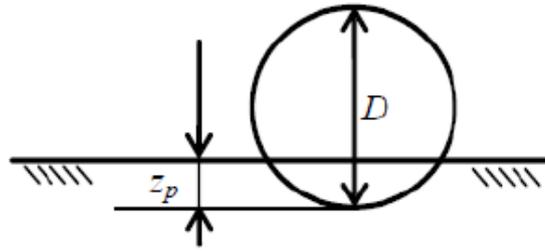


Figura 4.1 – Parâmetros da penetração [4].

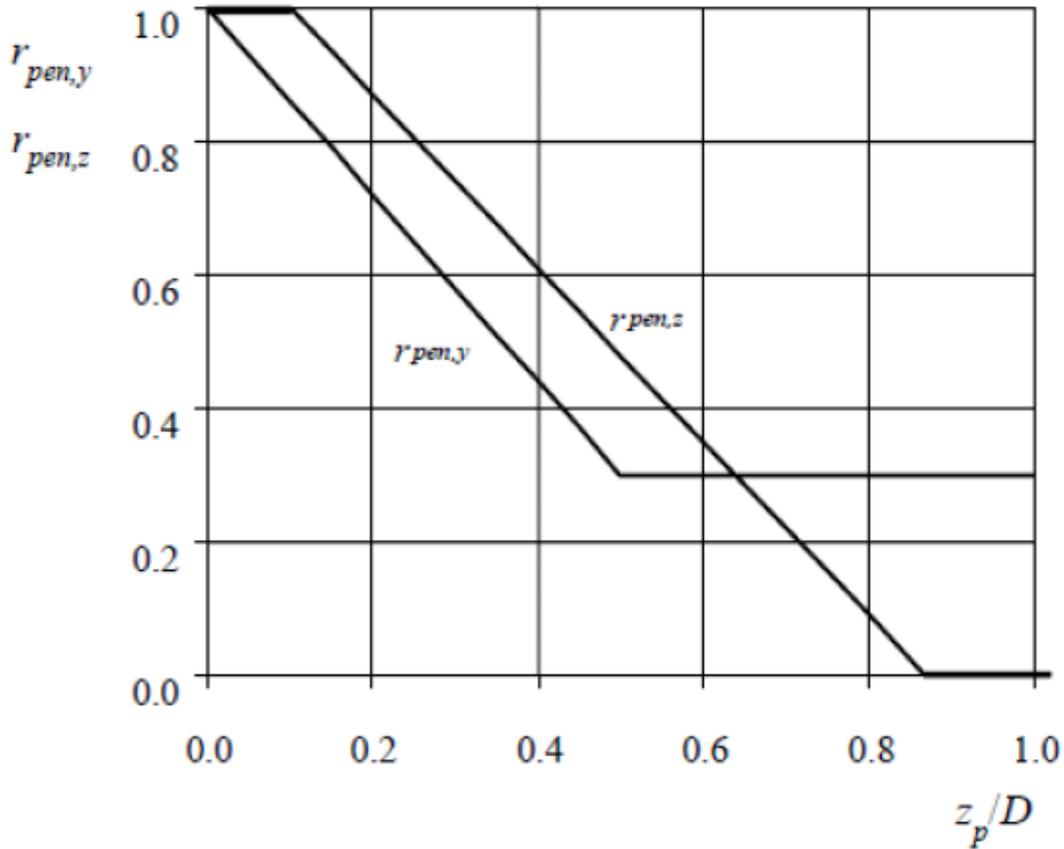


Figura 4.2 – Fator de Redução devido à penetração [4].

Redução de carga devido à formação de trincheira:

Para considerar um entrincheiramento de profundidade Z_t , a norma recomenda aplicar o seguinte fator de redução de carga:

-Na direção horizontal:

$$r_{tr,y} = 1,0 - 0,18 \cdot (\theta - 5)^{0,25} \cdot \left(\frac{z_t}{D}\right)^{0,42}, \quad 5 \leq \theta \leq 45 \quad (\text{Eq. 4.17})$$

-Na direção vertical:

$$r_{tr,z} = 1,0 - 0,14 \cdot (\theta - 5)^{0,43} \cdot \left(\frac{z_t}{D}\right)^{0,42}, \quad 5 \leq \theta \leq 45 \quad (\text{Eq. 4.18})$$

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), como pode ser observado na figura abaixo.

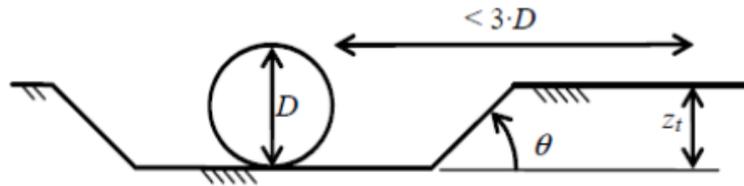


Figura 4.3 - Definição dos Parâmetros do Entrançamento [4].

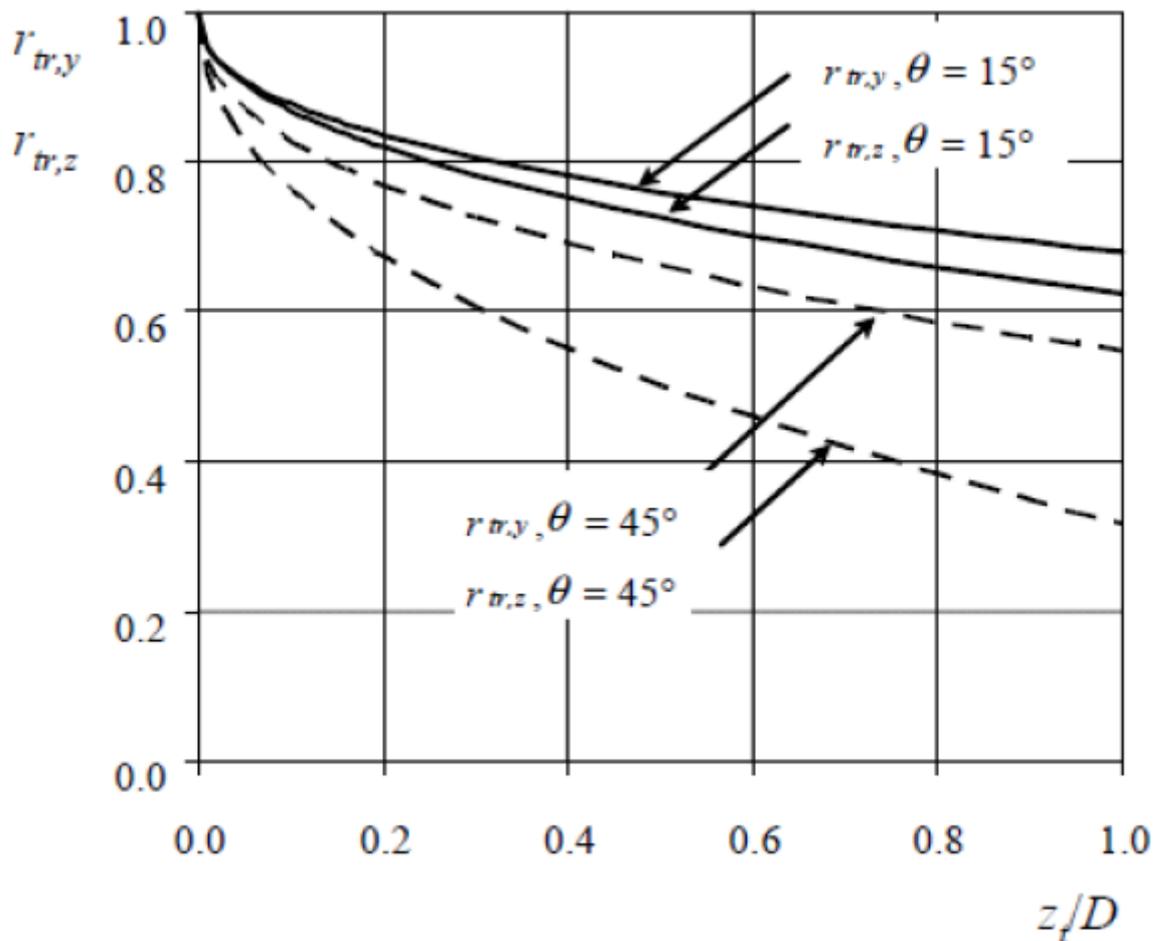


Figura 4.4 – Fator de Redução devido ao Entrançamento [4].

4.4 CÁLCULO DAS FORÇAS HIDRODINÂMICAS

Segundo a norma DNV-RP-F109 [4], o duto pode ser considerado estável caso atenda aos critérios de projeto apresentados a seguir.

$$\gamma_{SC} \cdot \frac{F_Y^* + \mu \cdot F_Z^*}{\mu \cdot w_s + F_R} \leq 1,0 \quad (\text{Eq. 4.19})$$

$$\gamma_{SC} \cdot \frac{F_Z^*}{w_s} \leq 1,0 \quad (\text{Eq. 4.20})$$

A norma DNV-RP-F109 [4] apresenta 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 estão associadas ao cálculo das forças hidrodinâmicas baseado em coeficientes invariantes no tempo.

Objetivando ajustar a fórmula de Morison, a norma utiliza um fator de redução total de cargas considerado devido à interação solo-duto e apresentado no item anterior. Sendo assim, podem-se reescrever as expressões para o cálculo das forças hidrodinâmicas através das seguintes fórmulas:

Força horizontal:

$$F_Y^* = r_{tot,Y} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_Y^* \cdot (U^* + V^*)^2 \quad (\text{Eq. 4.21})$$

Força vertical:

$$F_Z^* = r_{tot,Z} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_Z^* \cdot (U^* + V^*)^2 \quad (\text{Eq. 4.22})$$

Sendo:

ρ_w : massa específica da água;

V^* : valor médio da velocidade constante associada à oscilação de projeto;

C_Y^* : valores para os coeficientes de pico de carga horizontal;

C_Z^* : valores para os coeficientes de pico de carga vertical;

D : diâmetro do duto;

w_s : peso submerso do duto;

μ : coeficiente de atrito lateral;

γ_{SC} : fator de segurança;

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

O fator de segurança γ_{sc} utilizado na estabilidade estática absoluta para estados de mar de inverno em diferentes regiões é mostrado nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Valores para os coeficientes de pico de carga horizontal C_y^* e vertical C_z^* estão definidos na norma [4] e são apresentados respectivamente na Tabela 4.3 / Figura 4.5, e na Tabela 4.4 / Figura 4.6.

Tabela 4.1 - Fator de Segurança: Tempestade de Inverno no Mar do Norte [4].

Tipo de solo	γ_{sc}		
	Baixo	Normal	Alto
Areia	0,98	1,32	1,67
Argila	1,00	1,40	1,83

Tabela 4.2 - Fator de Segurança: Tempestade de Inverno no Golfo do México e no Mar do Sul [4].

Tipo de solo	γ_{sc}		
	Baixo	Normal	Alto
Areia	0,95	1,41	1,99
Argila	0,97	1,50	2,16

Tabela 4.3 – Coeficiente de pico de carga horizontal [4].

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

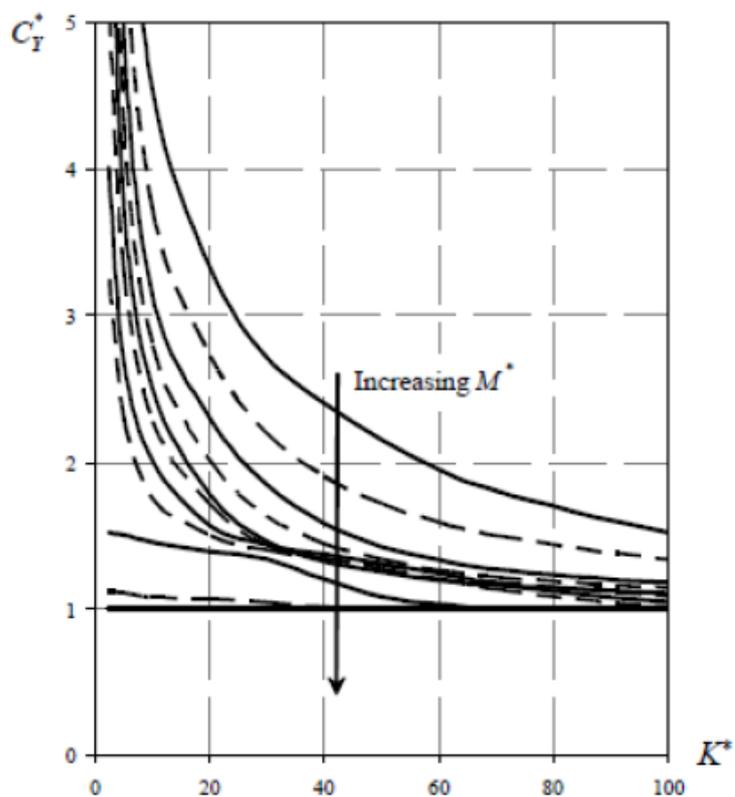


Figura 4.5 – Gráfico relativo ao coeficiente de pico de carga horizontal [4].

Tabela 4.4 – Coeficiente de pico de carga vertical [4].

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	

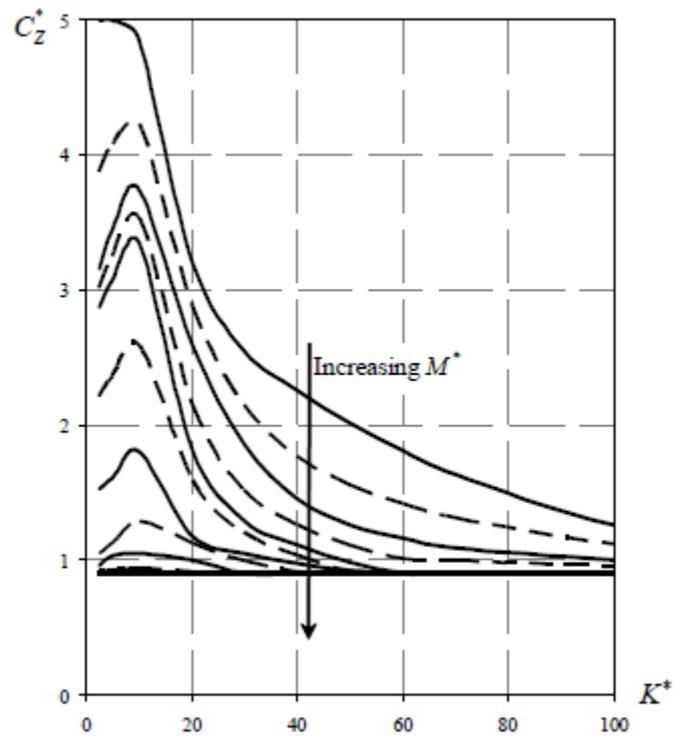


Figura 4.6 – Gráfico relativo ao coeficiente de pico de carga vertical [4].

5. ESTUDO DE CASO

5.1 GERAL

O cenário escolhido para a análise de estabilidade foi a Bacia de Campos, região norte do estado do Rio de Janeiro. O oleoduto com diâmetro de 20 pol (51 cm) destina-se ao transporte de derivados do petróleo entre o PLEM (Pipeline End Manifold - estrutura metálica cuja função é fazer interligações futuras e/ou existentes com outras linhas já existentes) e o Terminal. A parte submarina do duto terá uma sobre-espessura de proteção contra a corrosão.

O novo tramo marítimo será lançado a uma distância de 3,0 km da costa. A Figura 5.1 apresenta esquematicamente a diretriz do duto na região da Bacia de Campos.

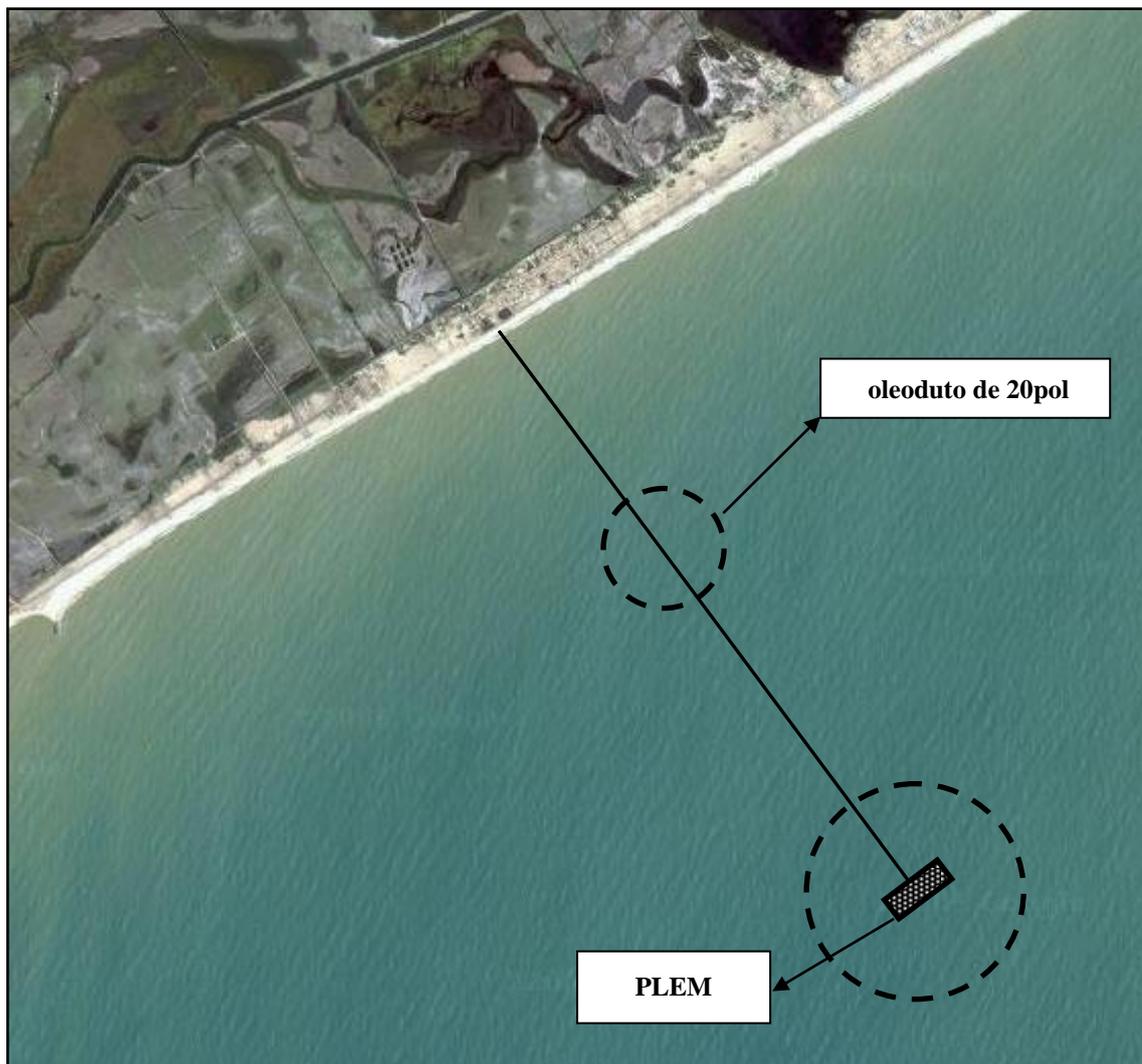


Figura 5.1 – Diretriz do duto de 20 pol na Bacia de Campos [12].

5.2 PROFUNDIDADE D' ÁGUA MÁXIMA

A profundidade máxima na região de instalação, entre o PLEM e o Terminal, é da ordem de 35m.

5.3 CARACTERÍSTICAS DO DUTO

A Tabela 5.1 apresenta as características do duto de 20 pol em aço-carbono.

Tabela 5.1 – Características do duto.

DESCRIÇÃO	UNIDADE	VALOR
Diâmetro externo	pol	20
Espessura de parede	pol	0,5
Tipo de Material	-	Aço API 5LX60
Massa específica do aço	kg/m ³	7850
Tensão Mínima de Escoamento	MPa	414
Tensão Mínima de Ruptura	MPa	517
Módulo de Elasticidade do aço	MPa	207000
Coefficiente de Expansão Térmica	°C ⁻¹	1,16E-05
Coefficiente de Poisson	-	0,3
Sobre-Espessura de Corrosão [11]	mm	3
Espessura do Revestimento Anticorrosivo	mm	4
Massa específica do Rev. Anticorrosivo	kg/m ³	950
Massa específica do Concreto	kg/m ³	3040

Foi considerada a massa específica do óleo conduzido pelo duto de 1042 kg/m³.

5.4 DADOS METEOCEANOGRÁFICOS

Os dados meteoceanográficos utilizados na análise de estabilidade estão reproduzidos a seguir através de um resumo da intensidade das correntes e das ondas nos diferentes casos analisados (Tabela 5.2). Em todas as alternativas avaliadas, admitiu-se a corrente na direção NE, que corresponde a de maior magnitude. Tanto onda quando corrente foram assumidas incidindo no duto a 90 graus.

Tabela 5.2– Carregamentos ambientais de Onda e Corrente.

Casos Analisados		Onda		Corrente (m/s)	
		Hs (m)	Tp (s)		
Operação	Onda de 100 anos com Corrente de 10 anos	4,11	7,36	1,24	
	Onda de 10 anos com Corrente de 100 anos	3,59	7,21	1,43	
Instalação	Teste Hidrostático	Onda de 10 anos com Corrente de 1 ano	3,59	7,21	1,05
		Onda de 1 ano com Corrente de 10 anos	3,05	7,03	1,24

Os dados de corrente e onda dos itens 5.4.1 e 5.4.2, respectivamente, indicam a direção de onde a onda vem e a direção para onde a corrente vai.

5.4.1 DADOS DE CORRENTE

As Tabelas 5.3 e 5.4 apresentam, respectivamente, os valores de intensidade da corrente por período de retorno e os valores médios de corrente para todo perfil na Bacia de Campos.

Tabela 5.3 - Valores de Intensidade da Corrente (m/s) por Período de Retorno.

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
1 ano	0,51	1,05	0,73	0,22	0,46	0,69	0,53	0,41
10	0,69	1,24	0,89	0,31	0,57	0,82	0,66	0,58
20	0,75	1,30	0,94	0,34	0,60	0,86	0,70	0,63
30	0,78	1,33	0,96	0,36	0,62	0,88	0,72	0,66
50	0,82	1,37	1,00	0,38	0,65	0,91	0,75	0,71
100	0,88	1,43	1,05	0,42	0,69	0,95	0,78	0,76

Tabela 5.4 – Valores Médios de Corrente para todo perfil na Bacia de Campos.

DIAGRAMA DE DISPERSÃO												
EIXO HORIZONTAL: direção verdadeira												
EIXO VERTICAL: intensidade de corrente (cm/s)												
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Total	%	Dir
0	5	900	2937	2827	783	790	2687	1833	654	13411	36,27	78,43
5	10	435	2820	2262	208	265	2106	1101	197	9394	25,4	67,07
10	15	109	2073	1066	8	10	1136	464	20	4886	13,21	57,76
15	20	23	1547	692	0	1	727	253	16	3259	8,81	58,42
20	25	30	1262	485	0	0	491	155	15	2438	6,59	57,51
25	30	34	734	276	1	0	324	86	5	1460	3,95	56,23
30	35	8	473	149	3	0	153	27	2	815	2,2	57,64
35	40	1	333	46	1	0	72	18	0	471	1,27	55,26
40	45	1	242	23	0	0	53	2	0	321	0,87	58,2
45	50	1	184	15	0	0	26	3	0	229	0,62	59,78
50	55	0	81	17	0	0	7	1	0	106	0,29	62,73
55	60	0	85	10	0	0	1	0	0	96	0,26	63,14
60	65	0	49	3	0	0	0	0	0	52	0,14	61,72
65	70	0	25	0	0	0	0	0	0	25	0,07	57,2
70	75	0	12	0	0	0	0	0	0	12	0,03	57,62
75	80	0	5	0	0	0	0	0	0	5	0,01	58,6
80	85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	999,9
TOTAL		1542	12862	7871	1004	1066	7783	3943	909	36980		
%		4,17	34,78	21,28	2,71	2,88	21,05	10,66	2,46			
MEDIAS		6,12	14,98	10,02	4	3,95	10,43	7,79	4,64			

5.4.2 DADOS DE ONDA

As Tabelas 5.5 e 5.6 apresentam, respectivamente, as relações entre alturas de onda em águas profundas com o período de retorno e os períodos relacionados à altura de onda.

Tabela 5.5 – Relação entre Alturas de Onda com o Período de Retorno.

PARÂMETRO		PERÍODO DE RETORNO (ANOS)		
		1	10	100
HMAX	altura máxima de onda	4,90	5,76	6,60
THMAX	período associado à altura máxima	10,53	10,91	11,23
Hs	altura significativa de onda	3,05	3,59	4,11
Tp	período de pico	7,03	7,21	7,36

Tabela 5.6 – Períodos relacionados à Altura de Onda.

Tp	0,0	4,5	6,5	8,5	10,5	12,5	14,5	16,5	TOTAL	TMED
	to	to	to	to	to	to	to	to	(%)	(sec)
Hs	4,5	6,5	8,5	10,5	12,5	14,5	16,5	18,5		
0,5/1,0	1,39	5,22	1,93	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	8,62	5,60
1,0/1,5	3,55	18,99	7,74	0,42	0,03	0,02	0,02	0,00	30,77	5,77
1,5/2,0	0,08	13,38	7,76	0,88	0,00	0,02	0,00	0,00	22,12	6,18
2,0/2,5	0,00	8,61	6,21	0,88	0,12	0,00	0,00	0,00	15,82	6,50
2,5/3,0	0,00	3,11	5,92	1,17	0,03	0,00	0,02	0,00	10,25	7,10
3,0/3,5	0,00	0,65	4,14	1,11	0,00	0,00	0,02	0,02	5,94	7,57
3,5/4,0	0,00	0,08	2,32	0,91	0,02	0,00	0,00	0,00	3,33	7,85
4,0/4,5	0,00	0,00	0,94	0,59	0,00	0,00	0,02	0,00	1,55	8,34
4,5/5,0	0,00	0,00	0,54	0,53	0,05	0,00	0,00	0,00	1,12	8,59
5,0/5,5	0,00	0,00	0,05	0,26	0,08	0,00	0,00	0,00	0,39	9,29
TOTAL(%)	5,02	50,04	37,55	6,83	0,33	0,04	0,08	0,02	100,00	
HMED(m)	1,11	1,62	2,23	3,04	3,39	1,51	2,94	3,39		

5.5 DADOS DE SOLO

Os dados de solo considerados nas análises de estabilidade são referentes aos levantamentos batimétricos e sonográficos ao longo da diretriz prevista. O fundo é composto predominantemente por sedimento areno-quartzoso, de granulometria fina, com biodetritos associados.

A areia do fundo marinho é classificada como areia fina e possui coeficiente de atrito lateral igual a 0,6.

5.6 DADOS DE ENTRADA DA ANÁLISE

Os principais parâmetros e dados de entrada da planilha Mathcad, na condição de instalação (duto vazio), estão apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Parâmetros para instalação com onda de 10 anos e corrente de 1 ano.

Parâmetro de entrada	Unidade	Valor	OBS
OD	pol	20	Diâmetro externo do duto
Ths	pol	0,5	Espessura de parede
Ca	mm	3	Sobre-espessura de Corrosão
Tha	mm	4	Espessura de anticorrosivo
Thi	mm	0	Espessura do isolante térmico
Cbck	mm	0	Comprimento do Cutback
ρ_{duto}	kg/m ³	7850	Massa específica do duto
$\rho_{anticorrosivo}$	kg/m ³	950	Massa específica do anticorrosivo
$\rho_{isolante}$	kg/m ³	950	Massa específica do isolante térmico
$\rho_{concreto}$	kg/m ³	3040	Massa específica do concreto
ρ_{fluido}	kg/m ³	1042	Massa específica do fluido de operação
$\rho_{água_do_mar}$	kg/m ³	1025	Massa específica da água do mar
ρ_{Cbck}	kg/m ³	300	Massa específica do Cutback
Tipo de solo da região	-	-	Areia
Nível de segurança da região	-	-	Baixo
γ'_s	kN/m ³	15,5	Peso submerso
μ	-	0,6	Coefficiente de atrito lateral
Rebaixamento	-	-	Sem Rebaixamento
Zr	m	2	Altura de referência medida acima do solo
θ_c	graus	90	Ângulo de ataque da Corrente
Vc(Zr)	m/s	1,05	Velocidade de corrente medida em Zr
Rugosidade de Fundo	-	-	Areia Fina
Hs	m	3,59	Altura Significativa de Onda
Tp	s	7,21	Período de Pico da Onda
d	m	35	Profundidade (nível do duto)
θ_w	graus	90	Ângulo principal de ataque da Onda
Espraiamento	s	6	Parâmetro de espraiamento (s)
Região	-	-	Golfo do México e Oceano do Hemisfério Sul
Tcto	pol	0	Espessura inicial de Concreto
Δt	pol	0,01	Variação da Espessura de Concreto
No	-	500	Número total de espessuras analisadas

6. RESULTADOS

Foram consideradas as situações de instalação, operação e teste hidrostático. Na condição de instalação, adotou-se, conservadoramente, apenas a hipótese de duto vazio, uma vez que o referente caso é mais crítico no que tange à garantia da estabilidade do duto no leito marinho. Para esta hipótese, associou-se às condições ambientais referentes a ondas e correntes, sendo assumido o período de recorrência de 1 ano e 10 anos.

Na situação de operação, é considerado o duto conduzindo o fluido de massa específica de 1042 kg/m^3 , sendo as condições ambientais relativas aos períodos de recorrência de 10 e 100 anos, alternando-se este tempo para ondas e correntes, respectivamente. As análises para a condição de operação foram desenvolvidas descontando-se da espessura de parede do duto a sobre-espessura de corrosão mínima de 3 mm.

Na situação de teste hidrostático, é considerado o duto conduzindo como fluido a água do mar de massa específica de 1025 kg/m^3 , sendo as condições ambientais relativas aos períodos de recorrência de 1 anos e 10 anos.

A Tabela 6.1 apresenta a espessura de concreto e o fator de segurança vertical e horizontal encontrados para as diversas combinações de onda e corrente nas situações de operação, instalação e teste hidrostático.

Tabela 6.1 – Estabilidade do duto para coeficiente de atrito lateral ($\mu=0,6$).

Carregamentos Ambientais	O - onda (90°) C - corrente (90°) (anos)	Espessura do Revestimento (pol)	Fator de segurança vertical	Fator de segurança horizontal
Operação	O100-C10	0,79	3,097	1,001
	O10-C100	0,85	2,938	1,000
Instalação	O10-C1	2,10	3,113	1,006
	O1-C10	1,12	1,007	3,248
Teste Hidrostático	O10-C1	0,00	3,723	1,208
	O1-C10	0,00	3,396	1,180

Verificou-se que a espessura mínima de concreto que garante a estabilidade do oleoduto, atingida na condição de instalação para ondas de 10 anos com corrente de 1 ano, foi de 2,1 pol, conforme pode ser observado em destaque na tabela acima.

6.1 ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade procura determinar o efeito da variação de um determinado parâmetro no seu resultado final.

Para realizar uma análise de sensibilidade, variam-se os parâmetros de interesse do estudo mantendo-se os demais parâmetros inalterados.

O presente trabalho apresenta análises de sensibilidade para calcular a estabilidade de um duto apoiado no solo marinho sujeito a carregamentos de onda e corrente através de uma planilha computacional.

O cálculo de estabilidade de dutos está em função de parâmetros característicos do duto, da corrente, da onda e do solo. A seguir serão analisados os efeitos dos parâmetros que afetam diretamente este cálculo.

6.1.1 Efeito dos Parâmetros Característicos do Duto

Os parâmetros característicos do duto que afetam o cálculo de estabilidade são: o peso submerso e o diâmetro externo.

O diâmetro do duto é definido com base na vazão requerida do fluido a ser transportado e se mantém inalterado na fase do cálculo de estabilidade, por isso, será estudado apenas o efeito do peso submerso na estabilização do duto.

A análise de sensibilidade do peso submerso é realizada através da variação da espessura de concreto. A Tabela 6.2 apresenta os valores encontrados.

Tabela 6.2 – Análise de sensibilidade do peso submerso do duto.

Análise de Sensibilidade: Peso submerso do duto			
Espessura do revestimento de concreto (pol)	Peso submerso mínimo (kN/m)	Fator de Segurança	
		Vertical	Horizontal
1,5	0,790	1,907	0,596
1,6	0,884	2,113	0,668
1,7	0,978	2,317	0,738
1,8	1,074	2,519	0,807
1,9	1,170	2,719	0,874
2,0	1,267	2,917	0,941
2,1	1,364	3,113	1,006
2,2	1,463	3,307	1,071
2,3	1,562	3,500	1,135
2,4	1,663	3,690	1,199
2,5	1,764	3,879	1,261
2,6	1,865	4,067	1,323
2,7	1,968	4,253	1,385
2,8	2,071	4,437	1,446
2,9	2,176	4,620	1,506
3,0	2,281	4,801	1,566

A norma DNV-RP-F109 [4] determina como critério de estabilização que o duto só se manterá estável no leito marinho se o fator de segurança vertical e o fator de segurança horizontal forem ambos superiores a 1,0.

Analisando o resultado da Tabela 6.2, pode-se concluir que é necessária uma espessura de 2,1 pol de concreto para manter o duto estável.

A Figura 6.1 representa graficamente a correlação entre os valores do peso submerso do duto e do fator de segurança indicados na Tabela 6.2.

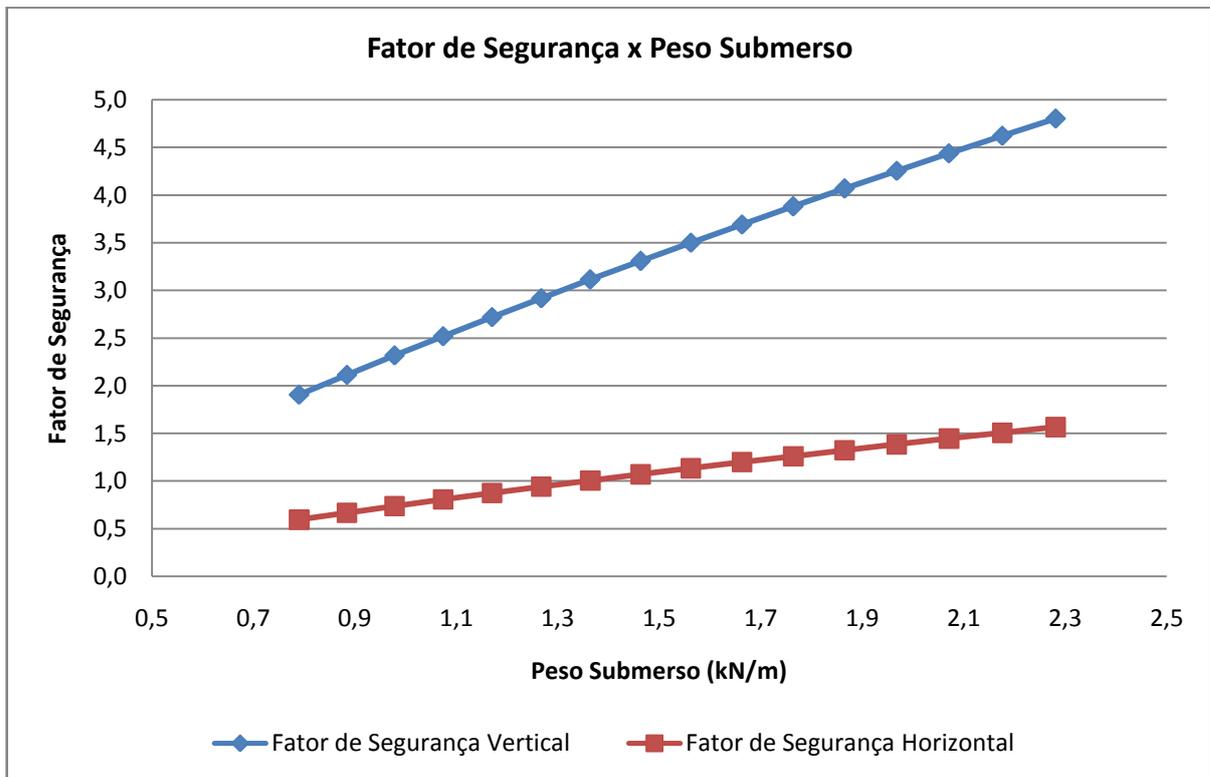


Figura 6.1 – Gráfico de correlação Fator de Segurança x Peso submerso.

A partir da análise do gráfico pode-se concluir que:

- Os valores obtidos para o fator de segurança horizontal foram menores que os valores obtidos para o fator de segurança vertical, sendo assim, pode-se afirmar que o fator de segurança horizontal é dominante sob o fator de segurança vertical e ao atender a estabilidade horizontal, a estabilidade vertical estará atendida.

- A estabilidade vertical é atingida para a espessura de concreto de 1,5 pol, ou seja, 0,790 kN/m enquanto a estabilidade horizontal somente é atingida para pesos submersos a partir de 1,364 kN/m (2,1 pol de concreto). Tanto a estabilidade vertical quanto a estabilidade horizontal só são atingidas quando os fatores de segurança vertical e horizontal são superiores a 1,0, respectivamente.

6.1.2 Efeito dos Parâmetros Característicos da Corrente

Os parâmetros característicos da corrente que afetam o cálculo de estabilidade são: a altura de referência medida acima do solo, o ângulo de ataque da corrente e a velocidade de

corrente. O parâmetro que apresenta maior influência sobre o cálculo de estabilidade de dutos é a velocidade de corrente.

Para cada valor diferente de velocidade de corrente, há um peso submerso mínimo correspondente. O peso submerso mínimo é obtido quando os fatores de segurança (vertical e horizontal) são superiores a 1,0.

A Tabela 6.3 apresenta os resultados obtidos no estudo de sensibilidade da velocidade de corrente. Neste estudo, variou-se o valor da velocidade da corrente mantendo os demais parâmetros constantes.

Tabela 6.3 – Análise de sensibilidade da velocidade de corrente.

Análise de Sensibilidade: Velocidade de corrente				
Velocidade de corrente (m/s)	Espessura do revestimento de concreto (pol)	Peso submerso mínimo (kN/m)	Fator de Segurança	
			Vertical	Horizontal
1,0	2,00	1,267	3,116	1,000
1,1	2,19	1,453	3,085	1,004
1,2	2,38	1,643	3,035	1,002
1,3	2,59	1,855	3,001	1,004
1,4	2,80	2,071	2,953	1,002
1,5	3,02	2,302	2,908	1,001
1,6	3,25	2,547	2,864	1,000
1,7	3,49	2,807	2,822	1,000
1,8	3,74	3,082	2,782	1,001
1,9	4,00	3,375	2,743	1,003
2,0	4,26	3,672	2,700	1,002
2,1	4,52	3,975	2,653	1,001
2,2	4,80	4,307	2,613	1,001
2,3	5,17	4,756	2,605	1,001
2,4	5,56	5,241	2,596	1,001
2,5	5,97	5,764	2,316	2,725

A Figura 6.2 representa graficamente a correlação entre os valores do peso mínimo submerso do duto e da velocidade de corrente indicados na Tabela 6.3.

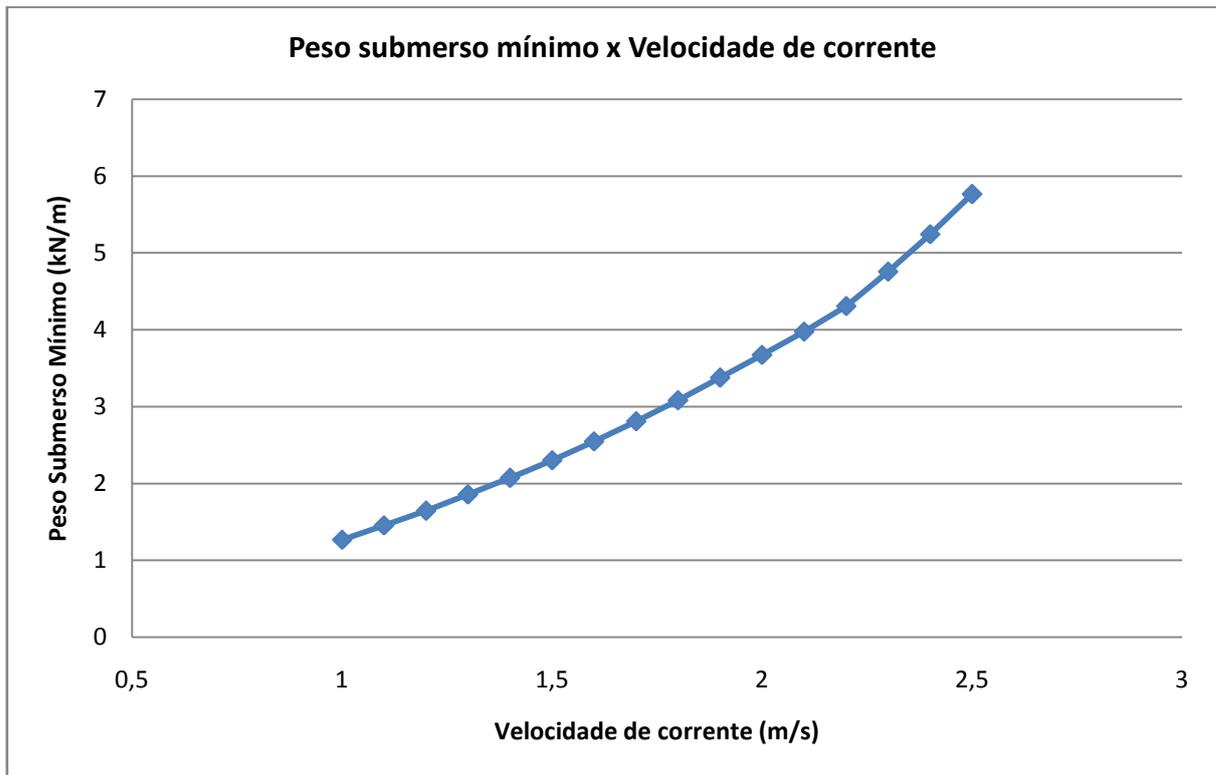


Figura 6.2 - Gráfico de correlação Peso submerso mínimo x Velocidade de corrente.

A partir da análise do gráfico pode-se concluir que:

- O peso submerso mínimo e a velocidade de corrente são diretamente proporcionais, ou seja, quanto maior o valor da velocidade da corrente que incide no duto, maior será a espessura de concreto necessária para estabilizar o duto e maior será o peso submerso mínimo.

- Não há linearidade entre o peso submerso mínimo e a velocidade de corrente. À medida que a velocidade de corrente aumenta, a variação do peso submerso mínimo também aumenta. A variação de peso submerso mínimo entre as velocidades de corrente de 1,0 e 1,5 m/s é muito menor que entre 2,0 e 2,5.

6.1.3 Efeito dos Parâmetros Característicos da Onda

Os parâmetros característicos da onda que afetam o cálculo da estabilidade são: a altura significativa, o período de pico, o ângulo principal de ataque, o espraiamento da onda e a profundidade de água ao nível do duto.

O ângulo principal de ataque da onda é considerado de 90° e o espraiamento é considerado igual a 6 por serem os valores mais conservadores. Sendo assim, serão estudados apenas os efeitos da profundidade d'água, da altura significativa e do período de pico da onda na análise de estabilidade do duto.

6.1.3.1 Profundidade d'água

A Tabela 6.4 apresenta os resultados obtidos no estudo de sensibilidade da profundidade d'água. Neste estudo, variou-se o valor da profundidade d'água mantendo os demais parâmetros constantes.

Tabela 6.4 – Análise de sensibilidade da profundidade d'água.

Análise de Sensibilidade: Profundidade d'água				
Profundidade d'água (m)	Espessura do revestimento de concreto (pol)	Peso submerso mínimo (kN/m)	Fator de Segurança	
			Vertical	Horizontal
35	2,10	1,364	3,113	1,006
37	1,95	1,218	3,048	1,000
39	1,83	1,102	2,998	1,002
41	1,73	1,007	2,953	1,007
43	1,63	0,902	3,165	1,111
45	1,55	0,837	3,066	1,107
47	1,47	0,762	2,717	1,008
49	1,43	0,725	2,703	1,013
51	1,39	0,688	2,668	1,005
53	1,36	0,66	2,654	1,007
55	1,33	0,632	2,625	1,003
57	1,31	0,614	2,621	1,011
59	1,28	0,586	2,585	1,010
61	1,27	0,577	2,594	1,013

A Figura 6.3 representa graficamente a correlação entre os valores do peso submerso mínimo do duto e da profundidade d'água indicados na Tabela 6.4.

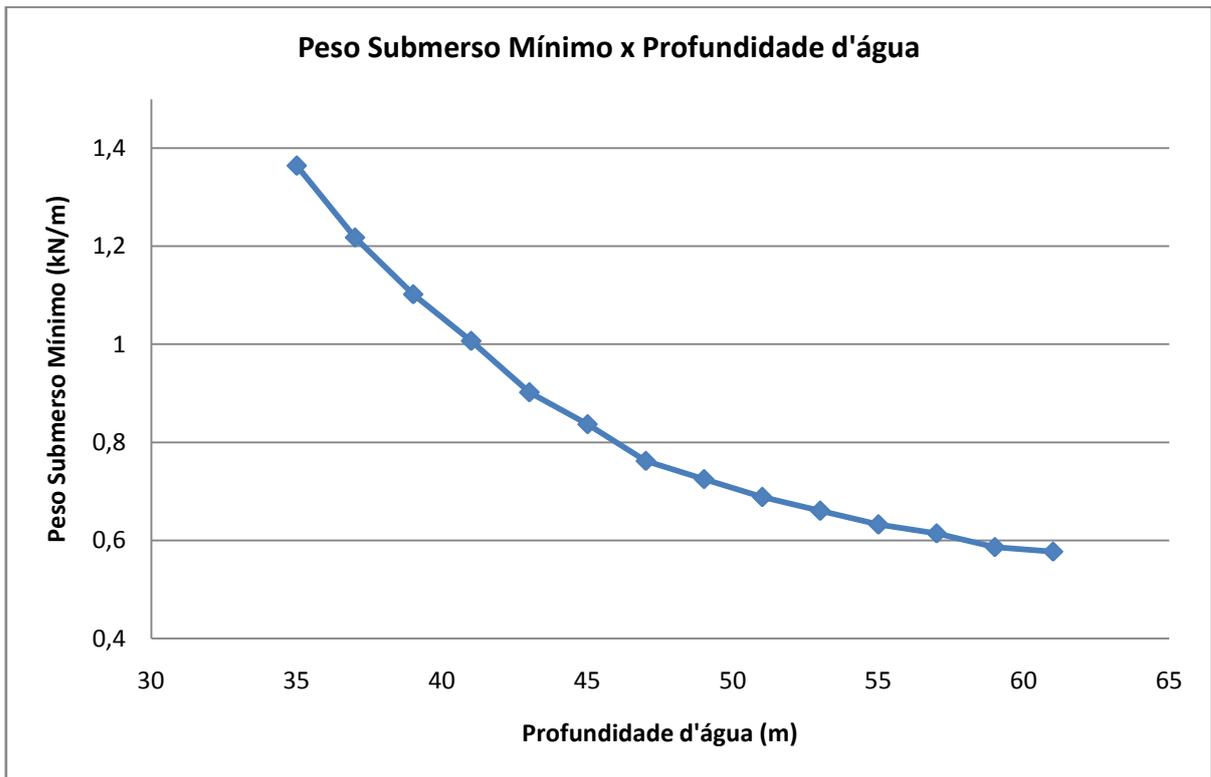


Figura 6.3 - Gráfico de correlação Peso submerso mínimo x Profundidade d'água.

A partir da análise do gráfico pode-se concluir que:

- O peso submerso mínimo e a profundidade d'água são inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior a profundidade d'água, menor será a espessura de concreto necessária para estabilizar o duto e menor será o peso submerso mínimo.

- Não há linearidade entre o peso submerso mínimo e a profundidade d'água. À medida que a profundidade d'água aumenta, a variação do peso submerso mínimo diminui. A variação de peso submerso mínimo entre as profundidades d'água de 35 e 41 metros é muito maior que entre 55 e 61.

6.1.3.2 Altura Significativa da Onda

A Tabela 6.5 apresenta os resultados obtidos no estudo de sensibilidade da altura da onda de projeto. Neste estudo, variou-se o valor da altura significativa da onda mantendo os demais parâmetros constantes.

Tabela 6.5 – Análise de sensibilidade da altura significativa da onda.

Análise de Sensibilidade: Altura significativa da Onda				
Altura significativa da Onda (m)	Espessura do revestimento de concreto (pol)	Peso submerso mínimo (kN/m)	Fator de Segurança	
			Vertical	Horizontal
3,0	1,89	1,160	3,024	1,001
3,5	2,06	1,325	3,086	1,000
4,0	2,24	1,503	3,147	1,006
4,5	2,59	1,855	3,434	1,004
5,0	3,08	2,365	3,825	1,001
5,5	3,59	2,916	4,135	1,002
6,0	4,11	3,500	4,403	1,001
6,5	4,65	4,129	4,615	1,000
7,0	5,22	4,818	4,801	1,001
7,5	5,81	5,558	4,955	1,001
8,0	6,42	6,353	5,083	1,000

A Figura 6.4 representa graficamente a correlação entre os valores do peso submerso mínimo do duto e da altura de onda indicados na Tabela 6.5.

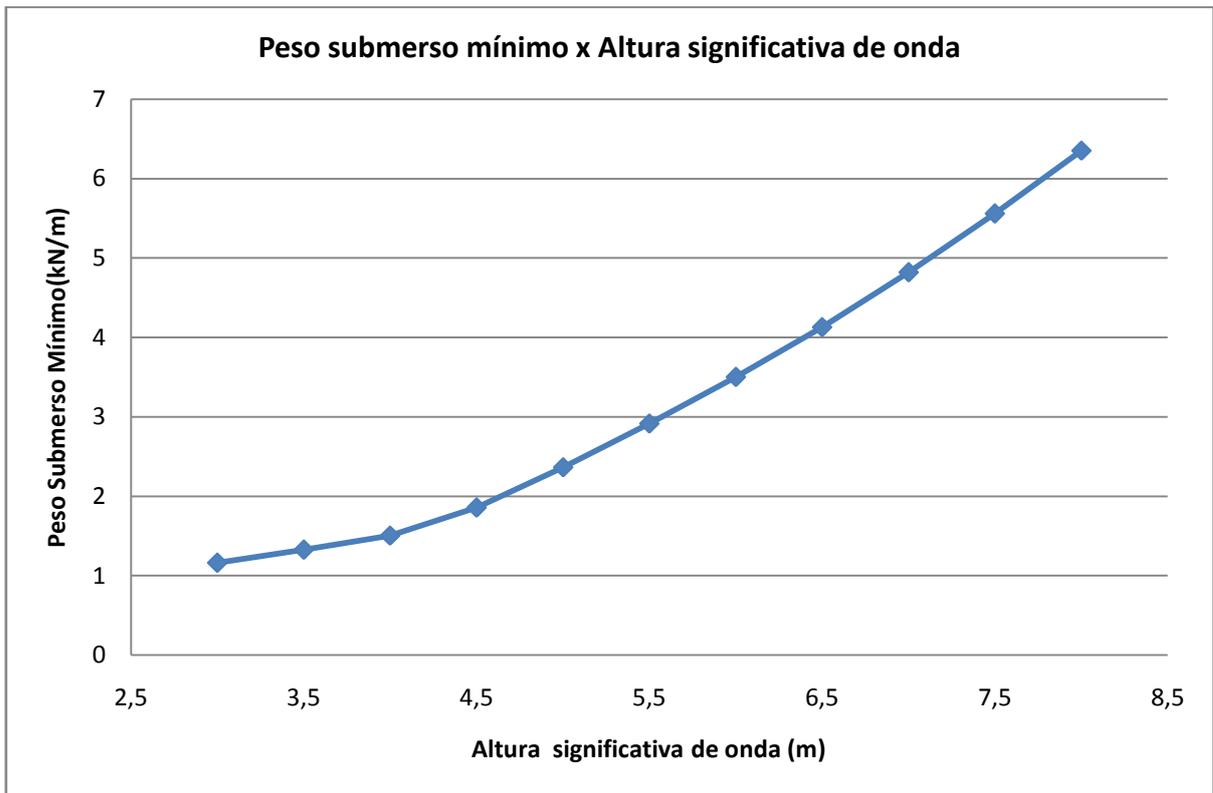


Figura 6.4 - Gráfico de correlação Peso submerso mínimo x Altura significativa de onda.

A partir da análise do gráfico pode-se concluir que:

- O peso submerso mínimo e a altura da onda são diretamente proporcionais, ou seja, quanto maior a amplitude da onda incidente no duto, maior será a espessura de concreto necessária para estabilizar o duto e maior será o peso submerso mínimo.

- Não há linearidade entre o peso submerso mínimo e a profundidade d'água. À medida que a altura da onda aumenta, a variação do peso submerso mínimo também aumenta. A variação de peso submerso mínimo entre as alturas de onda de 3,0 e 4,0 metros é muito menor que entre 7,0 e 8,0.

6.1.3.3 Período da Onda

A Tabela 6.6 apresenta os resultados obtidos no estudo de sensibilidade da altura do período da onda de projeto. Neste estudo, variou-se o valor do período da onda mantendo os demais parâmetros constantes.

Tabela 6.6 – Análise de sensibilidade do período da onda.

Análise de Sensibilidade: Período da Onda				
Período da Onda (s)	Espessura do revestimento de concreto (pol)	Peso submerso mínimo (kN/m)	Fator de Segurança	
			Vertical	Horizontal
7,0	1,98	1,247	3,069	1,004
7,1	2,03	1,296	3,076	1,000
7,2	2,09	1,355	3,103	1,004
7,3	2,14	1,404	3,108	1,000
7,4	2,19	1,453	3,120	1,000
7,5	2,25	1,513	3,135	1,000
7,6	2,31	1,572	3,156	1,004
7,7	2,46	1,723	3,308	1,002
7,8	2,61	1,876	3,449	1,002
7,9	2,76	2,030	3,582	1,003
8,0	2,90	2,176	3,691	1,001
8,1	3,04	2,323	3,795	1,000
8,2	3,18	2,472	3,893	1,000
8,3	3,32	2,622	3,986	1,001
8,4	3,46	2,774	4,075	1,003
8,5	3,59	2,916	4,148	1,002

A Figura 6.5 representa graficamente a correlação entre os valores do peso submerso mínimo do duto e do período de onda indicados na Tabela 6.6.

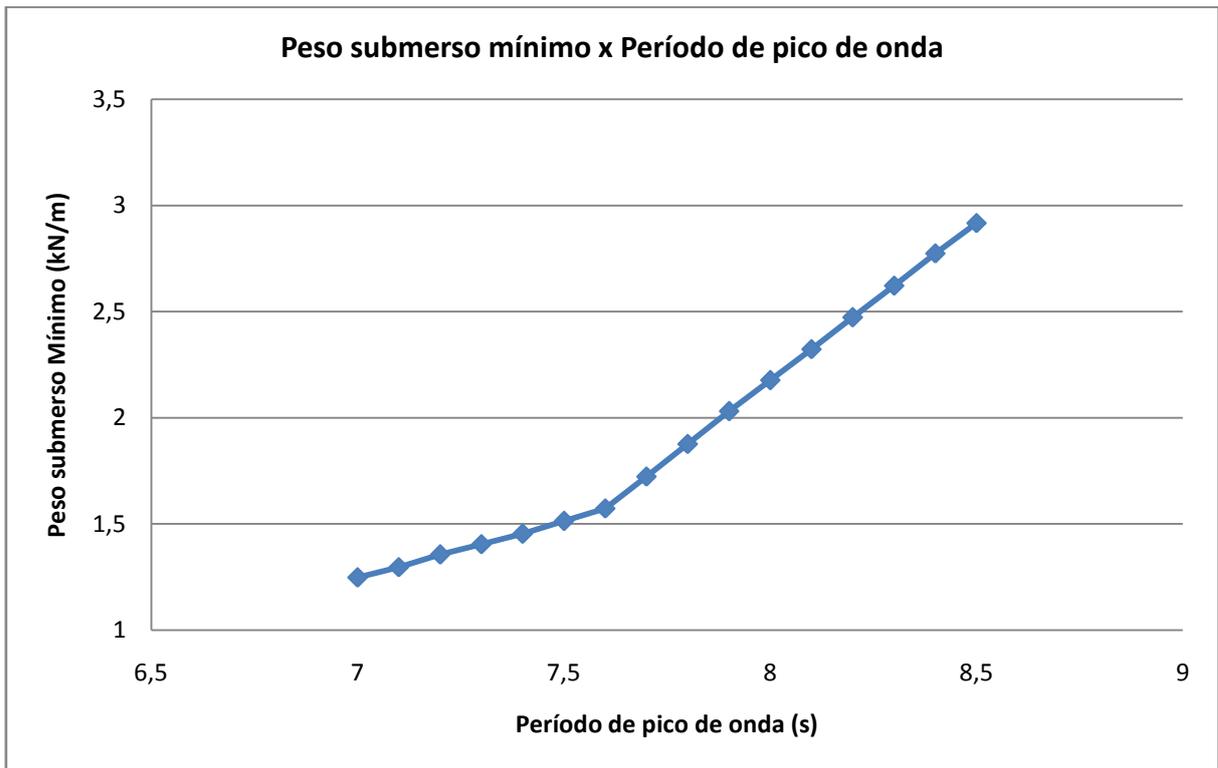


Figura 6.5 - Gráfico de correlação Peso submerso mínimo x Período de pico de onda.

A partir da análise do gráfico pode-se concluir que:

- O peso submerso mínimo e a altura da onda são diretamente proporcionais, ou seja, quanto maior o período de onda, maior será a espessura de concreto necessária para estabilizar o duto e maior será o peso submerso mínimo.
- Ondas com períodos inferiores a 7,6s possuem pequena variação de peso submerso mínimo quando comparadas a ondas com períodos superiores a 7,6s.

6.1.4 Efeitos dos Parâmetros do Solo

Os parâmetros geotécnicos que afetam a estabilidade de dutos submarinos são: o tipo de solo, presença de rebaixamento e propriedades características do solo (peso do solo).

No presente trabalho, optou-se pelo fator de atrito do solo para representar a variação dos parâmetros indicados acima.

A Tabela 6.7 apresenta os resultados obtidos no estudo de sensibilidade do fator de atrito do solo. Neste estudo variou-se o valor do fator de atrito do solo mantendo os demais parâmetros constantes.

Tabela 6.7 – Análise de sensibilidade do fator de atrito do solo.

Análise de Sensibilidade: Fator de Atrito do Solo				
Fator de atrito do solo	Espessura do revestimento de concreto (pol)	Peso submerso mínimo (kN/m)	Fator de Segurança	
			Vertical	Horizontal
0,20	3,65	2,983	5,944	1,001
0,25	3,23	2,525	5,212	1,000
0,30	2,93	2,207	4,674	1,000
0,35	2,71	1,978	4,271	1,003
0,40	2,53	1,784	3,936	1,001
0,45	2,39	1,653	3,671	1,002
0,50	2,27	1,533	3,442	1,000
0,55	2,18	1,443	3,268	1,005
0,60	2,10	1,364	3,113	1,006
0,65	2,02	1,286	2,956	1,000
0,70	1,96	1,228	2,838	1,001

A Figura 6.6 representa graficamente a correlação entre os valores do peso submerso mínimo do duto e do fator de atrito do solo indicados na Tabela 6.7.

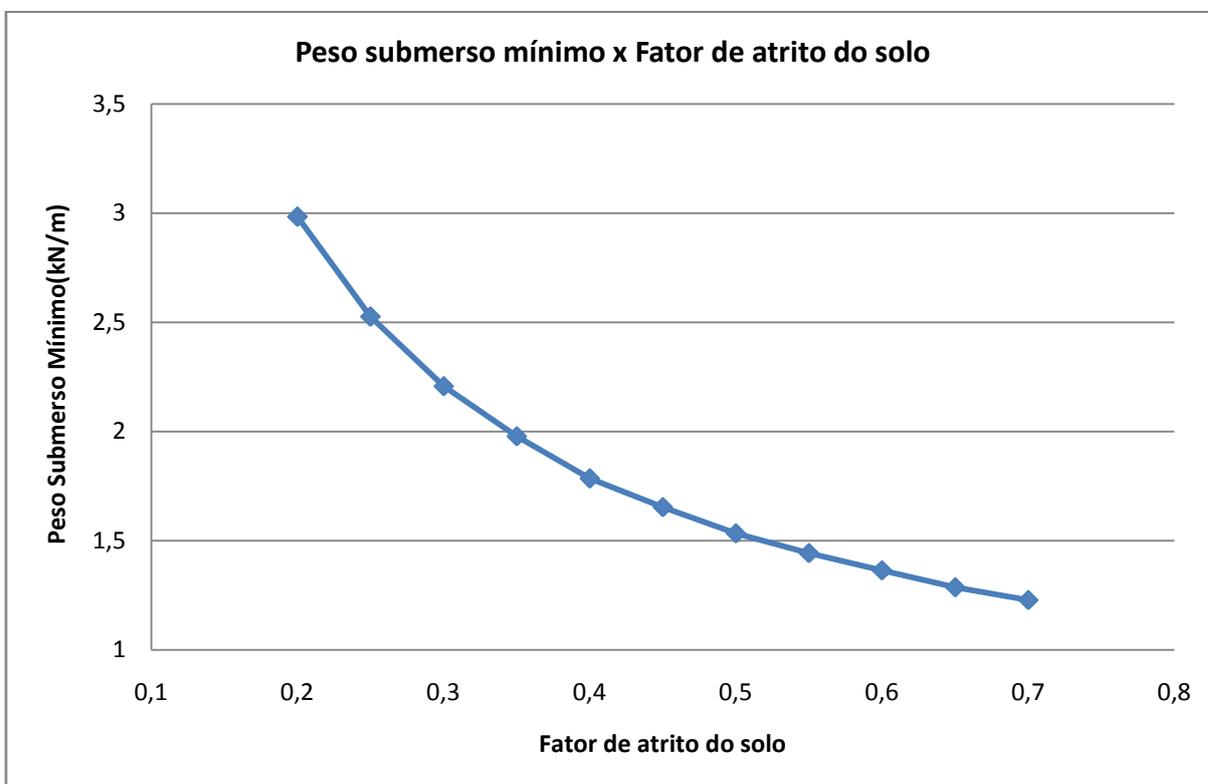


Figura 6.6 - Gráfico de correlação Peso submerso mínimo x Fator de atrito do solo.

A partir da análise do gráfico, pode-se concluir que:

- O peso submerso mínimo e o fator de atrito do solo são inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior o fator de atrito, menor será a espessura de concreto necessária para estabilizar o duto e menor será o peso submerso mínimo.

- Não há linearidade entre o peso submerso mínimo e o fator de atrito do solo. À medida que o fator de atrito aumenta, a variação do peso submerso mínimo diminui. 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.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÕES

A análise de estabilidade é uma etapa importante do projeto de dimensionamento de dutos, pois a partir dela pode-se garantir que o duto permaneça dentro da rota desejada.

No presente trabalho, foi elaborado um estudo para calcular a espessura de concreto necessária para um duto de 20 pol situado na Bacia de Campos sujeito à ação de ondas e correntes marinhas manter-se estável.

O estudo em questão constou da utilização de uma planilha computacional, baseada nos procedimentos previstos na norma DNV-RP-F109. Foi adotado o método de Estabilidade Estática Absoluta, descrito no capítulo 4.

Foi assumido que a região não apresenta elevado risco de tempestade, então foi utilizado um fator de segurança baixo.

As análises consideraram a incidência das ações ambientais (onda e corrente) na direção de 90°, mais desfavorável para estabilização do duto.

Para analisar o comportamento dos principais fatores que influenciam na estabilidade do duto foi realizado um estudo de sensibilidade.

De acordo com os resultados apresentados no capítulo 6, podem ser estabelecidas as seguintes conclusões:

1) O duto de 20pol (51cm) na Bacia de Campos necessitou de um revestimento de concreto de 2,1pol (5cm) para as condições de mar descritas ao longo deste trabalho, com base nas recomendações da norma internacional DNV RP-F109 2010 [4] que rege o projeto de estabilidade hidrodinâmica de duto submarinos.

2) O estudo de sensibilidade mostrou que os parâmetros característicos do duto, da corrente, da onda e do solo exercem grande influência sobre o cálculo de estabilidade de dutos.

3) O valor obtido para o fator de segurança horizontal foi menor que o obtido para o fator de segurança vertical, sendo assim, ao atender a estabilidade horizontal, a estabilidade vertical será atendida.

4) A velocidade da corrente é diretamente proporcional ao peso submerso mínimo. Um aumento na velocidade da corrente na região onde o duto será instalado implica em um aumento do peso submerso mínimo necessário para a estabilização.

5) A altura significativa da onda é diretamente proporcional ao peso submerso mínimo. Um aumento na altura da onda na região onde o duto será instalado implica em um aumento do peso submerso mínimo requerido para que haja estabilidade.

6) O período da onda é diretamente proporcional ao peso submerso mínimo. Um aumento no valor do período da onda na região onde a tubulação será instalada implica em um aumento do peso submerso mínimo necessário para que haja estabilização.

7) A profundidade d'água é inversamente proporcional ao peso submerso mínimo. Uma redução na profundidade d'água da região de instalação do duto implica em um acréscimo do peso submerso necessário para a estabilização do duto.

8) O fator de atrito do solo é inversamente proporcional ao peso submerso mínimo. Uma redução no fator de atrito implica em um acréscimo do peso submerso requerido para que haja estabilidade.

9) Os resultados foram satisfatórios e encontram-se dentro dos valores esperados.

7.2 SUGESTÕES

Recomenda-se, para trabalhos futuros a elaboração de uma planilha para realizar o cálculo de estabilidade baseado no método de Estabilidade Generalizada, de forma a aplicar as curvas de projeto apresentadas na norma DNV–RP-F109 [4].

Outra sugestão seria a elaboração de um programa de cálculo de estabilidade hidrodinâmica através do método de Análise Dinâmica de Estabilidade de dutos submarinos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TN59_Tecnologia_subsea Disponível em:
<http://www.tnpetroleo.com.br>
Acesso em: 1 de Novembro de 2010, 20:00.
- [2] Petrobrás Expomoney Disponível em:
<http://www2.petrobras.com.br>
Acesso em: 30 de Outubro de 2010, 18:00.
- [3] KYRIAKIDES, S. & CORONA, E., “Mechanics of Offshore Pipelines Vol. 1”. 1 ed. Elsevier, 2007;
- [4] DNV – RP – F109, “On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines”, Det Norske Veritas, 2010;
- [5] AGA PRCI – Submarine On-bottom Stability Analysis and Design Guidelines, Vols. 1 e 2. (Manual do AGA). December, 1998;
- [6] CHAKRABARTI, S.K., “Handbook of Offshore Engineering Vol. 2”. 1 ed. Elsevier, 2005;
- [7] JONYLSON CARVALHO DE AMARANTE, M.Sc. 2009
- [8] http://www.google.com.br/images?hl=pt.br&tbs=isch%3A1&sa=1&q=duto+rigido+submarino&btnG=Pesquisar&aq=f&aqi=&aql=&oq=&gs_rfai= (04/11/2010);
- [9] MASSA, A.L.L., “Contribuição ao estudo de flambagem em dutos rígidos submarinos conduzindo fluido aquecido”. Tese M.Sc. COPPE/UFRJ, 2003;
- [10] LIMA, A.J., “Análise de dutos submarinos sujeitos a vibrações induzidas por vórtices”, Tese M.Sc. COPPE/UFRJ, 2007;
- [11] LIMA JR., M.H.A., “Verificação de critérios de estabilidade de dutos apoiados no leito marinho”. Tese M.Sc. UFRJ/ COPPE/PEC, 2010;
- [12] maps.google.com(04/11/2010);
- [13] GALGOUL, E.C., “Simulação numérica de procedimentos de instalação de dutos submarinos”. Tese M.Sc. COPPE/UFRJ/PEC, 2009;
- [14] SILVA, A. P., “Análise da Influência da Temperatura na Rigidez à Flexão de Linhas Flexíveis”. Engenharia Naval e Oceânica, UFRJ, 2006.
- [15] OFFPIPE User’s Guide – Versão 2.05, MALAHY JR, R.C., 1996;
- [16] FERREIRA, A. P., “Limitação de vão livres de dutos submarinos devido a vibrações causadas por difusão de vórtices”. Tese de M.Sc., CTC-TPC/UFF, 2003;