

INSTALAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS EM ÁGUAS ULTRAPROFUNDAS.

Marcelo Lopes Xavier

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Aprovada por:

Prof. Murilo Augusto Vaz, Ph.D.

Prof. Antonio Carlos Fernandes, Ph. D.

Prof. Ivan Carlos Pimentel da Cruz, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

XAVIER, MARCELO LOPES

Instalação de dutos flexíveis em águas ultraprofundas. [Rio de Janeiro] 2006.

XII, 82 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Oceânica, (2006).

Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

1. Instalação de flexíveis. 2. Águas ultraprofundas.

I. COPPE/UFRJ. II. Título (série).

AGRADECIMENTOS

Durante a elaboração deste trabalho, gostaria de destacar a colaboração do professor Murilo Vaz, por sua orientação sempre presente. Do grupo de docentes do curso de Mestrado em Engenharia Oceânica da COPPE UFRJ pelo conhecimento adquirido ao longo do curso.

Saliento a importância de Odd Kvello por sua visão de futuro para os profissionais da empresa e de todo o departamento de Engenharia e Construção da SUBSEA7 pela constante e intensa troca de conhecimentos vivenciada nesses últimos cinco anos.

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

INSTALAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS EM ÁGUAS ULTRAPROFUNDAS

Marcelo Lopes Xavier

Junho/2006

Orientador: Murilo Augusto Vaz

Programa: Engenharia Oceânica

Novos cenários de exploração offshore de petróleo estão sendo descobertos em águas cada vez mais profundas e a viabilidade de produção destas reservas requer uma análise criteriosa. A tecnologia e os instrumentos utilizados hoje na instalação dos equipamentos indispensáveis para a exploração de novos campos em profundidades acima de 2000m precisam ser validados. Este trabalho promove uma avaliação da instalação de dutos flexíveis em lâminas d'água de até 3000m, citando desafios, discutindo problemas e, finalmente, propondo soluções.

Aspectos relacionados à técnica específica do duto flexível e aos equipamentos de instalação são apresentados. Assim como a tecnologia de dutos flexíveis capazes de resistir às solicitações impostas por um cenário de 3000m de profundidade.

Análises globais de diferentes configurações de catenárias e análises locais do flexível de novas tecnologias em uma proposta de operação em 3000m são os principais focos deste trabalho.

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

FLEXIBLE PIPE INSTALLATION IN ULTRADEEPWATER

Marcelo Lopes Xavier

June / 2006

Advisor: Murilo Augusto Vaz

Department: Ocean Engineering

New offshore scenarios for oil exploitation have been discovered in increasing water depths and the feasibility of oil production requires more accurate analyses. The technology and the product use nowadays during the installation of the subsea equipment required for oil exploitation must be investigated and validated for water depths deeper than 2000m. This paper evaluates the installation of flexible pipes in water depths up to 3000m, naming challenges, discussing problems and finally analyzing solutions.

Aspects of flexible pipe technology and the installation equipment are presented in this paper. So is the technology of flexible pipes capable of maintain integrity in scenarios of water depths up to 3000m.

Global analyses of various catenary configurations and local analyses of the new flexible pipe in a 3000m operation are the main focus of this paper.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	HISTÓRICO DE INSTALAÇÃO DE FLEXÍVEIS	2
1.1.1	Instalação de flexíveis no Brasil	3
1.2	CUSTO DE UM FLEXÍVEL	5
1.3	NORMAS	7
1.4	FABRICAÇÃO DO FLEXÍVEL	7
1.5	DESAFIOS EM ÁGUAS ULTRAPROFUNDAS	8
1.6	O DUTO FLEXÍVEL	9
1.6.1	Estrutura convencional de um duto flexível	9
1.6.2	Novos conceitos de dutos flexíveis	11
1.7	NAVIOS DE LANÇAMENTO DE DUTOS	14
1.7.1	Adequação à operação em águas ultraprofundas	15
1.7.1.1	Tensionadores	16
1.7.1.2	Guinchos	16
1.7.1.3	Guindastes	17
1.7.1.4	Sistema de armazenamento do flexível	17
1.7.1.5	Equipamentos de Suporte	17
1.8	A ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	18
2	ANÁLISE GLOBAL DO LANÇAMENTO EM PROFUNDIDADE DE 3000m	19
2.1	OBJETIVO	19
2.2	FORMULAÇÃO ANALÍTICA	19
2.2.1	Resultados da variação de profundidade e ângulo de topo na configuração	20
2.3	ANÁLISE GLOBAL DE DIFERENTES DUTOS	25
2.3.1	Comparação dos resultados da análise com o Orcaflex	27
2.4	CARREGAMENTOS	29
2.4.1	Carregamentos ambientais:	29
2.5	COMPORTAMENTO DINÂMICO	30
2.6	RESULTADOS DA ANÁLISE GLOBAL	39
2.7	CONCLUSÕES DAS ANÁLISES GLOBAIS	47
3	ESTUDO DE CASO	50
3.1	CENÁRIO	51

3.2	PARÂMETROS DO MODELO	52
3.2.1	Propriedades dos dutos	54
3.2.2	Critérios Ambientais	54
3.2.3	Parâmetros do Navio de Instalação.....	55
3.3	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	55
3.3.1	Cargas no momento da CVD de 1 ^a :.....	55
3.3.2	Parâmetros de lançamento ao longo da rota:.....	57
3.3.3	Cargas no momento da CVD de 2 ^a :.....	61
3.3.4	Condição Crítica de Instalação.....	62
3.4	COMENTÁRIOS SOBRE OS RESULTADOS	64
3.5	ANÁLISE LOCAL NO FLEXÍVEL	64
3.5.1	Aperto mínimo para sustentação do duto.....	66
3.5.2	Aplicação das cargas do estudo de caso	67
3.5.3	Modelo em elementos finitos.....	67
3.6	COMENTÁRIOS SOBRE OS RESULTADOS	71
4	CONCLUSÕES	73
4.1	CENÁRIOS FUTUROS	73
5	BIBLIOGRAFIA	75
	APÊNDICE A	77
	APÊNDICE B	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – <i>Aplicação da armadura de tração</i>	8
Figura 2 – <i>Camadas da estrutura de um duto flexível</i>	9
Figura 3 – <i>Estrutura de um flexível com utilização de materiais compósitos na armadura de tração</i>	12
Figura 4 – <i>Layout de um navio de lançamento de dutos flexíveis</i>	15
Figura 5 – <i>Sistema de coordenadas</i>	19
Figura 6 – <i>Configuração das catenárias em 3000m para diferentes ângulos de topo</i> ...	21
Figura 7 – <i>Gráfico com variação da projeção horizontal e comprimento suspenso</i>	22
Figura 8 – <i>Gráfico da projeção horizontal e do comprimento suspenso com a variação do ângulo de topo</i>	23
Figura 9 – <i>Gráfico de variação de raio de curvatura em função do ângulo de topo</i>	24
Figura 10 – <i>Gráfico de variação de raio de curvatura em função da profundidade</i>	25
Figura 11 - <i>Gráfico do comprimento suspenso para diferentes profundidades</i>	28
Figura 12 - <i>Gráfico da projeção horizontal da catenária para diferentes profundidades</i>	28
Figura 13 – <i>Representação gráfica dos seis graus de liberdade de um SFO</i>	30
Figura 14 – <i>Gráfico do FAD da carga de um corpo em um navio de rígidos em função do ângulo de incidência das ondas</i>	32
Figura 15 - <i>Gráfico do FAD da carga de um corpo em um navio de flexíveis em função do ângulo de incidência das ondas</i>	33
Figura 16 – <i>Gráfico do FAD da tração de topo da catenária em função do ângulo de incidência das ondas com a catenária de meio grau conectada ao navio</i> ...	34
Figura 17 - <i>Gráfico do FAD da tração de topo da catenária em função do ângulo de incidência das ondas com a catenária de um grau conectada ao navio</i>	34
Figura 18- <i>Gráfico do FAD da tração de topo da catenária em função do ângulo de incidência das ondas com a catenária de 1,5 graus conectada ao navio</i>	35
Figura 19 - <i>Gráfico do FAD da tração de topo da catenária em função do ângulo de incidência das ondas com a catenária de cinco graus conectada ao navio</i> . 35	
Figura 20 - <i>Gráfico do FAD da tração de topo da catenária em função do ângulo de incidência das ondas com a catenária de sete graus conectada ao navio</i> ...	36
Figura 21 - <i>Gráfico do FAD da tração de topo da catenária em função do ângulo de incidência das ondas com a catenária de sete graus conectada ao navio</i> ...	36

Figura 22 - <i>Gráfico da Tração de topo estática para diferentes profundidades</i>	40
Figura 23 - <i>Gráfico da Tração de topo dinâmica para diferentes profundidades</i>	41
Figura 24 - <i>Gráfico do comprimento suspenso da catenária para diferentes profundidades</i>	42
Figura 25 - <i>Gráfico da projeção horizontal da catenária para diferentes profundidades</i>	43
Figura 26 - <i>Gráfico da tração de fundo dinâmica para diferentes profundidades</i>	44
Figura 27 - <i>Gráfico da tração de fundo estática para diferentes profundidades</i>	44
Figura 28 - <i>Gráfico do momento fletor para diferentes profundidades</i>	45
Figura 29 – <i>Curvatura de diferentes dutos para 3000m e diferentes ângulos de topo</i> ..	46
Figura 30 – <i>Raio mínimo de diferentes dutos para 3000m e diferentes ângulos de topo</i>	47
Figura 31 – <i>Campos de exploração de petróleo na bacia de Campos</i>	50
Figura 32 – <i>Localização de poço em profundidades próximas a 3000 metros</i>	51
Figura 33 – <i>Perfil do leito marinho para o estudo de caso</i>	52
Figura 34 – <i>Desenho esquemático representando uma CVD de 1ª extremidade</i>	53
Figura 35 – <i>Desenho esquemático representando lançamento ao longo da rota</i>	53
Figura 36 – <i>Desenho esquemático representando a conexão de 2ª extremidade</i>	54
Figura 37 – <i>Vista superior do modelo de conexão vertical de 1ª extremidade em Orcaflex</i>	56
Figura 38 – <i>Vista lateral do modelo de conexão vertical de 1ª extremidade</i>	56
Figura 39 – <i>Tração de Topo dinâmica ao longo do lançamento</i>	57
Figura 40 – <i>Tração de Topo estática ao longo do lançamento</i>	58
Figura 41 – <i>Tração dinâmica no TDP ao longo do lançamento</i>	59
Figura 42 – <i>Tração estática no TDP ao longo do lançamento</i>	59
Figura 43 – <i>Comprimento Suspenso ao longo da rota</i>	60
Figura 44 – <i>Projeção horizontal da catenária ao longo da rota</i>	60
Figura 45 – <i>Curvatura da catenária ao longo da rota</i>	61
Figura 46 – <i>Vista lateral do modelo de CVD 2ª em Orcaflex</i>	62
Figura 47 – <i>Tração de topo estática para duto alagado</i>	63
Figura 48 – <i>Tração de topo dinâmica para duto alagado</i>	63
Figura 49 – <i>Modelo 3D do duto flexível</i>	68
Figura 50 – <i>Malha de elementos finitos</i>	68

Figura 51 – Resultados de tensões de Von Mises devido à compressão do tensionador com três “tracks”	69
Figura 52 – Resultados de tensões de Von Mises devido à compressão do tensionador com dois “tracks”	69
Figura 53 – Resultados de tensões de Von Mises devido à compressão do tensionador com quatro “tracks”	70
Figura 54 – Resultados de tensões de Von Mises devido à compressão do tensionador com quatro “tracks” e tração de 250ton	70
Figura 55 – Fator de utilização DNV para diferentes espessuras	79
Figura 56 – Modelo 3D e malha de elementos finitos do duto flexível	81
Figura 57 – Resultados de tensões Axiais na carcaça e armaduras de tração	81
Figura 58 – Resultados de deformações no duto em função do aperto	82

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – <i>Comparação de preços entre dutos flexíveis e rígidos</i>	6
Tabela 2 – <i>Resultados para 3000m de profundidade e ângulo de topo de cinco graus</i> . 40	
Tabela 3 – <i>Parâmetros do novo flexível</i>	51
Tabela 4 – <i>Características dos equipamentos do navio de lançamento</i>	55
Tabela 5 – <i>Cargas durante operação de CVD em 1ª extremidade</i>	56
Tabela 6 – <i>Cargas durante operação de CVD em 2ª extremidade</i>	62
Tabela 7 – <i>Nível de tensões para diferentes configurações de track</i>	71
Tabela 8 – <i>Resultados dos modelos quando submetidos à tração</i>	82
Tabela 9 – <i>Resultados dos modelos quando submetidos ao aperto</i>	82

ABREVIACÕES

BAP – *Base Adaptadora de Produção*

CT – *Centro*

CVD – *Conexão vertical direta*

Deg – *Degrees – graus*

FAD – *Fator de Amplificação Dinâmica*

FCR – *“Fiber Carbon Reinforced” – Fibra de carbono reforçada*

FEA – *Finite Element Analysis – Análise por elementos finitos*

FSCT – *Fiber Spar composite tubing*

H – *Altura de onda*

Hs – *Altura significativa de onda*

JONSWAP – *Joint North Sea Wave Project*

Kp – *Key point – ponto de referência*

LDA – *lâmina d’gua*

MBR – *Minimum bending radius – raio mínimo de curvatura*

MCV – *Módulo de conexão vertical*

PS – *Bombordo*

RAO – *Response Amplitude Operator*

ROV – *Veículo operado remotamente*

SB – *Boreste*

SFO – *Sistema oceânico flutuante*

TDP – *“Touch Down Point” Ponto da Catenária que toca o leito marinho*

Tp – *Período de Pico*

Tz – *Período de cruzamento no zero*

GLOSSÁRIO

Bundle - *Conjunto de dutos, utilizado para interligar equipamentos submarinos e estes às unidades de produção, composto por linhas de escoamento e umbilicais de controle.*

Flexível unbonded – *Duto em que as camadas não são coladas entre si, permitindo deslizamento entre as mesmas.*

Flowline – *Trecho estático de linha flexível ou rígida (apoiado no fundo do mar).*

Goose-neck – *“Spool” curvo flangeado, componente do MCV, que promove a transição entre o duto flexível e o hub de conexão vertical.*

J lay – *Método de lançamento de dutos rígidos.*

Lay barge – *Embarcação de lançamento de dutos.*

Manifold – *Equipamento para coleta de óleo cru e distribuição de “gas-lift” e água de injeção.*

Overboarding – *Operação de transposição de linhas ou equipamentos por sobre as rodas de lançamento do navio, de modo a preservar a linha ou equipamento em questão contra esforços de flexão elevados no lançamento.*

Riser – *Trecho dinâmico de linha flexível / rígido que interliga o sistema submarino de coleta / exportação à unidade de produção.*

Tracks – *Neste trabalho refere-se às pistas dos tensionadores.*

1 INTRODUÇÃO

A produção submarina de petróleo e gás é, e tem sido, um constante e motivador desafio para a indústria, no qual aspectos como dificuldades ambientais e de locação são críticos. Desde a completação do primeiro poço submarino em 1947, em Lake Eric, onde os equipamentos usados em águas rasas eram similares aos utilizados em terra, ocorreu um grande avanço tecnológico, tanto nos métodos aplicados, quanto nos equipamentos empregados. Tais avanços, combinados com a experiência adquirida, têm levado a exploração de petróleo e gás a ampliar progressivamente suas fronteiras na direção de águas cada vez mais profundas, o que defronta os técnicos com cenários significativamente mais adversos.

A partir da redução de reservas em águas rasas, inicia-se a adequação de todos os processos e equipamentos envolvidos a uma nova realidade: a exploração em águas ultraprofundas.

A indústria petrolífera está constantemente ampliando e desenvolvendo novas técnicas, movida pelo desejo de colocar em produção seus campos já descobertos em águas profundas, assim como campos potenciais em profundidades cada vez maiores de lâmina d'água.

Dentre os inúmeros desafios tecnológicos para viabilizar a exploração de petróleo neste novo cenário, o desenvolvimento de dutos preparados para a instalação, e capazes de operar nestas condições, é peça chave para o estabelecimento de uma nova fronteira, a cerca de 3000 metros ref. [1]

No Brasil, dutos flexíveis têm sido utilizados em larga escala no sistema de escoamento “*offshore*” de óleo e gás. A sua utilização em águas ultraprofundas pode vir a ser ainda mais vantajosa, embora dependente do desenvolvimento de novos materiais

e processos, sendo objeto deste trabalho oferecer subsídios a esta discussão, através da análise de uma proposta de instalação dos mesmos neste novo cenário.

1.1 HISTÓRICO DE INSTALAÇÃO DE FLEXÍVEIS

O primeiro registro da utilização de dutos flexíveis data do período da segunda guerra mundial. O duto foi instalado para conectar a Inglaterra à França, durante o período do conflito, com o intuito de viabilizar o transporte de combustível para suporte logístico ref. [2].

Com o passar dos anos, a tecnologia dos flexíveis evoluiu, adequando-se aos novos cenários de utilização. Neste sentido, a forma da estrutura, que se assemelha aos flexíveis aplicados nos dias de hoje, começou a ser desenvolvida desde 1970.

Atualmente, a aplicabilidade destes equipamentos é extensa, conectando poços aos “*manifolds*”, poços aos SFOs, “*manifolds*” aos SFOs. A finalidade também é diversificada, podendo servir para: exportação de gás, injeção de água, produtos químicos e gás, produção de óleo e gás, além do transporte de longa distância de fluidos não tratados.

Ainda, dependendo da utilização, pode apresentar diferentes diâmetros, comprimentos, estruturação de camadas e materiais de composição. As condições inerentes à sua fabricação, instalação, operação e desmobilização, também devem ser consideradas durante a fase de projeto.

Tais condições, inclusive, são julgadas fundamentais desde a implantação do primeiro poço, em West Cameron, a 17m de profundidade. O projeto de instalação e operação foi realizado sem auxílio de mergulhadores, demonstrando a viabilidade do uso de equipamentos e dutos em profundidades não alcançáveis pelo ser humano.

1.1.1 Instalação de flexíveis no Brasil

O duto flexível sempre teve importância fundamental no sistema de exploração brasileiro. Sua utilização apresenta diversos benefícios, dentre os quais podem ser destacados:

- **Antecipação da produção através de sistemas piloto de produção;**
- **Reutilização dos dutos em diferentes sistemas, seja de produção, injeção etc.;**
- **Facilidade de instalação, contemplando a possibilidade de lançamento de três dutos simultaneamente;**
- **Capacidade de lançamento de grandes trechos de dutos numa única campanha de um navio.**

O histórico de utilização do flexível coincide com a descoberta do primeiro campo de exploração na bacia de Campos, em 1975. Em 1976, a PETROBRAS começa a realizar lançamento de dutos flexíveis através de empresas especializadas. A profundidade de instalação destes equipamentos é de aproximadamente 100m.

Com o passar do tempo, a descoberta de reservatórios, e sua conseqüente exploração, tende para águas cada vez mais profundas. As tecnologias de fabricação de flexíveis são aperfeiçoadas e diferentes estruturas são criadas em função das necessidades particulares de cada projeto. Diante do intenso desenvolvimento de novas estruturas de flexíveis, surge a necessidade de padronização do produto e a elaboração de normas específicas torna-se indispensável.

Desta forma, a API Spec 17J é utilizada para normatização de dutos flexíveis pelas indústrias, sendo adotada como padrão para especificação, projeto, fabricação, seleção de materiais e teste destes produtos, ref. [3].

No início da década de 90, a exploração a 900m de profundidade já é uma técnica dominada, contando com dez poços e uma rede de 168km de flexíveis. E em meados desta mesma década, a instalação em lâminas d'água de 1500m já é uma realidade. Pouco tempo depois, no final dos anos noventa, a instalação de dutos flexíveis atinge marcas próximas aos 2000m. O progresso dos primeiros anos do novo século é veloz, já que a rede de flexíveis passa a ser composta por aproximadamente 2500km de linhas de fluxo e 1500km de umbilicais.

Com este histórico, os dutos flexíveis têm tido um importante papel na história de exploração de petróleo no Brasil, construindo gradualmente uma reputação de confiança e viabilidade econômica. Nenhum lugar do mundo tem uma rede de dutos flexíveis como a instalada na bacia de Campos.

Este fator, agregado à variação de parâmetros determinantes num cenário dinâmico, promove a constante necessidade de otimização das configurações do campo submarino de exploração.

O desenvolvimento de um campo ultraprofundo pressupõe inúmeros requisitos básicos para definição da arquitetura final. Os aspectos típicos para determinação do campo são:

- reservatório: tamanho, forma, profundidade e pressão, propriedade do fluido;
- flowlines/risers – número de dutos, tipo de serviço, diâmetro, necessidade de gas lift, performance térmica;
- arranjo submarino – localização de poços e manifolds, batimetria, cronograma de instalação, entre outros, ref. [4]

Estas condições são ainda mais críticas na exploração em águas ultraprofundas e a consequência disto é a exigência de um salto de desenvolvimento que requer não só estruturas mais resistentes de dutos flexíveis, como também avanços em todos os elementos que fazem parte do processo de exploração de petróleo offshore. É necessário que a exploração se torne mais do que tecnicamente possível: deve ser economicamente viável.

Esta perspectiva representa a necessidade de avanço dos projetos de dutos flexíveis atuais, bem como dos conceitos e equipamentos envolvidos na instalação dos mesmos, já que a barreira dos 2000m é comumente apresentada como o limite técnico-econômico para instalação, ref [5].

Este panorama pode ser entendido ao analisarmos o poço 1-BRSA-18-ESS, localizado na Bacia de Campos, que confirmou a existência de acumulações de óleo em águas ultraprofundas (2243 metros). Ao mesmo tempo em que se abre uma nova fronteira exploratória para a atuação no país, cria-se a demanda de pesquisas capazes de viabilizar a prática desta exploração.

1.2 CUSTO DE UM FLEXÍVEL

Apesar do custo do material para fabricação do duto ser alto, algo em torno de seis vezes, ref.[2], o custo equivalente ao duto de aço, o flexível é mais rápido e mais barato para lançamento, podendo ser instalado por embarcações adaptadas ou por navios de perfuração. Através do uso de barcos especificamente projetados para realização desta tarefa, o duto pode ser instalado na faixa de até 500 metros por hora. Isto significa uma grande vantagem comparativa ao custo de mobilização de um “lay barge”, o que acarreta um percentual significativo de redução do custo total do projeto.

O duto também permite recolhimento posterior para inspeção, reparo e reutilização, fator que deve ser levado em consideração nos estudos de viabilidade econômica.

Ainda no âmbito do produto e da instalação, para o cenário de 2000 metros é possível realizar uma comparação, como propõem Thome e Galgoul em 2004, ref [2]: utilizando valores de mercado de concorrências no Brasil para projetos de profundidade que variam de 1300 a 2000 metros. Os autores selecionaram os menores valores por unidade de comprimento de rígido e flexível, estando a comparação apresentada na tabela 1:

Tabela 1 – *Comparação de preços entre dutos flexíveis e rígidos*

OD (in)	Duto flexível (US\$/m)			Duto rígido (US\$/m)		
	Produto	Instalação	Total	Produto	Instalação	Total
4	170	35	205	80	260	340
6	390	60	450	100	250	350
6 (*)	550	60	610	230	250	480

(*) Duto com isolamento térmico

Cabe salientar que os valores de flexível tiveram uma grande variação e, para efeito de confronto, os autores utilizaram os menores preços.

O custo de instalação do rígido está associado à instalação pelo método “J lay”. Para rígidos, existe ainda a possibilidade de lançamento pelo método “reel”, que comparado ao método convencional, inclui solda onshore em ambiente controlado, fora do caminho crítico, permitindo um alto padrão de controle de qualidade, mais rápido, seguro, com soluções mais baratas e, por conseguinte, uma janela mais curta de instalação, ref [9].

Infelizmente, a comparação completa de custos entre rígidos e flexíveis, em profundidades de 3000 metros, ainda não é possível, já que a tecnologia do flexível encontra-se em desenvolvimento.

1.3 NORMAS

Atualmente as normas regulamentadoras relativas a dutos flexíveis não se encontram tão bem desenvolvidas como as de dutos rígidos. Porém algumas recomendações estão disponíveis, como API, NI-2409, Veritec e IP. A API 17J é normalmente utilizada pela indústria para flexíveis “*unbonded*”.

Esta especificação define os requisitos técnicos para assegurar, dimensionalmente e funcionalmente, que os dutos flexíveis sejam projetados e fabricados em conformidade com normas e critérios. Requisitos mínimos são determinados no projeto, seleção de materiais, fabricação, teste, marcação e armazenamento de dutos flexíveis, ref [7] e [16].

Em função da vasta aplicação de flexíveis no Brasil, o “*know-how*” adquirido pelas empresas tem contribuído fortemente para a consolidação da padronização das normas inerentes a estes dutos.

1.4 FABRICAÇÃO DO FLEXÍVEL

Dutos flexíveis são compostos por camadas concêntricas de metal e material polímero termoplástico, podendo ou não ser coladas umas às outras. Os flexíveis abordados neste trabalho são os chamados “*unbonded*”, ou seja, flexíveis em que as camadas não são coladas umas às outras, permitindo o deslizamento entre as mesmas. A Figura 1 mostra a aplicação de armadura de tração no duto.

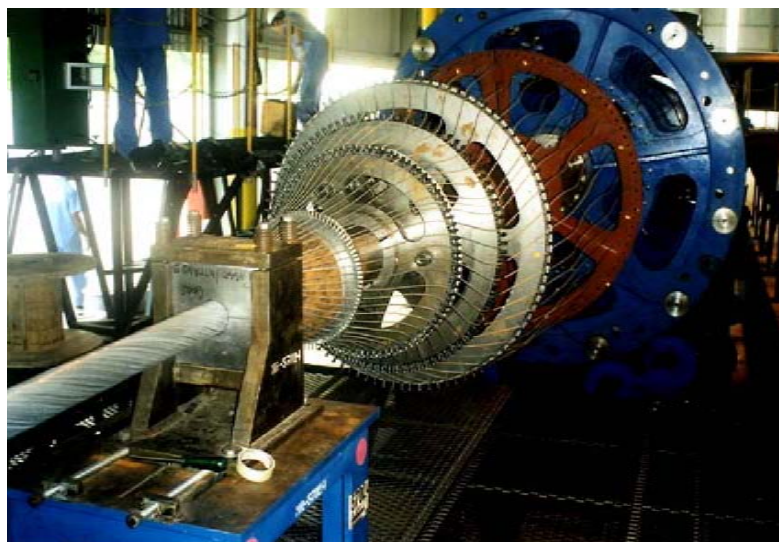


Figura 1 – Aplicação da armadura de tração

O projeto e a fabricação de flexíveis são realizados de forma diferenciada dos dutos rígidos. O fabricante é responsável por todo o projeto de fabricação e, algumas vezes, pela instalação. Por outro lado, em dutos rígidos o fabricante é o responsável pelo projeto, mas raramente é envolvido no processo de instalação.

1.5 DESAFIOS EM ÁGUAS ULTRAPROFUNDAS

A diversidade de problemas para a viabilidade da exploração de petróleo em profundidades de aproximadamente 3000m é extensa. Envolve desafios em várias etapas/campos do processo: perfuração de poços, desenvolvimento de equipamentos submarinos, garantia de escoamento, controle de sistemas submarinos, sistemas de amarra de unidades de produção etc.

Neste cenário global, a dificuldade de utilização/instalação do flexível é um dos aspectos que deve ser avaliado, à luz dos seguintes parâmetros utilizados para esta operação: resistência ao colapso, efeito “*end-cap*”, colapso lateral, isolamento térmico, raio mínimo de curvatura, entre outros.

E, mesmo com um produto projetado, fabricado e resistente a todas as solicitações impostas durante a operação, é necessário garantir a instalação, etapa em que novos obstáculos devem ser superados, entre eles: cargas elevadas, necessidade de adequação dos navios de lançamento e de seus respectivos equipamentos (tensionadores, guinchos, guindastes etc.).

Em águas ultraprofundas, “risers” e “flowlines” devem ser capazes de suportar grandes variações de magnitude e natureza dos carregamentos, sendo necessário, para o desenvolvimento destas estruturas, uma revalidação dos procedimentos de instalação, além do projeto de novos equipamentos, ref. [8].

1.6 O DUTO FLEXÍVEL

No desenvolvimento de um campo submarino, os dutos são parte significativa do custo total do projeto. E, à medida que a profundidade aumenta, os aspectos de instalação dos dutos possuem maior importância no processo.

1.6.1 Estrutura convencional de um duto flexível

Resumidamente, a estrutura de um flexível pode ser entendida conforme a Figura 2.

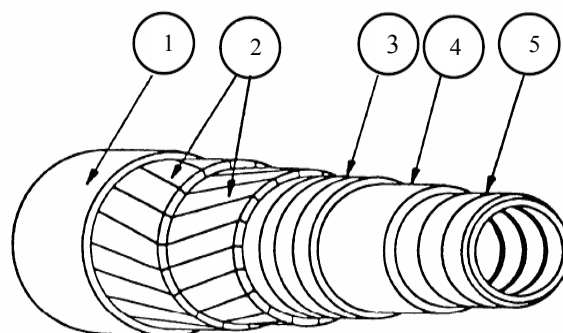


Figura 2 – *Camadas da estrutura de um duto flexível*

A camada 1, denominada de camada externa, pode ser polimérica ou mesmo metálica. Ela deve ser projetada com o intuito de prover proteção às camadas internas do duto.

As armaduras de tração, indicadas com o número 2, devem ser projetadas para a resistência axial requerida. O projeto deve contemplar requisitos de torção, controle de espaçamento entre arames e pressão interna e externa, isto quando o flexível não possuir armaduras de resistência a esta pressão radial.

O número 3 representa as camadas resistentes à pressão radial externa, também chamadas de camadas zeta, que devem ser projetadas para a pressão requerida e devem levar em consideração os espaçamentos entre os arames e evitar perda de intertravamento.

O item 4 representa as camadas adicionais para isolamento térmico e vedação que devem ser projetadas conforme requisitos, assim como estruturas para minimizar o atrito entre superfícies.

Já o item 5, a camada ou carcaça interna, deve levar em consideração os seguintes aspectos:

- Colapso para mínima pressão interna, máxima externa e máxima ovalização. A pressão externa deve ser aplicada integralmente na superfície de contorno exterior da camada. Caso a pressão anular (presente entre as camadas) seja maior que a pressão externa, esta deve ser considerada como premissa do projeto;
- Aspectos relacionados à fadiga da carcaça;

- Propagação de trinca ao longo da carcaça, em função de tensões induzidas por flexão nos espirais intertravados. O projeto da carcaça deve assegurar que a propagação de trinca não ocorra;

- Cargas induzidas por expansão e/ou contração térmica;
- Corrosão.

A estrutura completa de um flexível deve ser projetada para atender os requisitos de equilíbrio torsional e resistência à compressão, conforme premissas de projeto ref. [7].

A necessidade de isolamento térmico, para prover garantia de fluxo, é também tema relevante para estudos na utilização de dutos em águas ultraprofundas, mas não é foco deste trabalho.

1.6.2 Novos conceitos de dutos flexíveis

O advento de dutos flexíveis capazes de serem instalados e de operar em profundidades de dois mil até três mil metros é essencial para o desdobramento e o sucesso na exploração de campos em águas ultraprofundas.

Uma das possibilidades vislumbradas pela indústria é uma composição híbrida de duto, com utilização de materiais compósitos e materiais metálicos, mesmo nas camadas sujeitas aos esforços. Esta combinação permite a elaboração de dutos flexíveis “*unbonded*” de baixo peso e com altíssima resistência ao colapso, ao aperto das sapatas dos tensionadores e à tração. O conceito propõe a implementação de fibra de carbono

reforçada (FCR) nos dutos, promovendo sua utilização em profundidades inatingíveis para dutos flexíveis de estrutura convencional.

O desenvolvimento deste novo conceito de flexíveis está focado na eliminação de problemas e incertezas associadas ao uso da fibra de carbono reforçada em estruturas de dutos convencionais. A aplicação de FCR, como camada resistente à tração, é uma das alternativas, já que resiste bem ao deslocamento axial e radial, e elimina o risco de danos por compressão na estrutura, como por exemplo, o dano conhecido como gaiola de passarinho. A qualificação deste material tem demonstrado que a composição carbono/epóxi apresenta propriedades mecânicas únicas. A adequação de conectores encontra-se em fase desenvolvimento e qualificação.



Figura 3 – *Estrutura de um flexível com utilização de materiais compósitos na armadura de tração*

A Figura 3 apresenta o arranjo estrutural do flexível com utilização de FCR. Esta composição apresenta essencialmente três camadas estruturais, que são: camada interna de aço resistente à compressão, camada polimérica que garante a impermeabilidade e camada formada pelas armaduras de tração reforçadas com fibras de carbono. A camada zeta não faz parte da composição.

Já a aproximação das características de um material compósito às características dos filamentos que o compõem, está relacionada ao alinhamento e a integridade da matriz de fibra. Além disso, testes têm mostrado que este projeto é capaz de prover uma redução significativa de peso de até 50% (ref. [8]).

O “Fiber Spar composite tubing” (FSCT) é um exemplo de duto constituído de materiais compósitos, que é capaz de ser bobinado e está disponível para aplicações com até 100mm de diâmetro interno. Porém, já estão sendo realizados testes em escala real com dutos de até 80mm de diâmetro. Testes de propriedades estruturais foram realizados para 80 e 110°C. Este produto consiste em um termoplástico linear, matriz de fibra/epoxi e fibra exterior ou camada termoplástica protetora. Outras possibilidades são os dutos com polietileno de alta densidade ou polietileno entrelaçado, que estão disponíveis em diâmetros de 102mm e pressão de 17,2 MPa na temperatura máxima de 82°C. Ainda é possível recorrer a materiais poliméricos que podem ser utilizados em temperaturas mais altas.

O investimento no desenvolvimento de uma resina para altas temperaturas está sendo promovido pela Halliburton, que completou recentemente a qualificação do “*Fiberspar Smartpipe Coiled Tubing*” para o sistema avançado de construção dos poços de Anaconda. Este sistema permite a utilização de rotas anteriormente classificadas como impossíveis de serem utilizadas. A partir de operações simuladas, é possível tirar conclusões sobre a compatibilidade do fluido, propriedades estruturais e de resistência à fadiga.

Em parceria com a Fiberspar, a Halliburton também está comercializando dutos feitos por materiais compósitos em completação de poços e aplicações de reparo de

dutos. E, em adição, um programa sistemático de teste está sendo conduzido para determinar a resistência ao colapso de vários projetos.

O segmento de exploração em águas ultraprofundas ainda estuda um novo produto, o duto de termoplástico reforçado, que consiste em um termoplástico linear, um reforço e uma camada externa de proteção termoplástica, funcionando como uma barreira para o fluido e adicionando resistência à compressão. Na constituição do reforço é utilizada a fibra de aramida, enquanto que, na do termoplástico, encontra-se o polietileno que pode ser substituído por outros materiais, como por exemplo, o PVDF e o poly-ketones (PK). No duto de termoplástico, os diâmetros estão disponíveis numa faixa de 100 a 250mm, com faixa de temperatura de serviço variando de 40 até 60°C.

Outros estudos contemplam análise e aplicações em cenários distintos, utilizando diversos materiais ref. [8].

1.7 NAVIOS DE LANÇAMENTO DE DUTOS

O principal aspecto relacionado à instalação de dutos em águas ultraprofundas é o requisito que o sistema de lançamento deve possuir para suportar altos valores de carga de tração de topo.

Caso as mesmas tecnologias de dutos sejam mantidas, os navios de lançamento terão que sofrer mudanças significativas, o que reduzirá o número de navios capazes de realizar as operações e, conseqüentemente, promoverá um aumento nos custos e nos prazos para instalação.

Este panorama fica ainda mais complexo quando é necessário sustentar a carga de dutos cheios.

Portanto, é inevitável o desenvolvimento e introdução de novos conceitos de projeto de sistemas de lançamento para águas ultraprofundas. Os navios de lançamento precisam estar em constante aperfeiçoamento, a fim de se adequarem a esta nova realidade que se avizinha.

A Figura 4 apresenta o “layout” típico de um navio de lançamento de flexíveis, e em destaque, seu sistema de armazenamento de dutos.

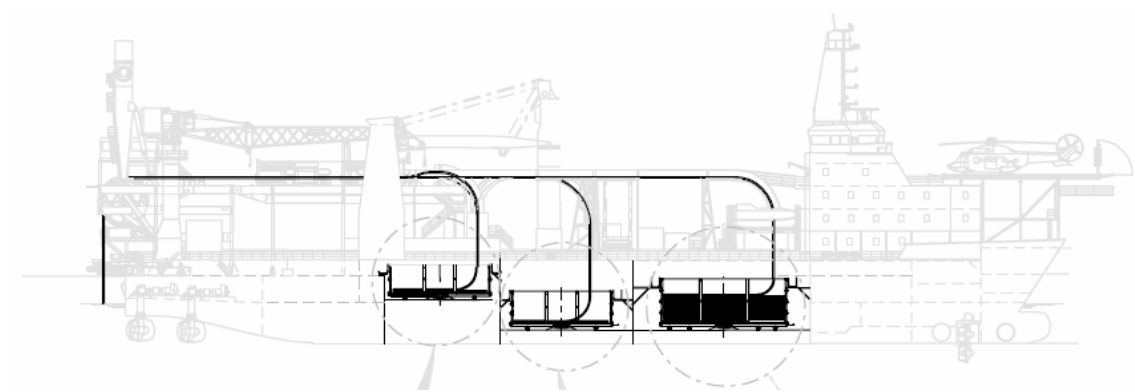


Figura 4 – *Layout de um navio de lançamento de dutos flexíveis*

Aspectos inerentes aos sistemas de abandono e recolhimento também são parte do problema. A própria relação entre peso por unidade de comprimento de um cabo e sua resistência, pode inviabilizar a sua utilização. O emprego de cabos sintéticos de fibra pode ser uma solução, mas sua aplicabilidade precisa ser ratificada ref. [5].

1.7.1 Adequação à operação em águas ultraprofundas

Operações “offshore” em grandes profundidades possuem algumas peculiaridades desafiadoras durante o lançamento de dutos. Algumas destas características são apresentadas abaixo:

- A torção induzida durante o lançamento de dutos flexíveis torna-se maior quando associada à baixa temperatura da água e à pressão externa. Como consequência, aumenta a rigidez do duto e resulta em dificuldades nas operações, como por exemplo,

em uma conexão vertical de segunda extremidade. Portanto, para um maior controle na operação, a conexão de primeira é mais indicada e deve ser realizada sempre que possível.

- A instalação de “bundles” fica comprometida devido ao peso dos dutos. Módulos de conexão para apenas uma linha são mais aplicados. Ref. [9]

- Cargas elevadas que exigem navios especificamente projetados para esta operação. Este item acarreta em mudança nos equipamentos que compõem o sistema básico de lançamento, que são:

1.7.1.1 Tensionadores

Sistema responsável pela sustentação da carga dos dutos durante o lançamento e recolhimento dos mesmos. Podem ser utilizados em série para aumentar a capacidade de sustentação de carga.

Diferentes configurações dos “tracks” podem ser utilizadas: três “tracks” em “Y”, quatro “tracks” em “X”, dois “tracks” verticais etc. O comprimento dos “tracks” influencia diretamente na capacidade de sustentação de carga, ou seja, quanto maior o “track”, maior a área de contato entre o duto e as sapatas, permitindo, para um mesmo fator de atrito e uma mesma pressão de aperto, altos valores de sustentação de carga.

1.7.1.2 Guinchos

Utilizados principalmente nas operações de abandono e recolhimento, são parte fundamental do sistema, devendo ter comprimento e capacidade de carga suficientes para viabilizar a realização das operações em águas ultraprofundas. Também são utilizados como ferramenta essencial para manobras de “*overboarding*” de acessórios e extremidades dos dutos.

1.7.1.3 Guindastes

Utilizados para manuseio dos acessórios e equipamentos pesados, o guindaste deve ser certificado para operações “*offshore*”, possibilitando sua utilização em conexão de módulos verticais a BAPs e “*manifolds*”. Gráficos de carga para diferentes configurações da lança devem ser previamente conhecidos para execução segura das manobras requeridas.

1.7.1.4 Sistema de armazenamento do flexível

É comumente chamado de bobina, quando armazena o duto na vertical, e cesta, quando armazena na horizontal. Sua capacidade de carga deve ser elevada, assim como suas dimensões, permitindo o armazenamento de um grande comprimento de dutos e garantindo sua integridade estrutural.

1.7.1.5 Equipamentos de Suporte

Alguns equipamentos são essenciais durante o lançamento de dutos. O “A-frame” tem importância indispensável nas manobras de “*overboarding*”. Mesa retrátil, patescas e calhas de “*overboarding*”, colares mecânicos, hidráulicos são acessórios que devem estar disponíveis e são utilizados durante a realização de diferentes operações.

Todos estes equipamentos devem estar certificados para as cargas envolvidas nas operações, sendo cada vez mais solicitados à medida que aumenta a profundidade e, conseqüentemente, o peso das catenárias.

1.8 A ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O capítulo 1 apresenta o histórico de instalação de flexíveis e salienta as suas vantagens de aplicação no arranjo submarino. Além de abordar aspectos relacionados aos custos e à projeção de exploração em águas de 3000 metros de profundidade. A composição do flexível, a estrutura convencional utilizada para dutos que são instalados em 2000 metros de profundidade, suas camadas e funções também é explanada. Em continuidade, novos conceitos de composição estrutural são mostrados como alternativa para aplicação do duto em águas cada vez mais profundas. E, como consequência, os equipamentos necessários para lançamento de dutos, assim como os navios de lançamento são avaliados, já que é notória a necessidade de adequação dos equipamentos para realização de operações nas novas fronteiras exploratórias.

No capítulo 2 são realizadas análises globais de lançamento em 3000 metros, configurações de catenária, ângulos de lançamento e reflexões sobre diferentes cenários. Os resultados das simulações numéricas, realizadas em Orcaflex, com dutos flexíveis de tecnologia atual, dutos com novos conceitos e dutos rígidos, são demonstrados.

Um estudo de caso, com aplicação de dutos flexíveis de novas tecnologias, é dissecado no capítulo 3. Para tal, análises estáticas e dinâmicas de validação do lançamento são realizadas, além da apresentação da análise local de aperto.

Finalmente, o capítulo 4 apresenta as principais conclusões e as perspectivas de cenários futuros.

2 ANÁLISE GLOBAL DO LANÇAMENTO EM PROFUNDIDADE DE 3000m

2.1 OBJETIVO

A análise global tem como objetivo avaliar os parâmetros inerentes à configuração de instalação de um duto em 3000m de profundidade, através da investigação de diferentes configurações de catenária, contemplando variações de profundidade e de ângulos de topo.

2.2 FORMULAÇÃO ANALÍTICA

A formulação de catenária, baseada nas premissas de um duto inextensível, com rigidez à flexão nula, são as seguintes, ref. [10]:

$$y = a \cdot \left(\cosh\left(\frac{x}{a}\right) - 1 \right)$$

$$s = a \cdot \sinh\left(\frac{x}{a}\right)$$

Para o sistema de coordenadas conforme a Figura 5.

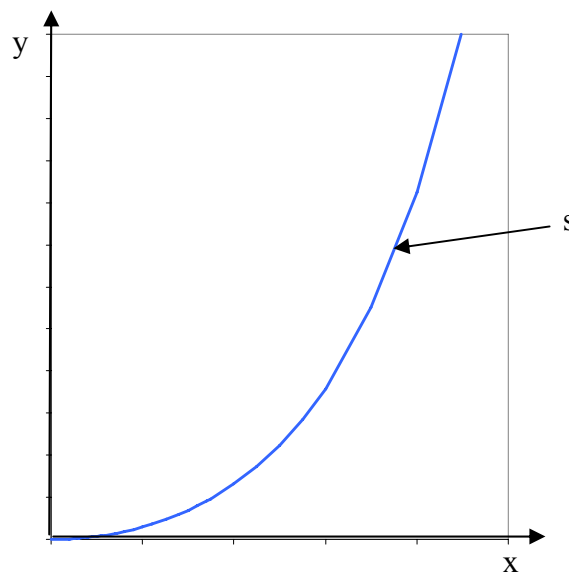


Figura 5 – Sistema de coordenadas

onde:

y = profundidade;

s = comprimento suspenso;

a = comprimento característico, determinado por:

$$a = \frac{T_h}{w}$$

T_h = tração horizontal;

w = peso por unidade de comprimento;

x = projeção horizontal da catenária;

α = ângulo de topo.

As variações de configuração a serem avaliadas serão determinadas por alterações de profundidade e ângulo de topo. Através destes dois parâmetros da catenária, os demais são obtidos através da solução das seguintes equações, ref. [10]:

$$\frac{s}{a} = \left(\frac{1}{\tan(\alpha)} \right)$$

$$\frac{x}{a} = \ln \left[\sqrt{\left(\frac{s}{a} \right)^2 + 1} + \frac{s}{a} \right]$$

$$\frac{y}{a} = \cosh \left(\frac{x}{a} \right) - 1$$

2.2.1 Resultados da variação de profundidade e ângulo de topo na configuração

Com o intuito de prover uma avaliação da variação da configuração da catenária, em função de alterações no ângulo de topo e na profundidade, estão apresentados a

seguir os parâmetros correspondentes às configurações de ângulo de topo de $0,5^\circ$, $1,0^\circ$, $1,5^\circ$, $5,0^\circ$ e $10,0^\circ$.

Primeiramente, a configuração de forma da catenária para 3000 metros de profundidade é apresentada na Figura 6:

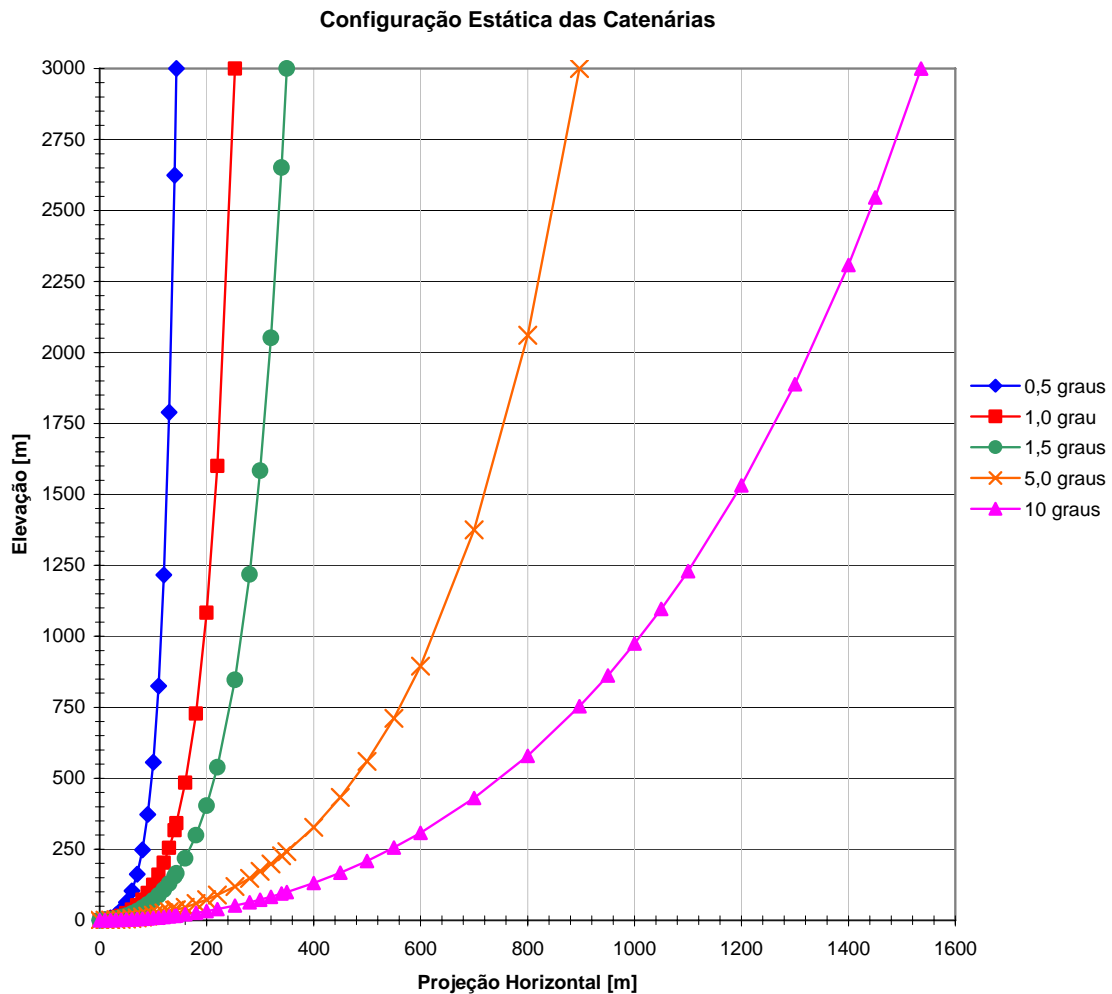


Figura 6 – Configuração das catenárias em 3000m para diferentes ângulos de topo

As variações da projeção horizontal e do comprimento suspenso, apresentados na Figura 7, são parâmetros monitorados durante a operação de lançamento. Nota-se claramente o aspecto linear, para um determinado ângulo de topo, dos parâmetros “x” e “s” ao longo da profundidade.

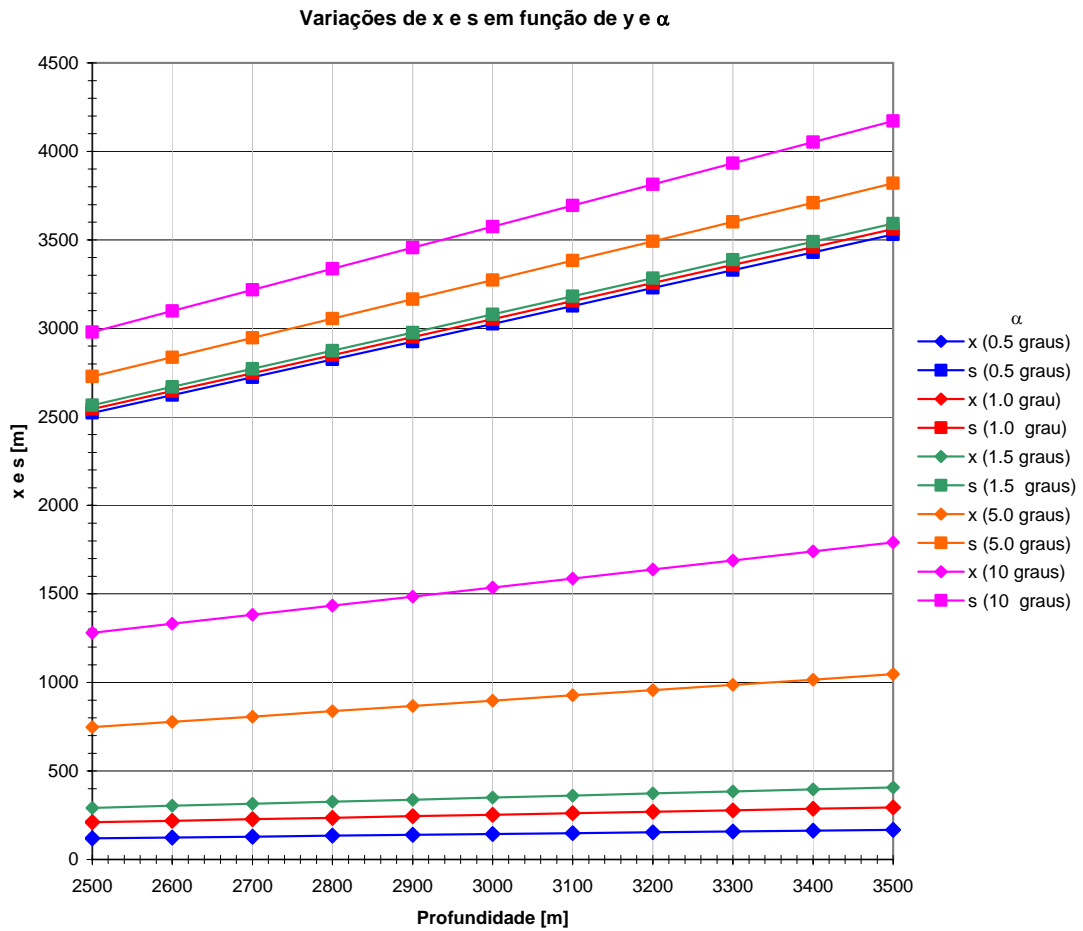


Figura 7 – Gráfico com variação da projeção horizontal e comprimento suspenso

A Figura 8 apresenta a variação dos mesmos parâmetros, porém para alguns valores de profundidade “y”, variando-se o ângulo de topo. Avaliando-se o gráfico, é notável o comportamento linear de “s” e o aspecto divergente e não-linear de “x”, para uma mesma profundidade e ângulos de topo crescentes.

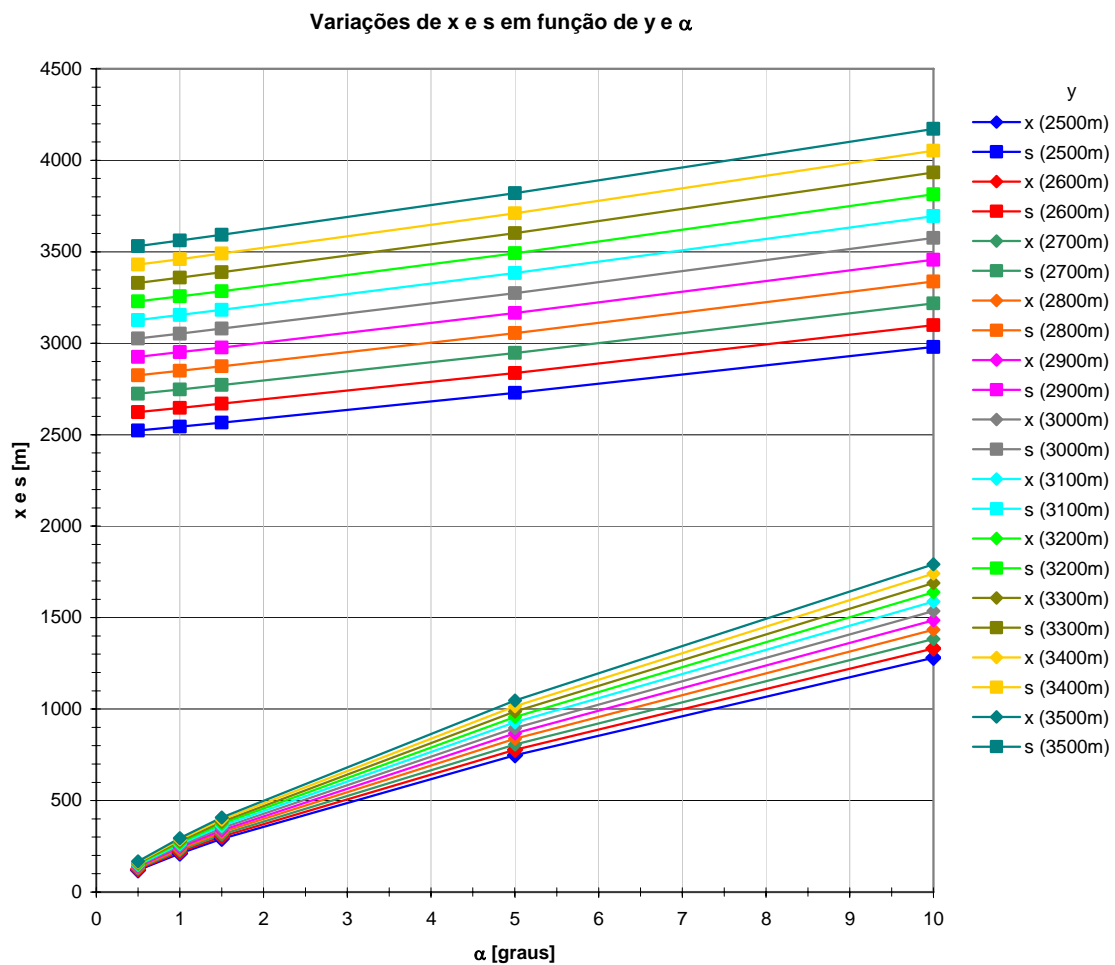


Figura 8 – Gráfico da projeção horizontal e do comprimento suspenso com a variação do ângulo de topo

Um importante parâmetro que deve ser monitorado durante a operação de lançamento é o mínimo raio de curvatura da catenária. A figura 9 e a figura 10 demonstram a variação do MBR, em função da profundidade e do ângulo de topo.

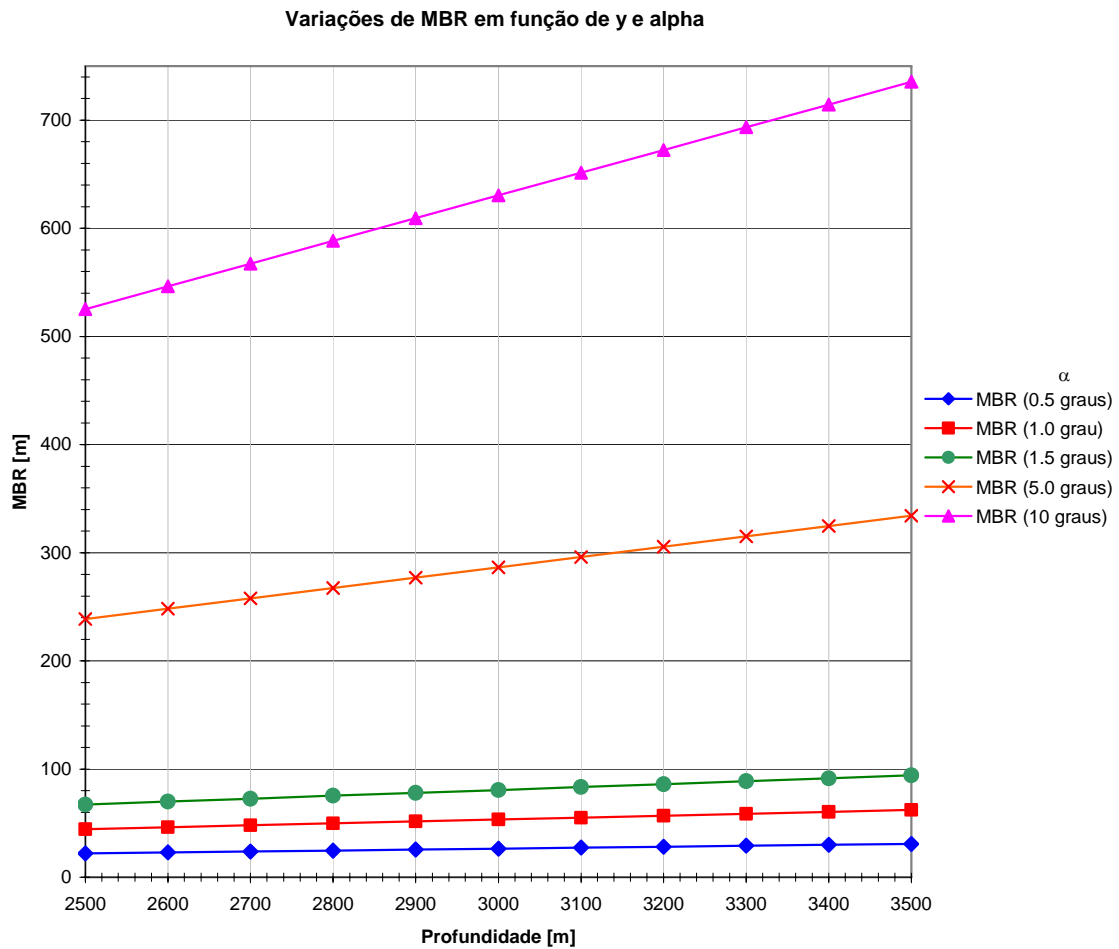


Figura 9 – Gráfico de variação de raio de curvatura em função do ângulo de topo

Nota-se o aumento linear do raio mínimo de curvatura com o aumento da profundidade. Na Figura 10, observa-se que o raio mínimo de curvatura não varia linearmente com o aumento do ângulo de topo.

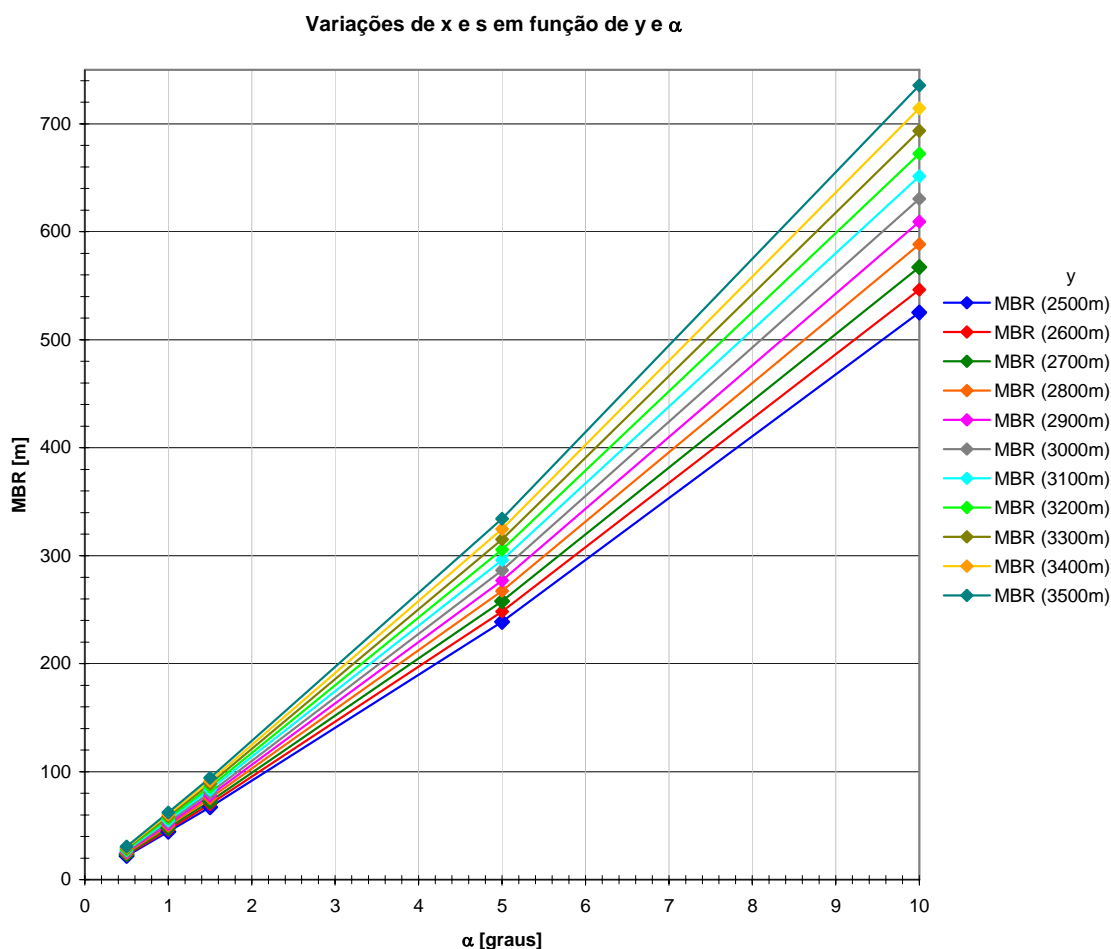


Figura 10 – Gráfico de variação de raio de curvatura em função da profundidade

Todos os parâmetros e gráficos acima foram determinados pela formulação analítica e estática da catenária. Para a obtenção de configurações que levem em consideração as propriedades reais dos dutos, três diferentes especificações são propostas e apresentadas na seção 2.3.

2.3 ANÁLISE GLOBAL DE DIFERENTES DUTOS

Com o objetivo de realizar avaliação mais precisa do comportamento dos dutos em águas ultraprofundas, foram realizadas simulações numéricas do comportamento de três diferentes dutos: um flexível de tecnologia tradicional, um duto rígido e um flexível de novos materiais, com o auxílio do software Orcaflex versão 8.3c. Este software é utilizado para modelagem estática e dinâmica de uma extensa variedade de sistemas

marítimos, além de ser o mais utilizado pela indústria “offshore” neste tipo de análise ref. [11].

Para a elaboração do modelo e posterior avaliação dos resultados dos três diferentes tipos de duto, as seguintes características foram consideradas:

Duto 1:

- Denominação: Flexível 6”
- Pressão de Projeto [psi]: 4300
- Diâmetro interno [m]: 0,152
- Diâmetro externo [m]: 0,379
- Peso linear, no ar, vazio [kg/m]: 158
- Rigidez à flexão em 3000m de profundidade [kN.mm²]: 184,56
- Rigidez Axial [kN]: 250000

Duto 2:

- Denominação: Novo flexível 6”
- Pressão de Projeto [psi]: 4300
- Diâmetro interno [m]: 0,152
- Diâmetro externo [m]: 0,321
- Peso linear, no ar, vazio [kg/m]: 101
- Rigidez à flexão em 3000m de profundidade [kN.mm²]: 180
- Rigidez Axial [kN]: 250000

Duto 3:

- Denominação: Rígido 6''
- Pressão de Projeto [psi]: 4300
- Diâmetro interno [m]: 0,143
- Diâmetro externo [m]: 0,174
- Peso linear, no ar, vazio [kg/m]: 50
- Rigidez à flexão em 3000m de profundidade [kN.mm²]: 3881
- Rigidez Axial [kN]: 1274000

A norma de dutos submarinos DNV-OS-F101, ref. [12], foi utilizada para determinar as características do duto rígido, realizando-se uma comparação pertinente entre dutos flexíveis e dutos rígidos, em aspectos relevantes à instalação. As equações de integridade estrutural de um duto rígido foram verificadas para o duto especificado. Dentre as verificações necessárias, a resistência ao colapso local deve ser satisfeita na fase de instalação. O apêndice A apresenta o procedimento de cálculo para verificação de colapso local. O valor de máxima curvatura no duto rígido, que não provoca seu colapso, é 0,005 para o duto com as características apresentadas.

2.3.1 Comparação dos resultados da análise com o Orcaflex

Após a simulação numérica, no Orcaflex, de uma série de configurações de catenária, os resultados foram comparados com os previamente obtidos por intermédio da formulação analítica. Nos gráficos da Figura 11 e da Figura 12 estão representados, respectivamente, o comprimento suspenso e a projeção horizontal das catenárias,

extraídos da simulação. Nos gráficos, “deep flex” representa o flexível de novas tecnologias.

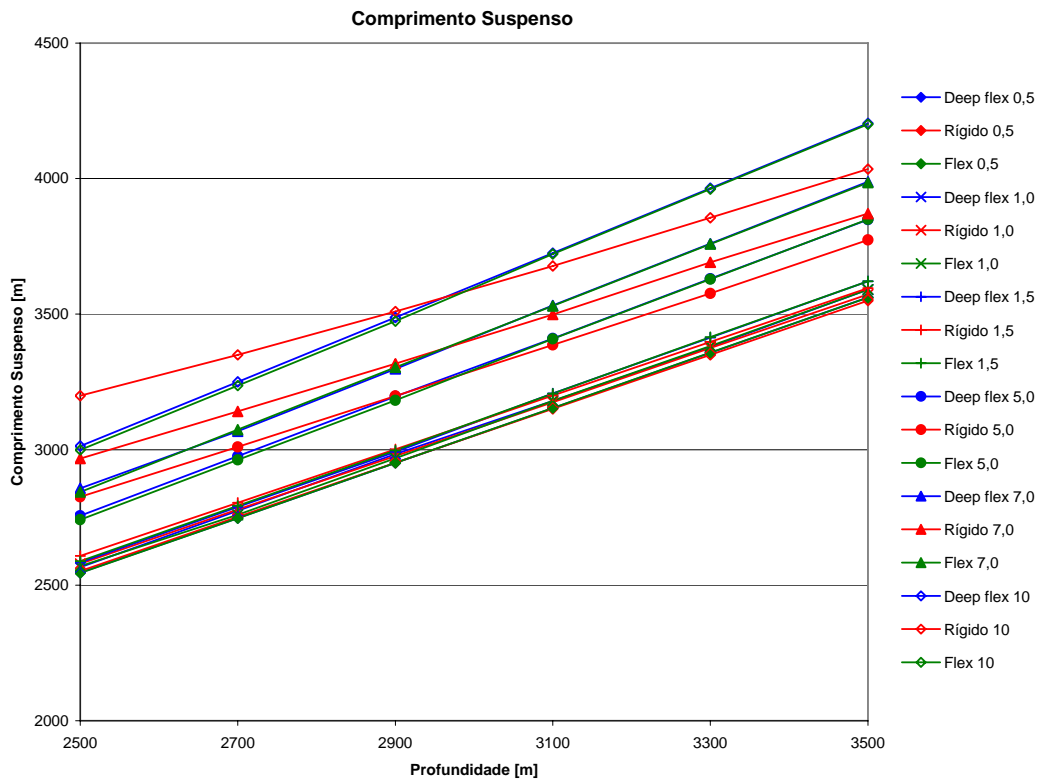


Figura 11 - Gráfico do comprimento suspenso para diferentes profundidades

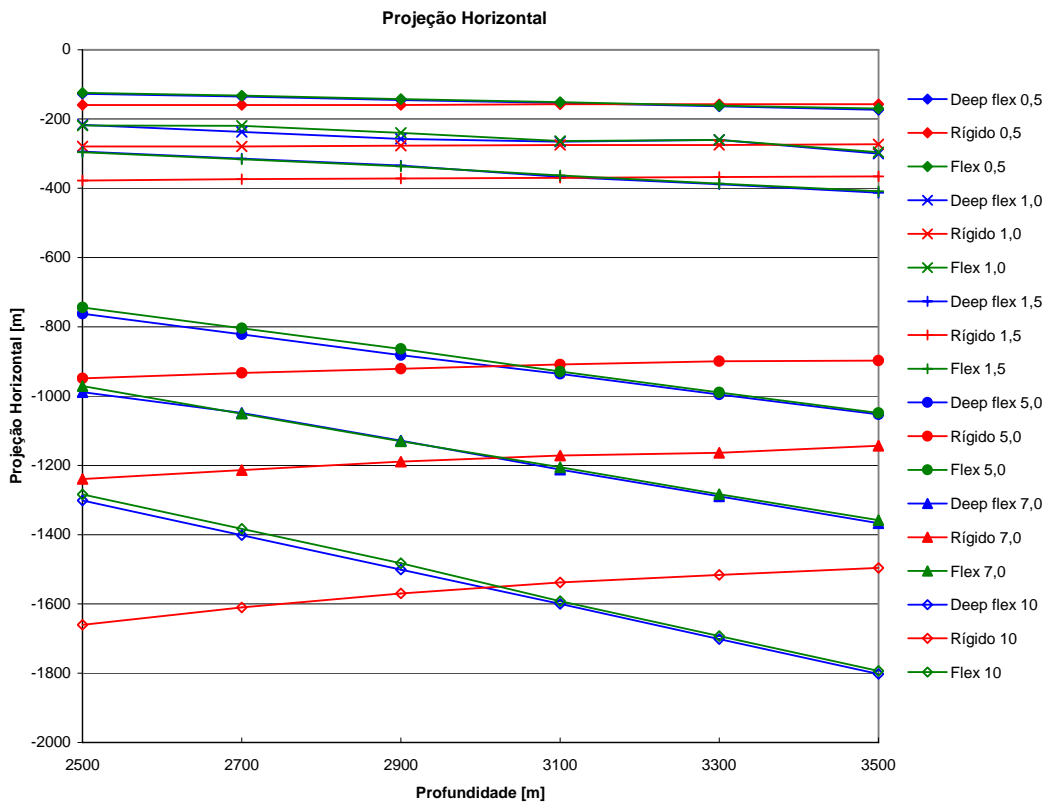


Figura 12 - Gráfico da projeção horizontal da catenária para diferentes profundidades

Comparando-se os gráficos da Figura 11 e da Figura 12, com os resultados da Figura 7, notam-se valores muito semelhantes, especialmente para os dutos flexíveis nas maiores profundidades. Como esperado, a formulação analítica pode ser utilizada em cenários de instalação de flexíveis em águas ultraprofundas.

Ainda na análise global, a determinação dos carregamentos e a avaliação do comportamento dinâmico do sistema são fundamentais e serão explanados nas seções 2.4 e 2.5.

2.4 CARREGAMENTOS

Durante a operação de lançamento, o duto é submetido a uma série de esforços provenientes de seu próprio peso, de sua configuração de catenária e da pressão de aperto dos “tensionadores”, além de efeitos de correntezas, da pressão externa devido à profundidade, movimentos do navio de instalação e da conseqüente força de contato entre o duto e o leito marinho.

A pressão externa imposta pela coluna d’água é determinante no projeto do duto. A integridade do mesmo deve ser garantida para a profundidade de instalação e operação.

2.4.1 Carregamentos ambientais:

Ventos, correntezas e ondas são fatores que devem ser considerados durante a análise. Como se trata de um duto submarino, o efeito direto do vento sobre o duto deve ser desconsiderado. Porém tal afirmação não pode ser feita a respeito do efeito das correntezas e das ondas.

O vento é uma variável muito importante na avaliação do comportamento do sistema flutuante que estará sustentando o duto, seja este uma plataforma, navio de lançamento ou mesmo uma monobóia. Já que a abordagem deste trabalho refere-se à

instalação, o navio de lançamento deve ser capaz de manter seu posicionamento sob pré-determinadas velocidades do vento.

O vento afeta o comportamento da corrente superficial. A camada em que ocorre influência direta da ação do vento tem uma determinada profundidade. Esta profundidade, denominada Camada de Ekman, varia, aproximadamente, entre 10 e 150 metros nos oceanos. Abaixo da superfície, a velocidade da corrente, devido à ação do vento, decai exponencialmente.

O perfil de velocidade e direção da corrente ao longo da profundidade é afetado por efeitos de circulação oceânica, que é provocada por diversos fatores.

2.5 COMPORTAMENTO DINÂMICO

O efeito das ondas nos sistemas oceânicos flutuantes gera movimentos nos dutos. Um sistema flutuante possui seis graus de liberdade, ilustrados na Figura 13:

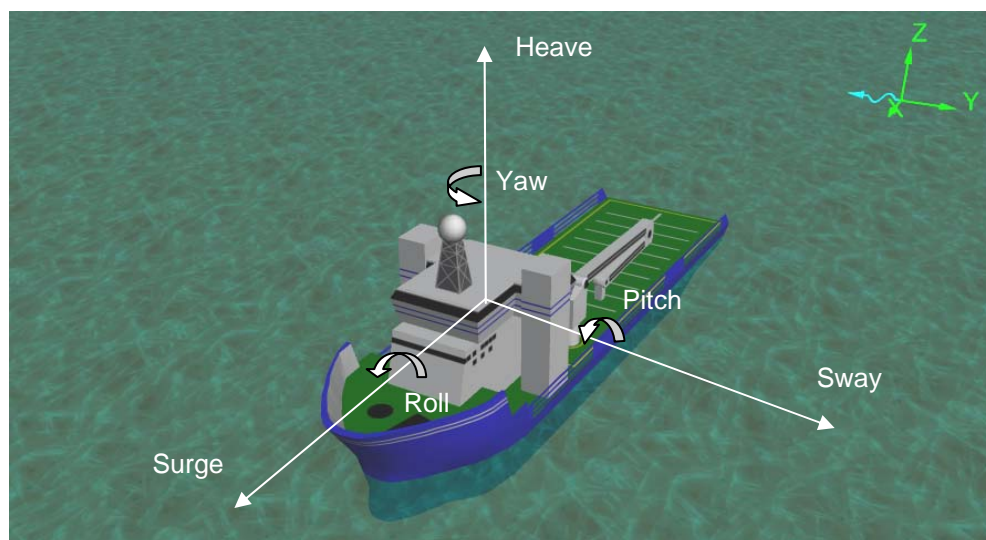


Figura 13 – Representação gráfica dos seis graus de liberdade de um SFO

Os movimentos de um SFO, excitado por ondas, são definidos pelo RAO deste sistema. A sigla RAO significa “Response Amplitude Operator”, e se trata de um par de

números que define a resposta de um grau de liberdade do sistema flutuante para uma determinada onda de direção e período conhecidos. O primeiro número deste par relaciona a amplitude do sistema flutuante à amplitude da onda. Já o segundo, chamado de fase, define a defasagem do movimento do sistema em relação à onda.

Cada SFO possui uma tabela de informações que contempla a relação de seus seis graus de liberdade com a amplitude da onda e suas respectivas fases. O RAO varia com o calado e movimento do SFO, com a direção de incidência e com o período da onda.

Matematicamente, o movimento é equacionado da seguinte forma:

$$z = R.A.\cos (wt - \phi)$$

onde

z = deslocamento do SFO (em unidades de comprimento para surge, sway, heave, e em graus para roll, pitch, yaw);

A = amplitude da onda (em unidade de comprimento)

w = frequência (em radianos/segundos)

t = tempo (em segundos)

R, ϕ são as amplitudes e fases do RAO.

A correta definição de direção e sentido do RAO é muito importante para garantir a confiabilidade nos resultados obtidos. O comportamento de um SFO, quando excitado, depende de uma série de fatores, como forma do mesmo, distribuição de peso, posição do centro de gravidade etc. O RAO de um SFO deve ser avaliado para que uma melhor compreensão da resposta a uma determinada excitação, seja obtida.

Em função dos movimentos da embarcação, o fator de amplificação dinâmica varia, dependendo também da direção de incidência da onda, seu período, e a localização do ponto de sustentação da carga do duto.

As análises que geraram os resultados indicados nos gráficos das Figura 14 e Figura 15 foram realizadas com espectro regular de ondas de $H = 2\text{m}$, com o intuito de avaliar a variação carga de um determinado corpo localizado em diferentes posições do navio. Nos gráficos, esta variação está representada pelo FAD, que é a razão entre a máxima carga dinâmica e a carga estática do corpo.

A Figura 14 apresenta o comportamento de um navio de lançamento de dutos rígidos. As abreviações CT, PS, SB significam que o corpo está localizado no centro, em bombordo e em boreste, respectivamente.

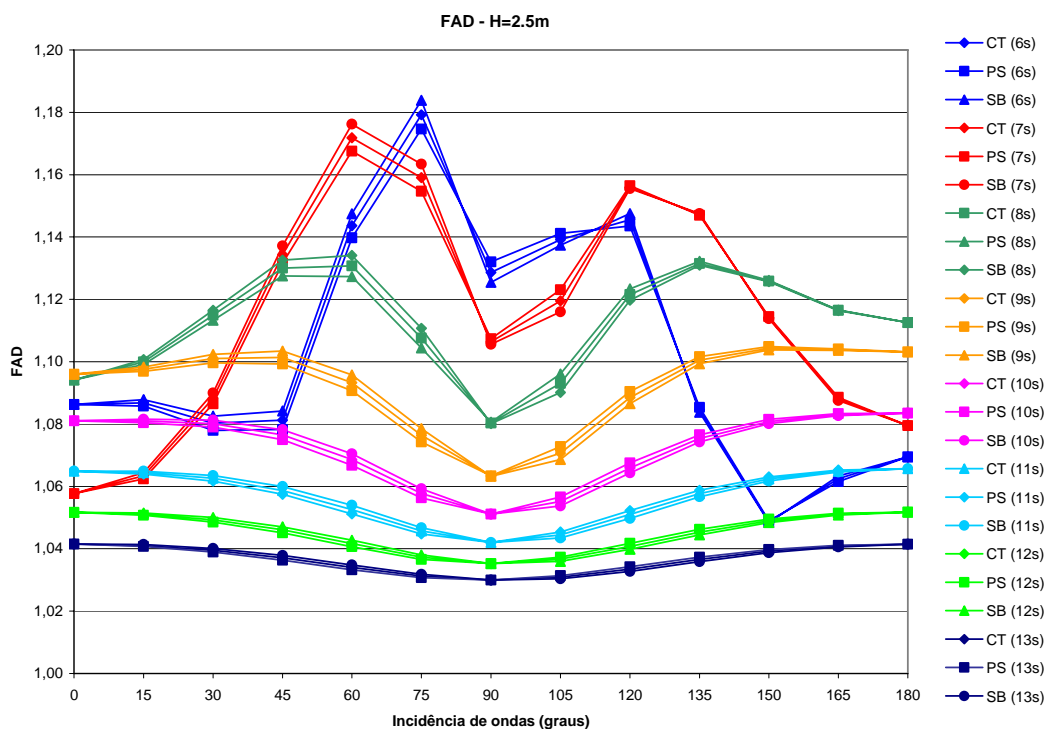


Figura 14 – Gráfico do FAD da carga de um corpo em um navio de rígidos em função do ângulo de incidência das ondas

A Figura 15 apresenta o comportamento de um navio de lançamento de dutos flexíveis.

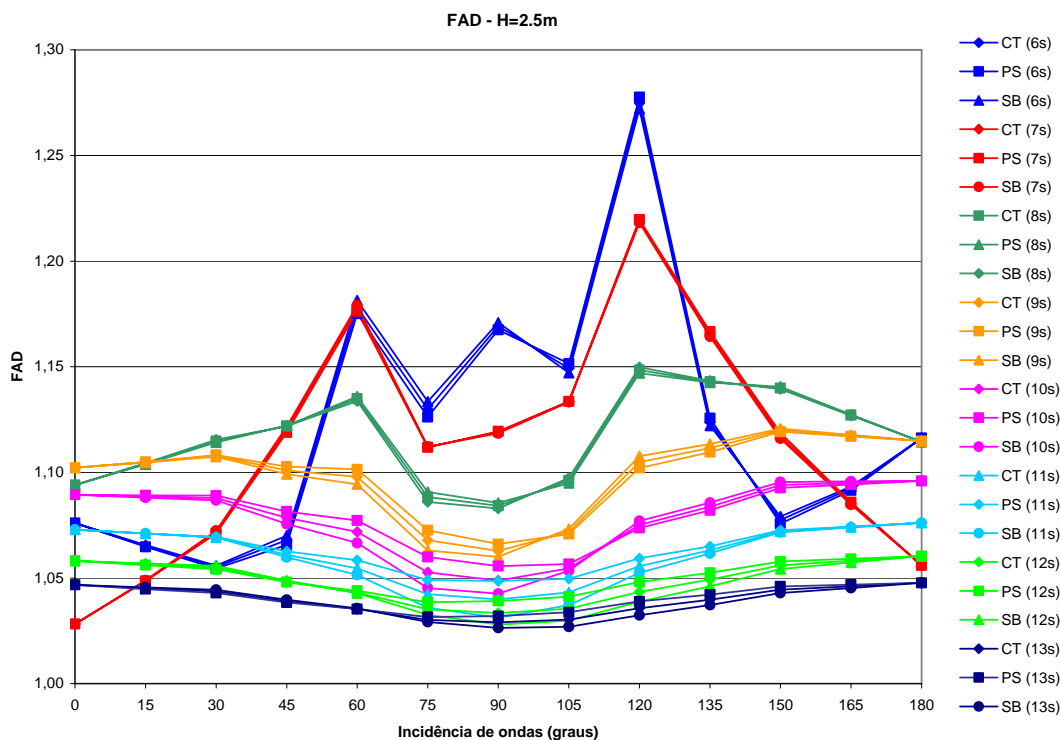


Figura 15 - Gráfico do FAD da carga de um corpo em um navio de flexíveis em função do ângulo de incidência das ondas

Avaliando os gráficos, nota-se nitidamente a variação da amplificação dinâmica em função da direção de incidência e do período da onda, conforme mencionado anteriormente. A diferença de comportamento entre as embarcações é também claramente verificada. A partir destas análises, é possível determinar quais são os períodos e incidências críticos para uma determinada embarcação, permitindo um estudo mais criterioso e ágil das condições críticas de instalação.

Um parâmetro que é desconsiderado nas análises acima é o efeito promovido pela catenária, que não está modelada no sistema. Para mensurar esta contribuição na dinâmica de um sistema de lançamento em águas ultraprofundas, foram realizadas diferentes simulações numéricas, estando os resultados apresentados em seqüência crescente de ângulo de topo, conforme os seguintes gráficos: Figura 16, Figura 17, Figura 18, Figura 19, Figura 20 e Figura 21, para ângulos de topo de 0,5°, 1,0°, 1,5°, 5°, 7° e 10° respectivamente.

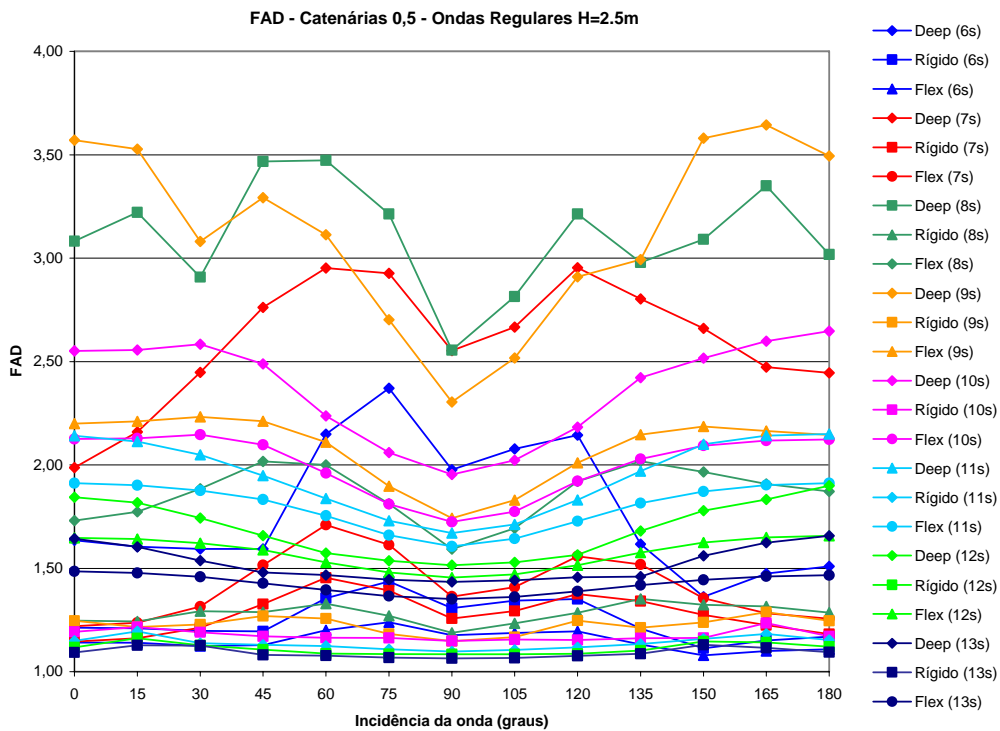


Figura 16 – Gráfico do FAD da tração de topo da catenária em função do ângulo de incidência das ondas com a catenária de meio grau conectada ao navio

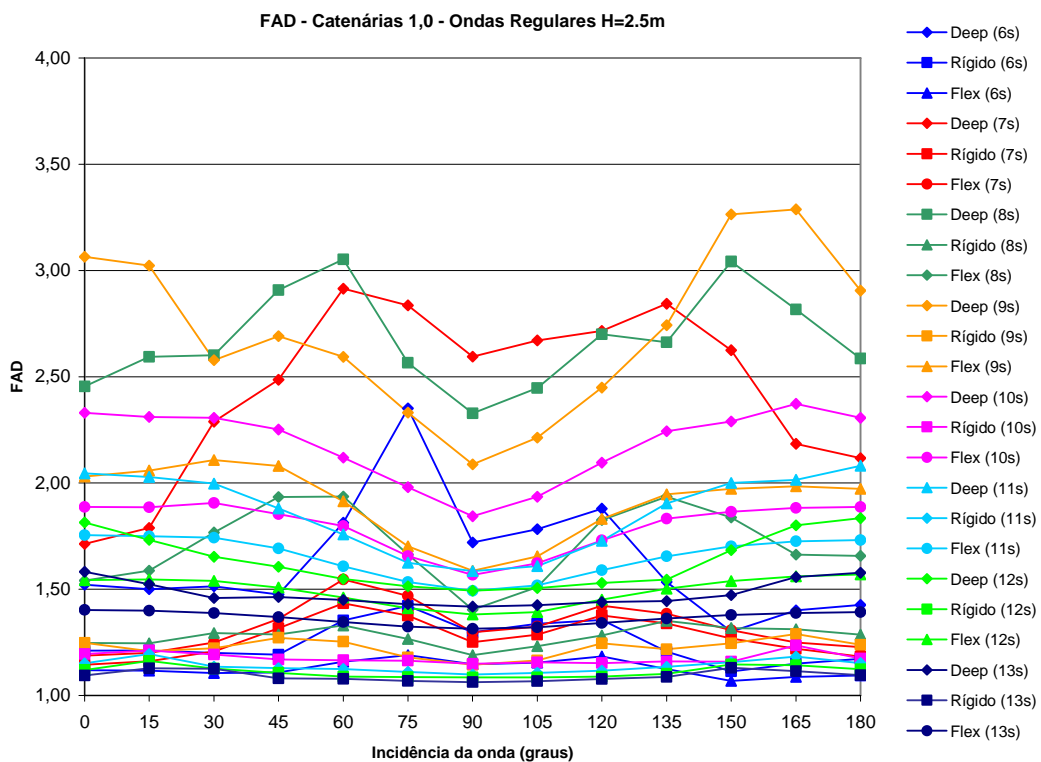


Figura 17 - Gráfico do FAD da tração de topo da catenária em função do ângulo de incidência das ondas com a catenária de um grau conectada ao navio

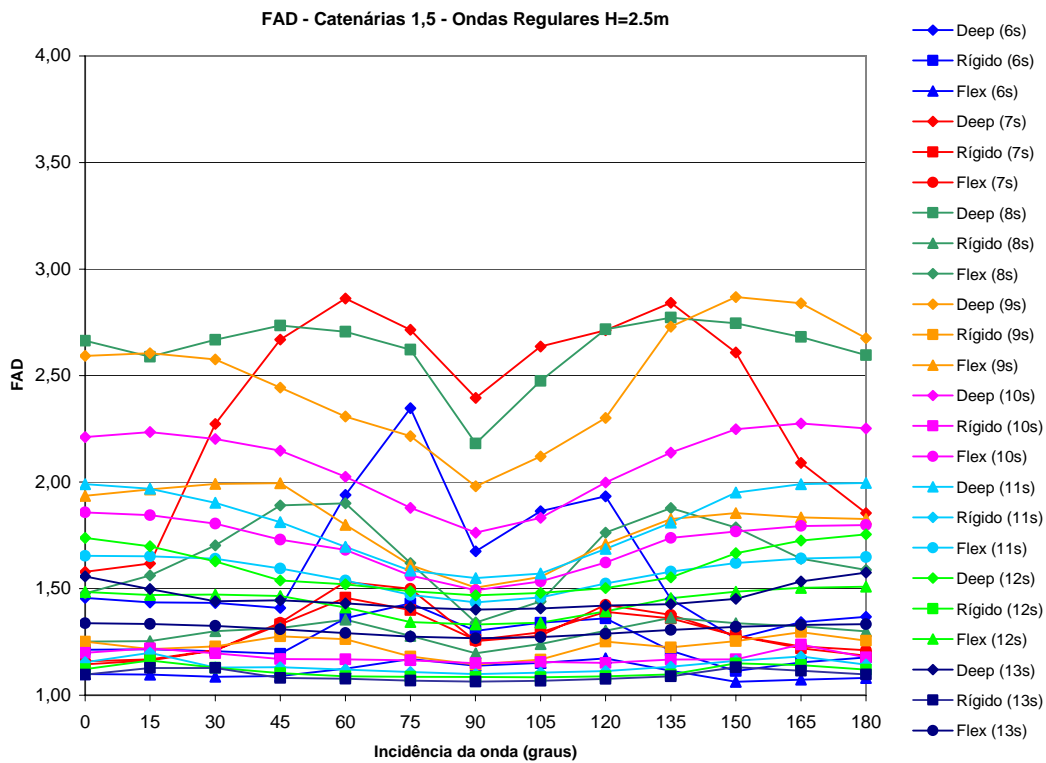


Figura 18- Gráfico do FAD da tração de topo da catenária em função do ângulo de incidência das ondas com a catenária de 1,5 graus conectada ao navio

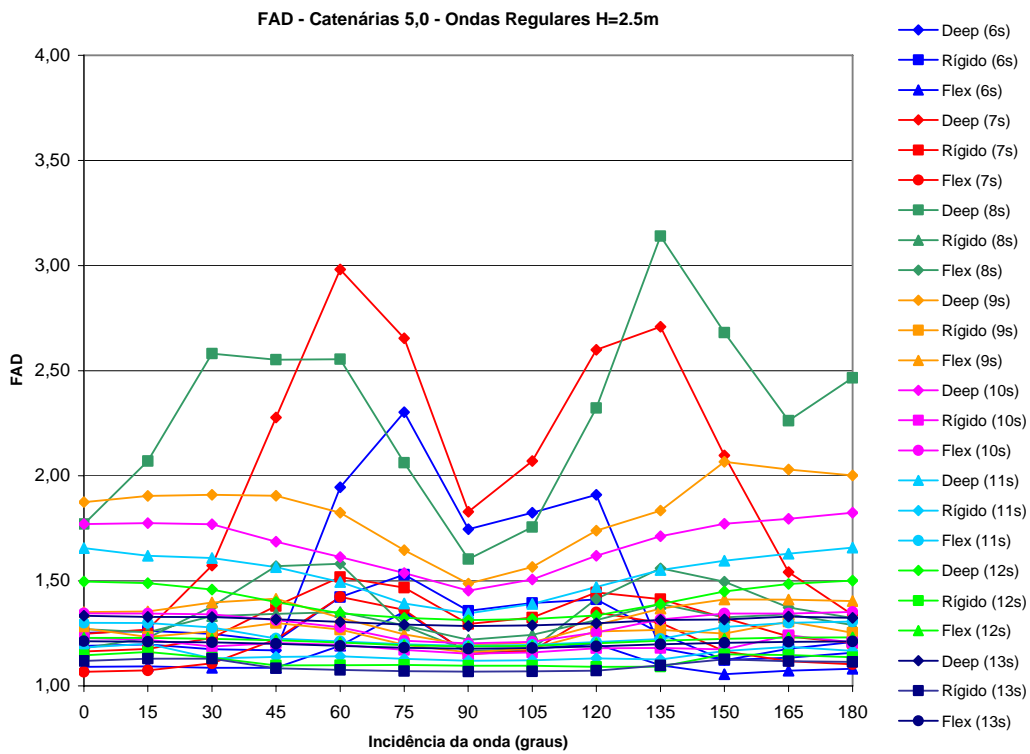


Figura 19 - Gráfico do FAD da tração de topo da catenária em função do ângulo de incidência das ondas com a catenária de cinco graus conectada ao navio

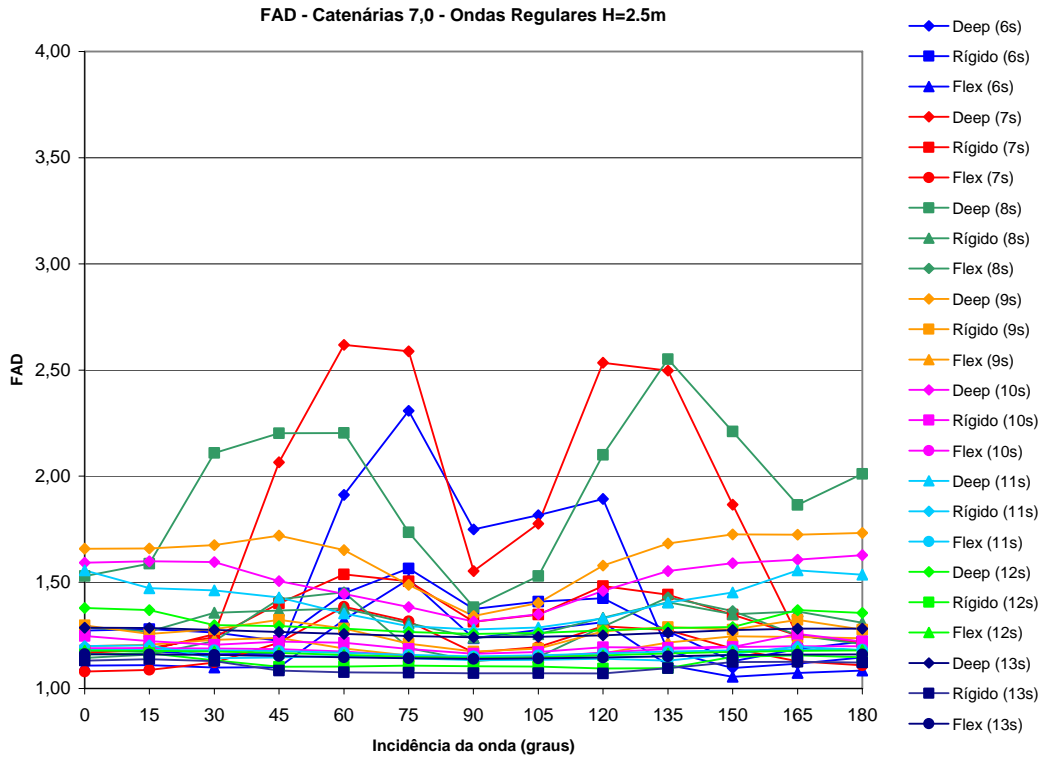


Figura 20 - Gráfico do FAD da tração de topo da catenária em função do ângulo de incidência das ondas com a catenária de sete graus conectada ao navio

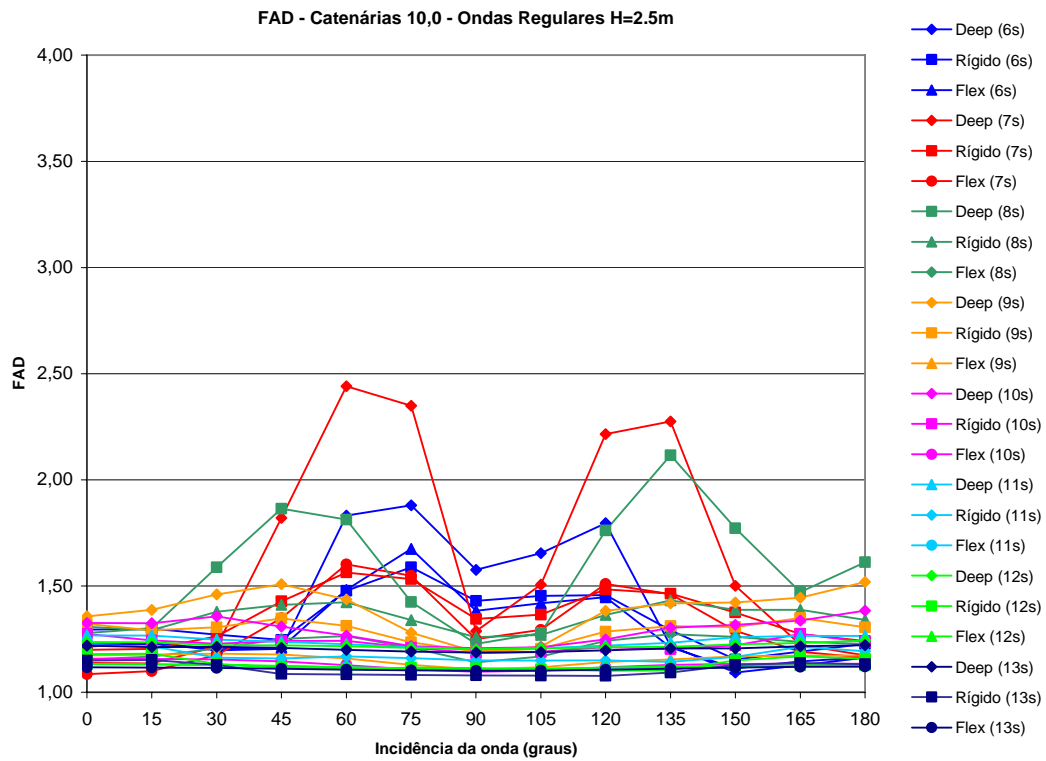


Figura 21 - Gráfico do FAD da tração de topo da catenária em função do ângulo de incidência das ondas com a catenária de sete graus conectada ao navio

O efeito de arrasto da catenária e a razão peso na água sobre peso no ar são determinantes para uma diferença brusca nos resultados de amplificação dinâmica. Quanto menor é a gravidade específica do duto (ou seja, a divisão peso na água pelo peso no ar), maior é a amplificação no valor da tração de topo.

Através de estudo minucioso dos gráficos, verifica-se uma diminuição dos valores de amplificação dinâmica para maiores ângulos de topo. A explicação para este fato está na configuração da seção da catenária. Para ângulos menores, o navio suspende mais duto do fundo em menor tempo. Este efeito é mais determinante na amplificação dinâmica que o efeito de arrasto. Este último aumenta quanto maior for o ângulo de topo.

Após a determinação das condições críticas de desempenho dinâmico, uma modelagem espectral mais adequada é realizada. O intuito é estabelecer uma relação direta entre os resultados obtidos pelas análises e os valores obtidos no campo, através da comparação do estado do espectro de onda utilizado nas análises e a condição de mar encontrada no campo.

As análises dinâmicas incluem os aspectos ambientais, que comumente são retirados de uma coleta de dados previamente realizada no campo, onde dar-se-á a operação de lançamento. Esta coleta de dados compilada é normalmente denominada “Metocean Data” e apresenta informações inerentes à condição de mar, correnteza, vento, densidade da água e outros fatores de uma região, permitindo a simulação de um lançamento em diferentes condições ambientais.

Nas análises dinâmicas, foram adotadas premissas ambientais relativas à condição de mar, através da formulação JONSWAP. Esta formulação baseia-se em uma coleta de dados de ondas do programa Join North Sea Wave Project, realizado entre 1968 e 1969,

ref. [13]. O espectro representa mares com pista limitada, sendo dados de entrada a velocidade do vento e o comprimento da pista. A equação original de JONSWAP é:

$$S(f) = \alpha \cdot \frac{g^2}{(2\pi)^4} \cdot \frac{1}{f^5} \cdot \exp\left[\frac{-5}{4} \left(\frac{f}{f_m}\right)^{-4}\right] \gamma \exp\left[\frac{-(f-f_m)^2}{2(\sigma \cdot f_m)^2}\right]$$

onde:

$$\gamma = 3,3 \text{ (em média)}$$

$$\alpha = 0,076F^{-0,22}$$

$$f_m = 3,5 \left(\frac{g}{U}\right) F^{-0,33}$$

$$\sigma = \sigma_a = 0,07 \text{ para } f \leq f_m$$

$$\sigma_b = 0,09 \text{ para } f > f_m$$

$$F = \text{pista adimensional} = g \cdot \frac{F}{U^2};$$

F = comprimento da pista;

U = velocidade do vento a 10m de altura;

g = constante gravitacional

Nota: α e f_m são parâmetros de escala do espectro de ondas funções do tamanho da pista; γ é chamado de parâmetro de picosidade, que representa a razão entre a energia espectral máxima e a energia correspondente do espectro de Pierson-Moskowitz.

A formulação de JONSWAP pode ser alterada em função de características específicas de uma região. Para as análises globais deste trabalho, os parâmetros adotados para definição do espectro de onda foram:

$$\gamma = 2,525699462;$$

$$\alpha = 0,003418319;$$

$$\sigma_a = 0,07;$$

$$\sigma_b = 0,09;$$

$$T_p = 8,12s.$$

Esses valores geram um espectro de $H_s = 2m$ e $T_z = 6,21s$.

2.6 RESULTADOS DA ANÁLISE GLOBAL

Os valores de carga de topo, carga horizontal no TDP, comprimento suspenso, projeção horizontal da catenária, máxima curvatura, máximo momento fletor e demais parâmetros, são apresentados nos gráficos das figuras 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29 e 30.

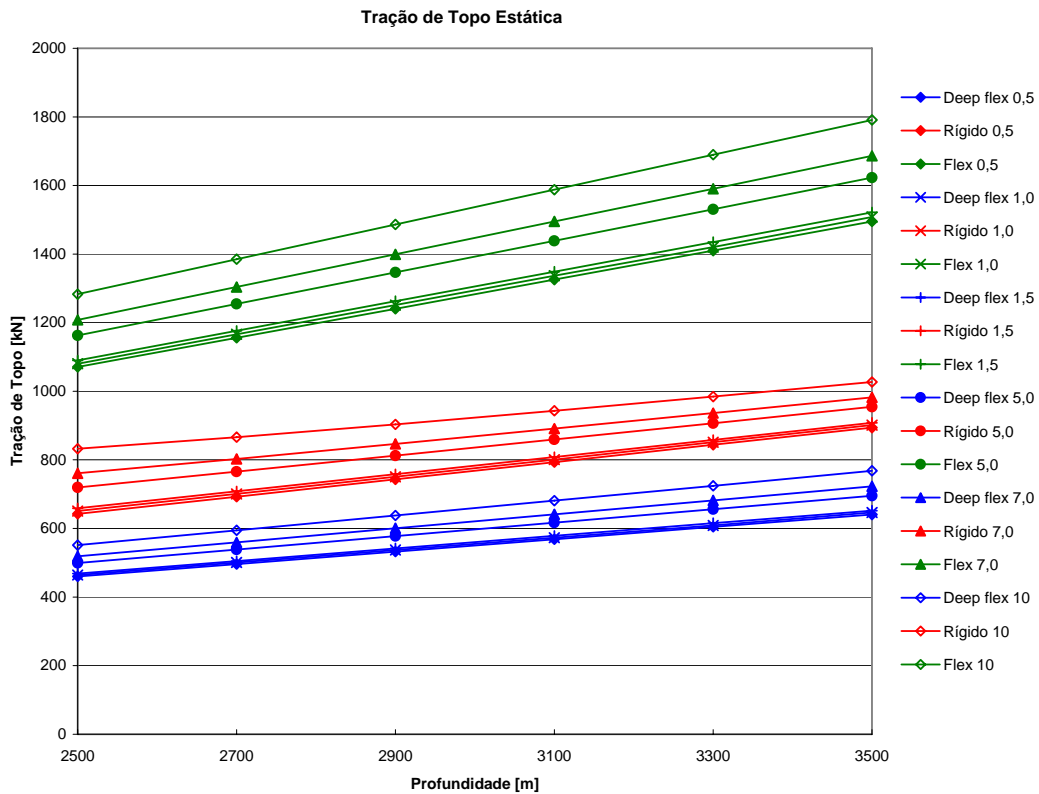


Figura 22 - Gráfico da Tração de topo estática para diferentes profundidades

Como esperado, os valores de tração de topo estáticos aumentam com a profundidade. Ao utilizar o mesmo cenário para uma comparação entre as três tecnologias de dutos, tem-se, por exemplo, para 3000m de profundidade e ângulo de topo de cinco graus, os seguintes resultados:

Tabela 2 – Resultados para 3000m de profundidade e ângulo de topo de cinco graus

Dutos	Tração Estática de Topo	Diferença percentual
Flexível:	1390 kN	NA
Flexível novo:	600 kN	-56,8%
Rígido:	830 kN	-40,2%

A redução da tração estática de topo, através do uso do novo flexível, é notória, conforme tabela 2.

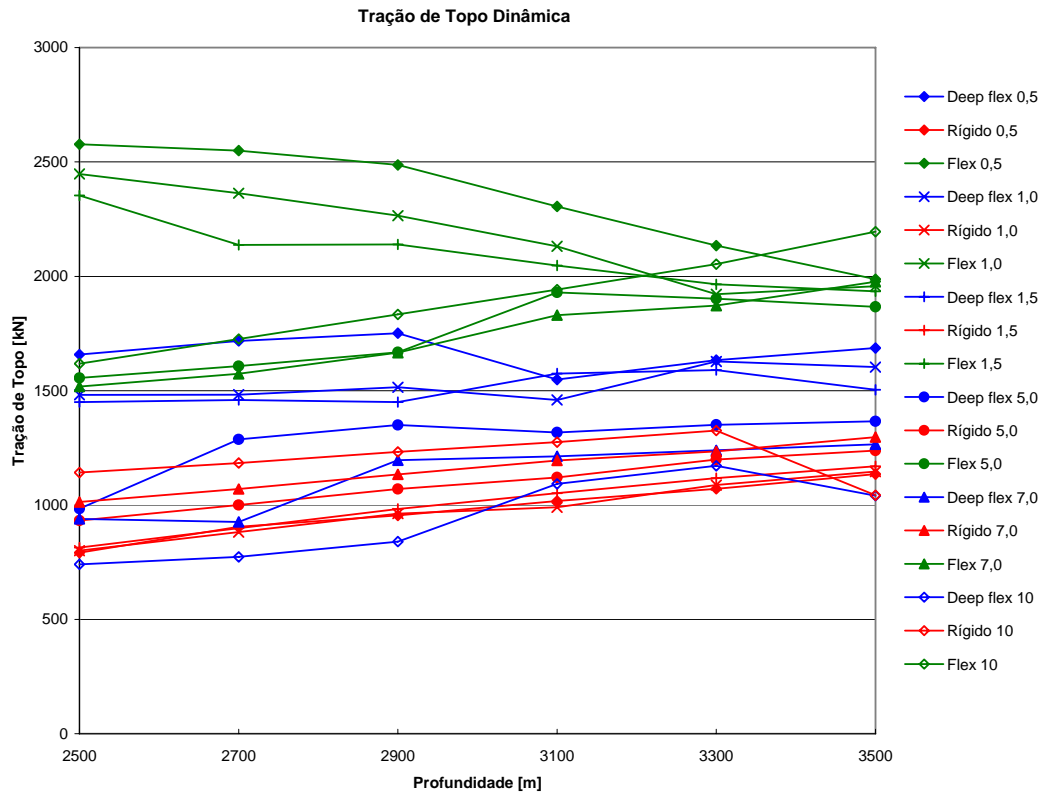


Figura 23 - Gráfico da Tração de topo dinâmica para diferentes profundidades

Um comportamento interessante pode ser observado no gráfico acima: para a estrutura do duto flexível convencional, em ângulos de topo crescentes, os valores de tração de topo dinâmicos diminuem com o aumento da profundidade. Esta tendência é explicada pela aproximação da frequência natural do sistema da frequência de excitação. Esta afirmação pode ser verificada analisando dois pontos distintos do gráfico da figura 23, nas profundidades de 2900m e 3100m para o ângulo de lançamento de 0,5 graus. Conforme observado no software de simulação, enquanto a densidade espectral da tração de topo do duto rígido aumenta para a mesma frequência de excitação, a densidade espectral da tração de topo do duto flexível diminui.

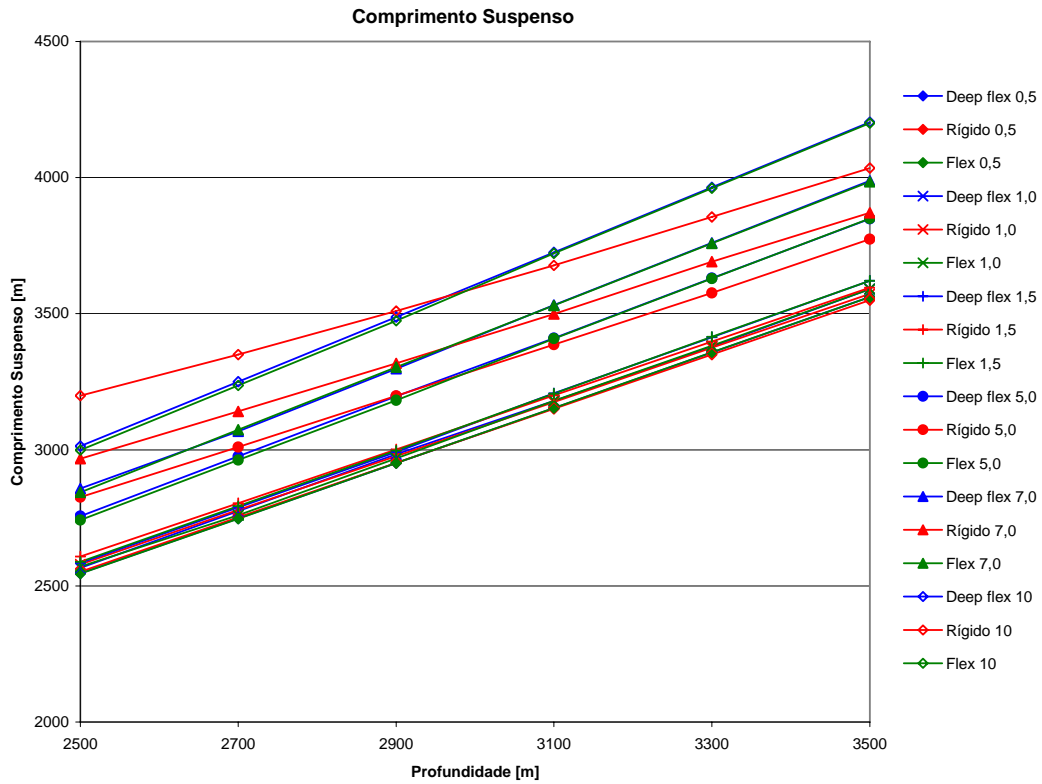


Figura 24 - Gráfico do comprimento suspenso da catenária para diferentes profundidades

Na figura 24, o comprimento de diversas configurações de catenária é apresentado. Logicamente, o comprimento suspenso cresce com o aumento da profundidade e com o incremento do ângulo de topo. É interessante observar o cruzamento entre as linhas que representam diferentes dutos, demonstrando que a rigidez à flexão altera significativamente a forma da catenária.

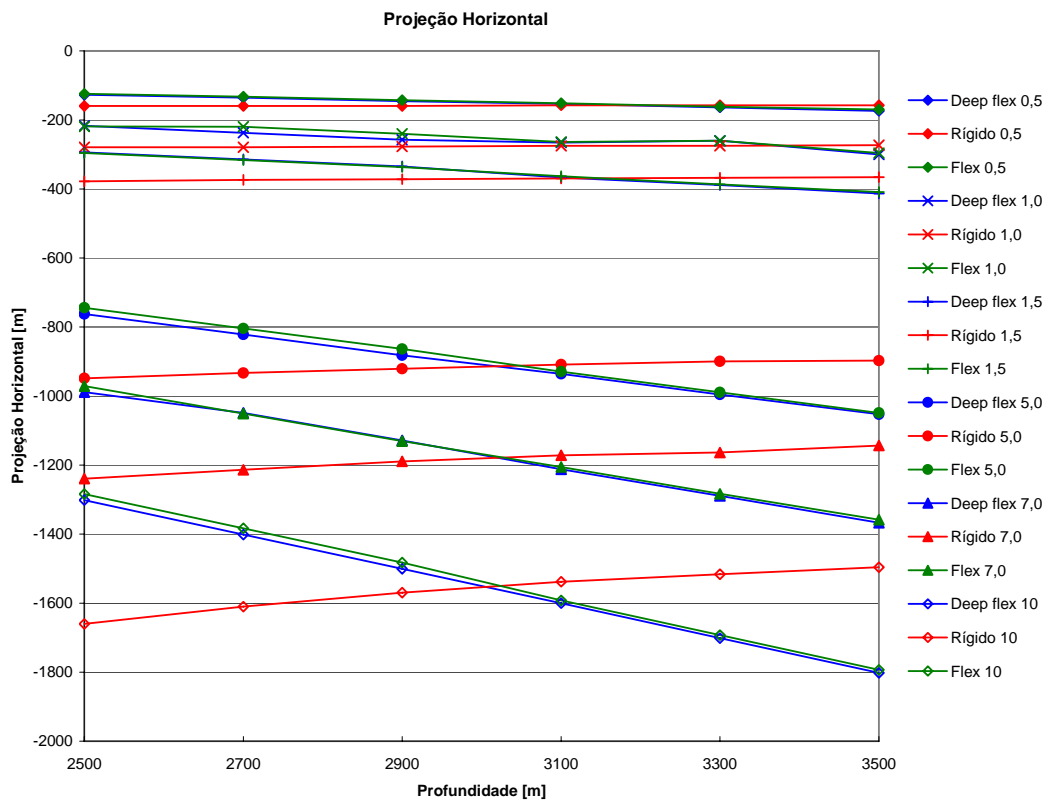


Figura 25 - Gráfico da projeção horizontal da catenária para diferentes profundidades

Já na figura 25, os valores de projeção horizontal das catenárias indicam que o sistema de monitoramento do TDP deve ser adequado para atingir distâncias de até 1800m, seja através de ROV ou de uma embarcação de suporte.

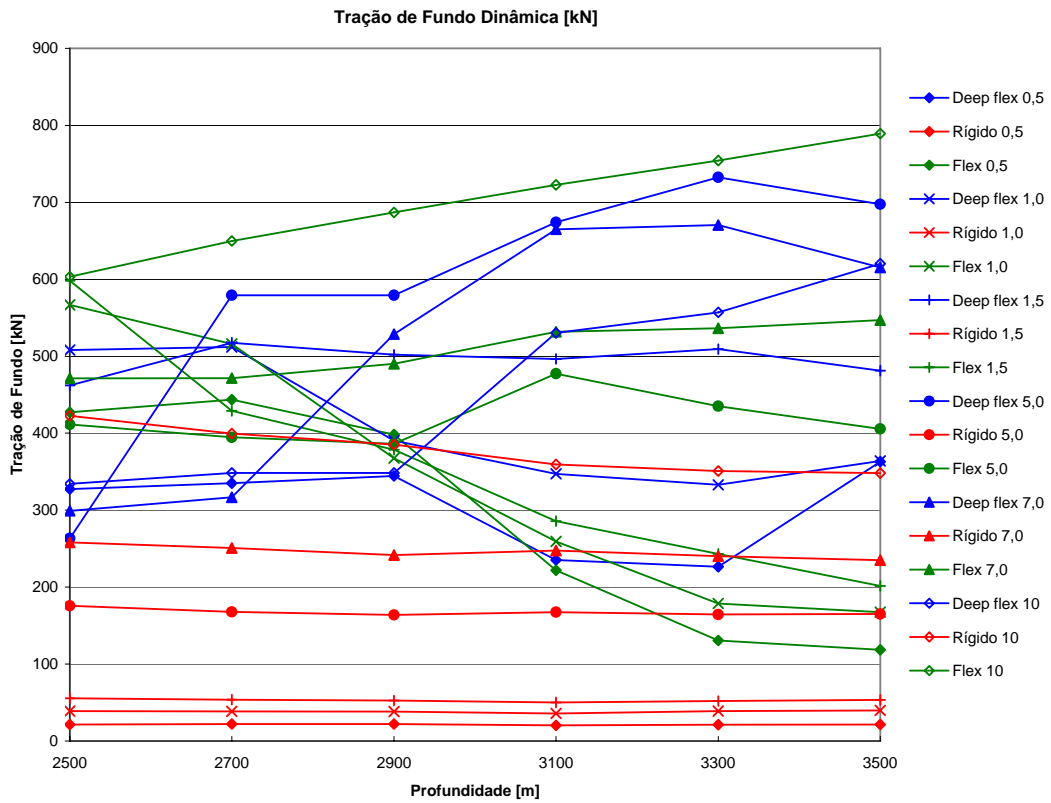


Figura 26 - Gráfico da tração de fundo dinâmica para diferentes profundidades

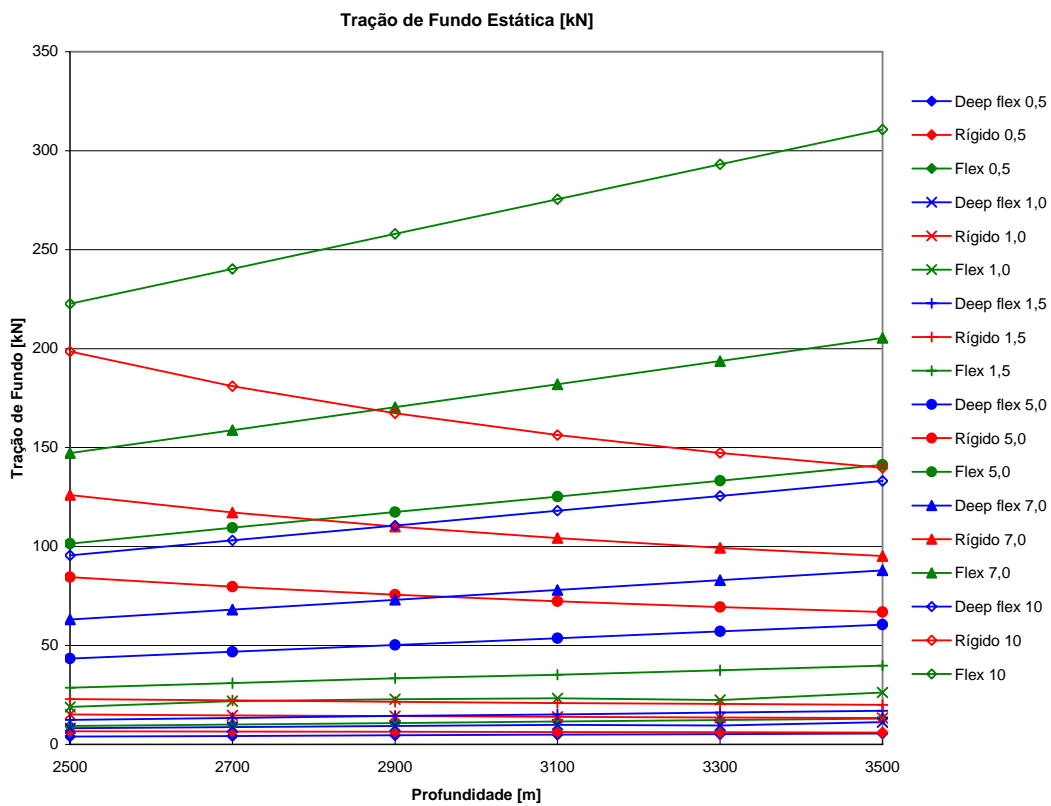


Figura 27 - Gráfico da tração de fundo estática para diferentes profundidades

Os gráficos das figuras 26 e 27 apresentam os valores de tração no TDP para cada configuração. Nos valores estáticos observam-se trações de até 30ton, enquanto nos dinâmicos o valor máximo é de 80ton. Estes resultados salientam a importância do projeto de um sistema de propulsão e posicionamento dinâmico adequado para cargas elevadas.

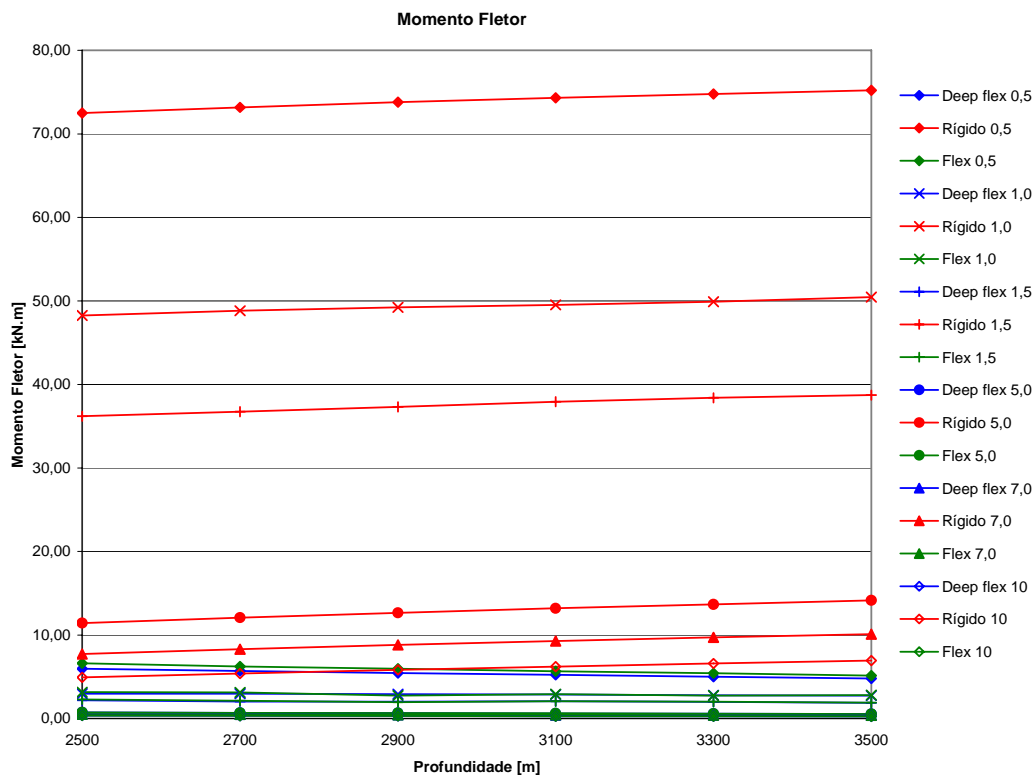


Figura 28 - Gráfico do momento fletor para diferentes profundidades

Os valores indicados na figura 28 são mais importantes na avaliação estrutural do rígido, já que o valor do momento fletor, combinado à tração e às pressões externa e interna, resulta na tensão no duto. O mesmo não pode ser dito para o flexível, visto que sua camada intertravada é projetada para permitir o dobramento do duto. Na análise do flexível, o raio de curvatura, a máxima pressão interna e externa e a máxima tração podem ser considerados como condições limitantes isoladas.

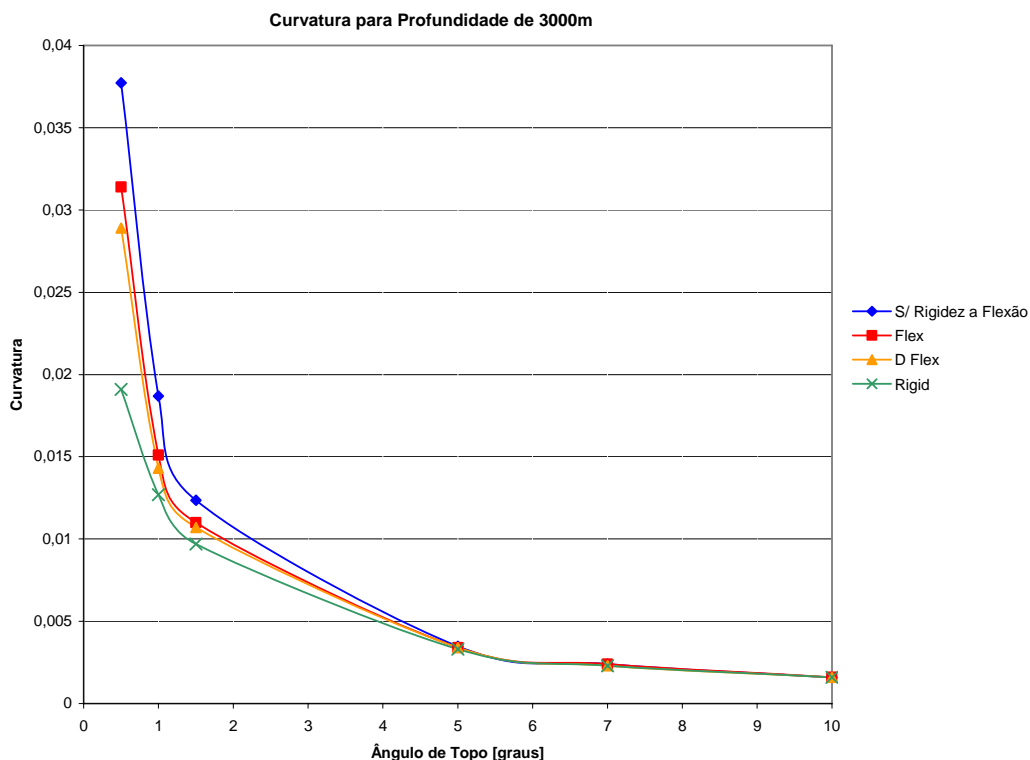


Figura 29 – Curvatura de diferentes dutos para 3000m e diferentes ângulos de topo

Os resultados apresentados na figura 29 demonstram a impossibilidade de instalação do duto rígido em ângulos de topo menores que cinco graus em 3000m de profundidade. Esta limitação está associada à deformação máxima permitida na região do “sagbend”, que não pode ser maior que 0,005, conforme mencionado na seção 2.3 e no apêndice A, que contempla o cálculo de resistência ao colapso local.

Portanto, todos os cenários de instalação de dutos rígidos com ângulos de topo inferiores a cinco graus, não são viáveis. Mudanças nas propriedades dos dutos, como, por exemplo, o aumento do limite de escoamento através da utilização de outro material, podem tornar possíveis estas outras condições de instalação.

O gráfico da figura 30 apresenta a variação do mínimo raio de curvatura para diferentes ângulos de topo, com o aumento da profundidade.

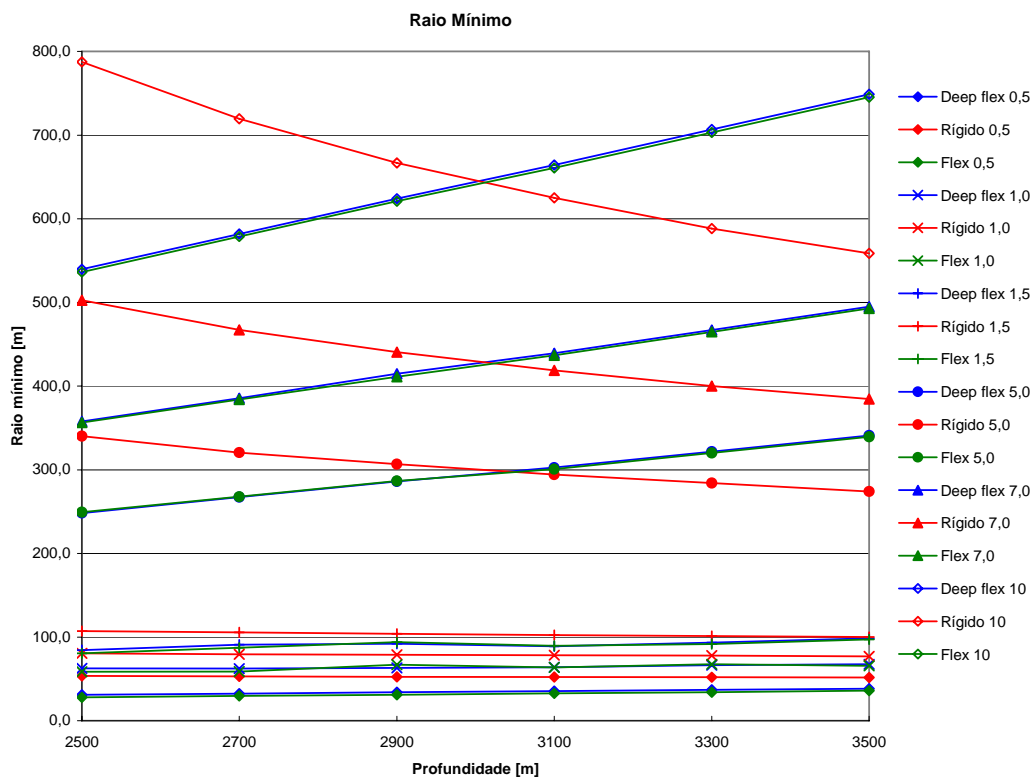


Figura 30 – Raio mínimo de diferentes dutos para 3000m e diferentes ângulos de topo

Os valores de raio mínimo obtidos não são restrições para a instalação dos flexíveis. O MBR destes dutos independe da profundidade de sua aplicação. Já no caso do duto rígido, quanto maior a pressão externa, menor é o raio de curvatura para não provocar colapso.

2.7 CONCLUSÕES DAS ANÁLISES GLOBAIS

As avaliações globais demonstram os parâmetros de instalação de dutos em águas ultraprofundas. Ao comparar os resultados entre a formulação analítica, e as análises estáticas em Orcaflex para os flexíveis, nota-se que estes são bem similares. Logo, para

determinação de configurações estáticas de dutos flexíveis, a formulação analítica pode ser utilizada como premissa para cálculos de catenária.

Quando a rigidez a flexão é similar à dos dutos rígidos, os resultados diferem significativamente. A forma da catenária apresenta resultados completamente diferentes, comprovando, portanto, a necessidade de avaliação das configurações em softwares específicos.

Durante as análises dinâmicas com o espectro de ondas JONSWAP, os resultados demonstraram a importância da relação peso do duto na água, seu comprimento e sua elasticidade. Estes valores podem determinar uma frequência natural do sistema próxima à frequência de excitação. Nos casos investigados, o flexível convencional apresentou elevados valores de amplificação diante de sua baixa densidade específica. Este parâmetro deve ser cuidadosamente verificado na seleção de dutos flexíveis de novas tecnologias construtivas.

Os resultados de amplificação dinâmica dos pontos nos navios, sem a inclusão de catenárias, podem ser usados como indicadores do comportamento mais desfavorável da embarcação isoladamente, mas é essencial a modelagem com a catenária para obtenção de valores dinâmicos que representem o comportamento do sistema completo. Sem a catenária, efeitos de massa adicional e de arrasto são desconsiderados, o que acarreta uma grande discrepância nas amplificações.

Os valores dinâmicos de carga de topo para dutos flexíveis de novas tecnologias, maiores em 3500m do que em 2500m, representam um interessante aspecto nas futuras avaliações de instalação em águas ultraprofundas. A frequência de excitação pode estar mais próxima da frequência natural do sistema em águas mais rasas, provocando

maiores carregamentos do que os obtidos em águas mais profundas. Isto indica que o ponto crítico de carga de instalação não está sempre no trecho mais profundo da rota. Diferentes configurações de ângulo de topo mudam bruscamente os resultados de amplificação dinâmica para os novos flexíveis, como pode ser constatado nos gráficos de tração dinâmica de topo.

Nota-se ainda, que para a instalação de dutos nas profundidades investigadas, os SFOs devem possuir um sistema de lançamento com capacidade de sustentação de valores altos de carga. Mesmo na instalação de um flexível vazio de novas tecnologias, o valor de carga dinâmica ultrapassa 250ton. Além disso, cargas horizontais de até 80ton solicitam o sistema de propulsão das embarcações, assim como projeções horizontais de até 1800m indicam a necessidade de um navio de suporte para monitoramento do TDP.

3 ESTUDO DE CASO

O cenário abordado neste capítulo, escolhido como estudo de caso, demonstra que a indústria de exploração offshore de petróleo está diante da necessidade de adequação de seus equipamentos e processos aos desafios impostos pela instalação em águas ultraprofundas, com lâminas d'água em torno de 3000m.

Para o entendimento da localização desta nova fronteira de exploração, a Figura 31 mostra os campos de exploração de petróleo da Bacia de Campos e suas profundidades.

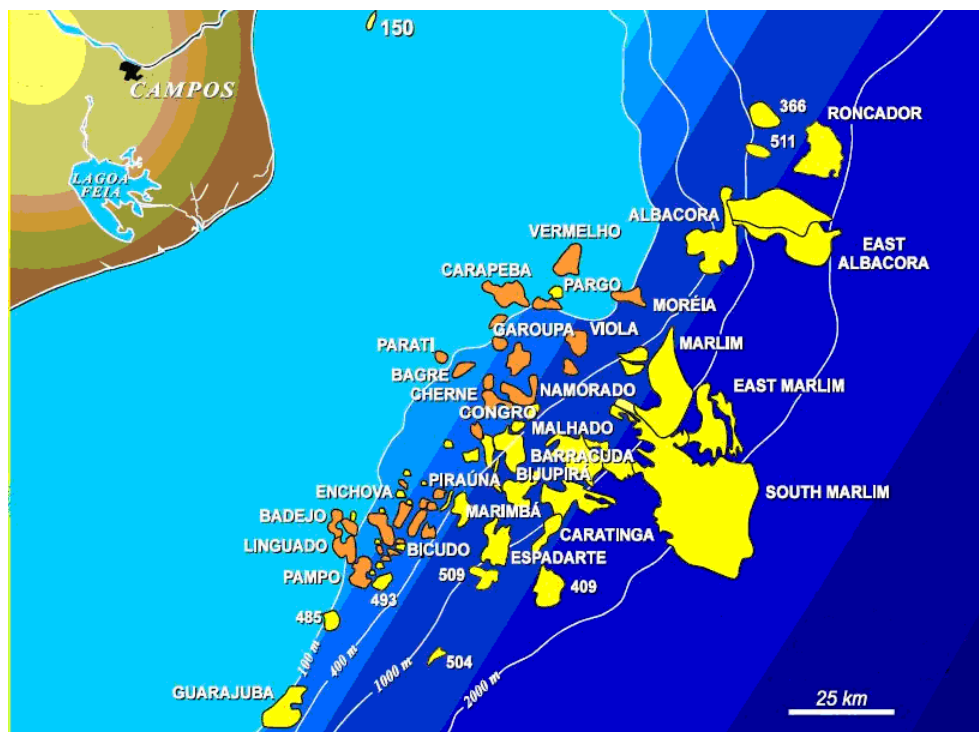


Figura 31 – Campos de exploração de petróleo na bacia de Campos

Poços perfurados a 67 km de Marlim Leste, com 2857m de profundidade (figura 32), já comprovam as novas fronteiras exploratórias no Brasil.

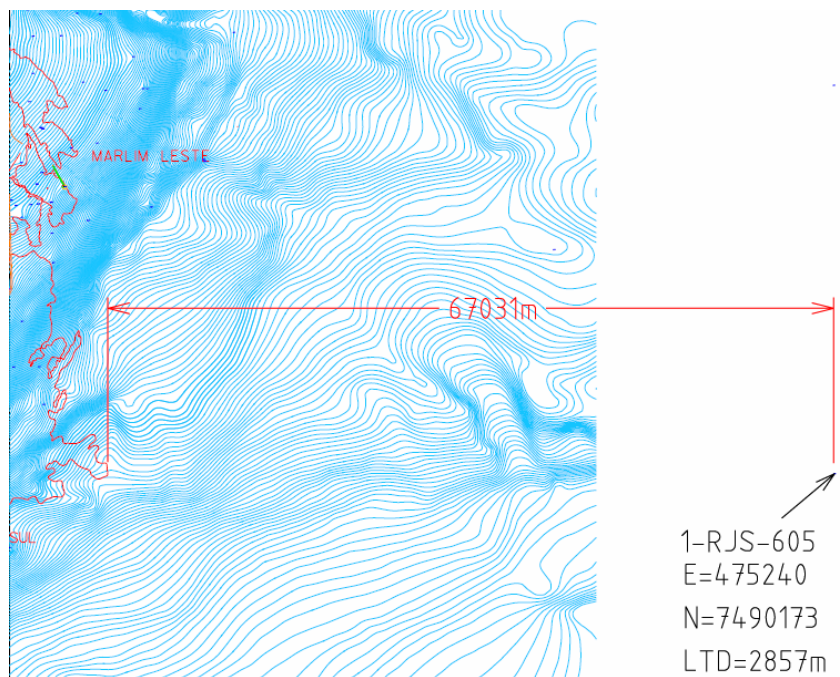


Figura 32 – Localização de poço em profundidades próximas a 3000 metros

3.1 CENÁRIO

Com o objetivo de analisar um cenário de profundidade em torno de 3000m, a seguinte operação de instalação do duto flexível é proposta:

Localização do poço: leste de Marlim leste em 3000m de LDA.

Características do duto a ser instalado: flexível de novas tecnologias, denominado como novo flexível, conforme tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros do novo flexível

Diâmetro externo:	0,321 m
Diâmetro interno:	0,152 m
Peso vazio no ar:	101 kg/m
Rigidez à flexão:	180 kN.mm ²

Operação a ser realizada: lançamento de 8km de um duto de 6", para conexão em primeira extremidade na BAP, numa profundidade de 3000m; lançamento ao longo da rota com profundidade máxima de 3320m e conexão de segunda extremidade em um "manifold" a 3050m de profundidade. Os módulos de conexão são para linha singela, 10 ton de massa, ângulo de 45°, com a linha em "spool" rígido ("goose neck").

A variação da profundidade ao longo da rota se dá conforme figura 33:

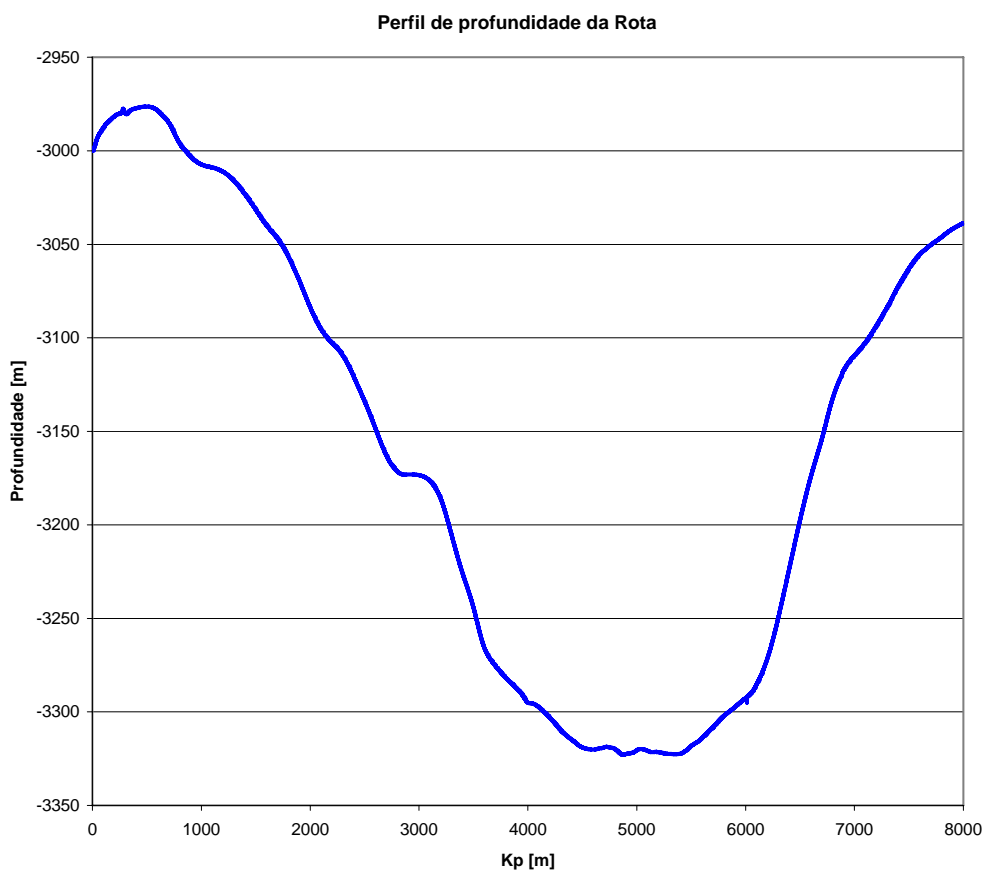


Figura 33 – Perfil do leito marinho para o estudo de caso

3.2 PARÂMETROS DO MODELO

O software Orcflex versão 8.7c foi utilizado para determinação das cargas, bem como configurações estáticas e dinâmicas durante o lançamento. A fim de abranger os diversos aspectos da instalação, os seguintes cenários foram modelados:

- Conexão vertical de 1ª extremidade na BAP do poço em 3000 metros, conforme figura 34.

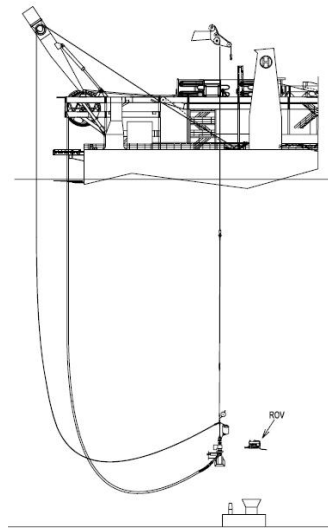


Figura 34 – *Desenho esquemático representando uma CVD de 1ª extremidade*

- Lançamento do duto ao longo da rota, conforme figura 35.

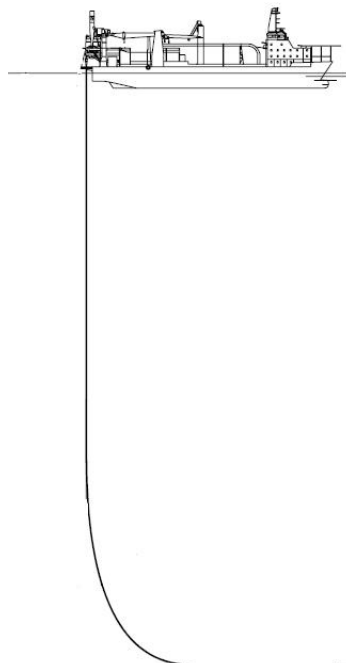


Figura 35 – *Desenho esquemático representando lançamento ao longo da rota*

- Conexão vertical de 2ª extremidade no manifold em 3040 metros, conforme figura 36.

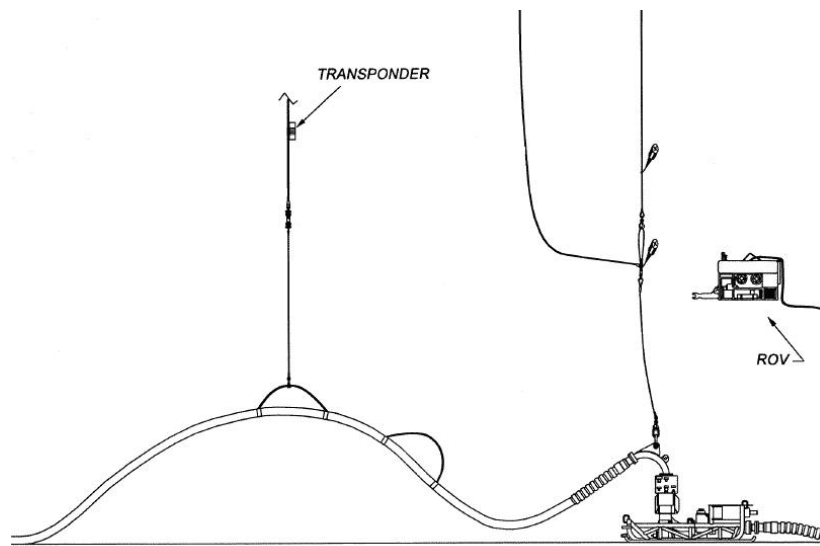


Figura 36 – Desenho esquemático representando a conexão de 2ª extremidade

- Lançamento do duto alagado no trecho mais profundo da rota.

3.2.1 Propriedades dos dutos

Os dutos flexíveis de novas tecnologias são propostos para a configuração do arranjo submarino em águas ultraprofundas, por sua alta relação resistência/peso e por apresentarem os benefícios citados na introdução deste trabalho, em relação aos dutos rígidos.

3.2.2 Critérios Ambientais

O espectro irregular de ondas, com a formulação JONSWAP, é implementado no modelo para as análises dinâmicas. Diferentes características do espectro de onda foram aplicadas, dependendo do tipo de operação:

- CVD de 1ª e 2ª extremidade: $H_s=1.6m$, $T_p=8,12s$;

- Lançamento ao longo da rota: $H_s=2.0m$, $T_p=8.12s$.

3.2.3 Parâmetros do Navio de Instalação

O navio segue os padrões das atuais embarcações de instalação em águas profundas, e possui as seguintes especificações básicas (tabela 4):

Tabela 4 – *Características dos equipamentos do navio de lançamento*

Equipamento	Carga máxima de operação
Conjunto de Tensionadores:	250 ton para lançamento 400 ton para sustentação
Guinchos:	400 ton
Guindaste:	100 ton
Sistema de armazenamento:	1500 ton

As premissas adotadas acima são utilizadas como condições limitantes para as operações.

3.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

3.3.1 Cargas no momento da CVD de 1ª:

No instante de aproximação final para conexão da primeira extremidade do tramo no poço, através de uma conexão vertical direta (figuras 37 e 38), a máxima carga de topo varia em função do comprimento da catenária. A carga de topo no cabo, que realiza a operação de conexão, é uma composição do peso do MCV, somado às parcelas de carga referentes ao comprimento suspenso da linha e ao peso próprio do cabo.

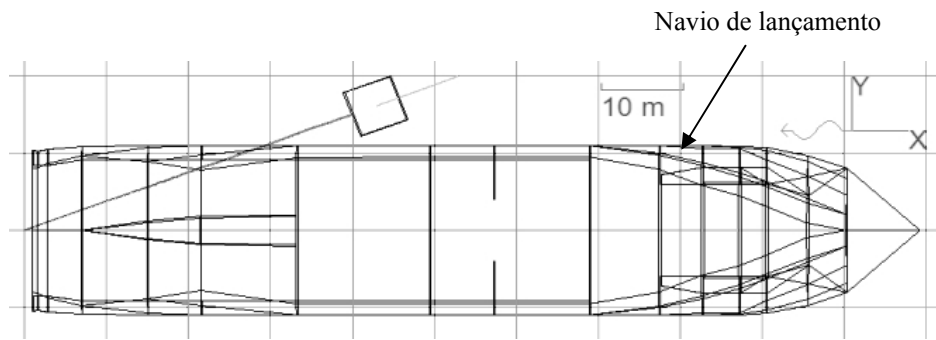


Figura 37 – Vista superior do modelo de conexão vertical de 1ª extremidade em Orcaflex

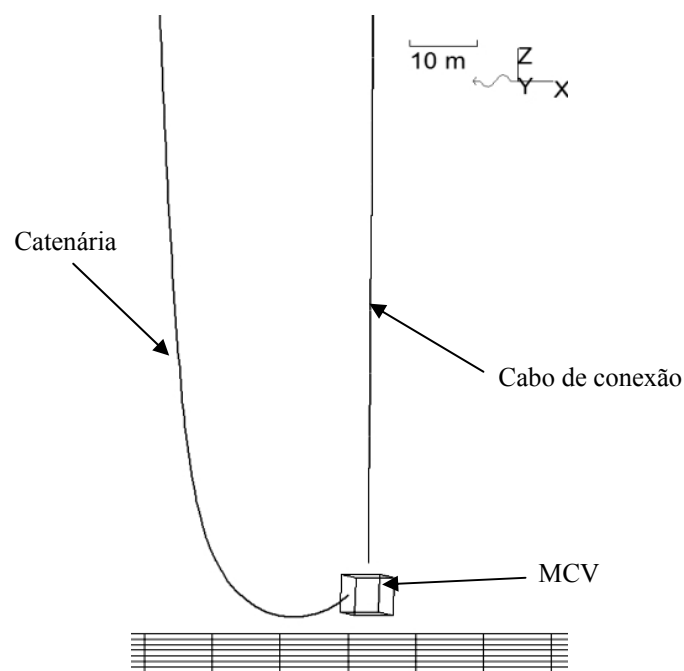


Figura 38 – Vista lateral do modelo de conexão vertical de 1ª extremidade

As ampliações dinâmicas são aplicadas nestas cargas, resultando nos valores máximos dinâmicos (tabela 5) para os quais o equipamento de lançamento deve ter capacidade.

Tabela 5 – Cargas durante operação de CVD em 1ª extremidade

Parâmetro	Máxima tração estática [kN]	Máxima tração dinâmica [kN]
Cabo de conexão	795	845
Topo do duto	546	1440

3.3.2 Parâmetros de lançamento ao longo da rota:

Os gráficos abaixo apresentam a variação dos principais parâmetros de lançamento ao longo da rota, para ângulos de topo de 0,5°, 1,0°, 1,5° e 5°, tendo em vista que a variação de ângulo de topo pode resultar em condições favoráveis no lançamento.

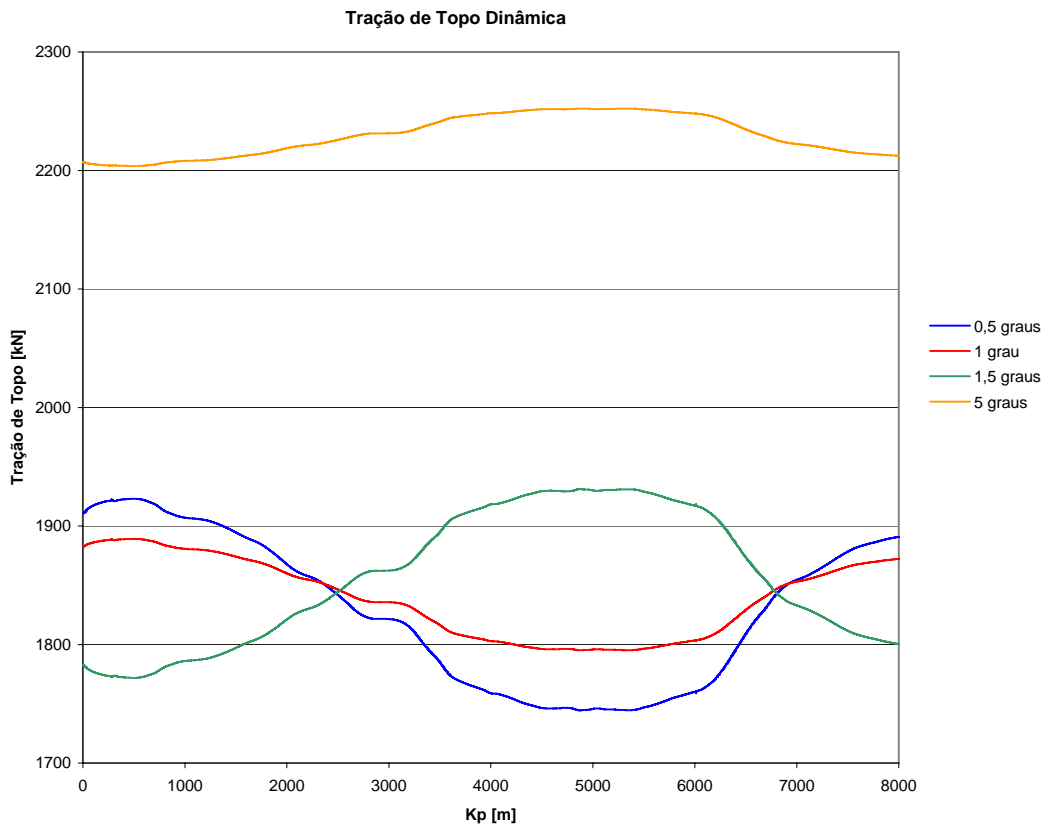


Figura 39 – Tração de Topo dinâmica ao longo do lançamento

As figuras 39 e 40 representam, respectivamente, os valores das cargas de topo dinâmicas e estáticas. A carga de topo de lançamento deve ser acompanhada ao longo de toda a operação. Através deste monitoramento, aspectos importantes devem ser avaliados. Relevantes conclusões são obtidas através deste exame, como por exemplo, alterações na condição de mar e alagamento incidental da linha.

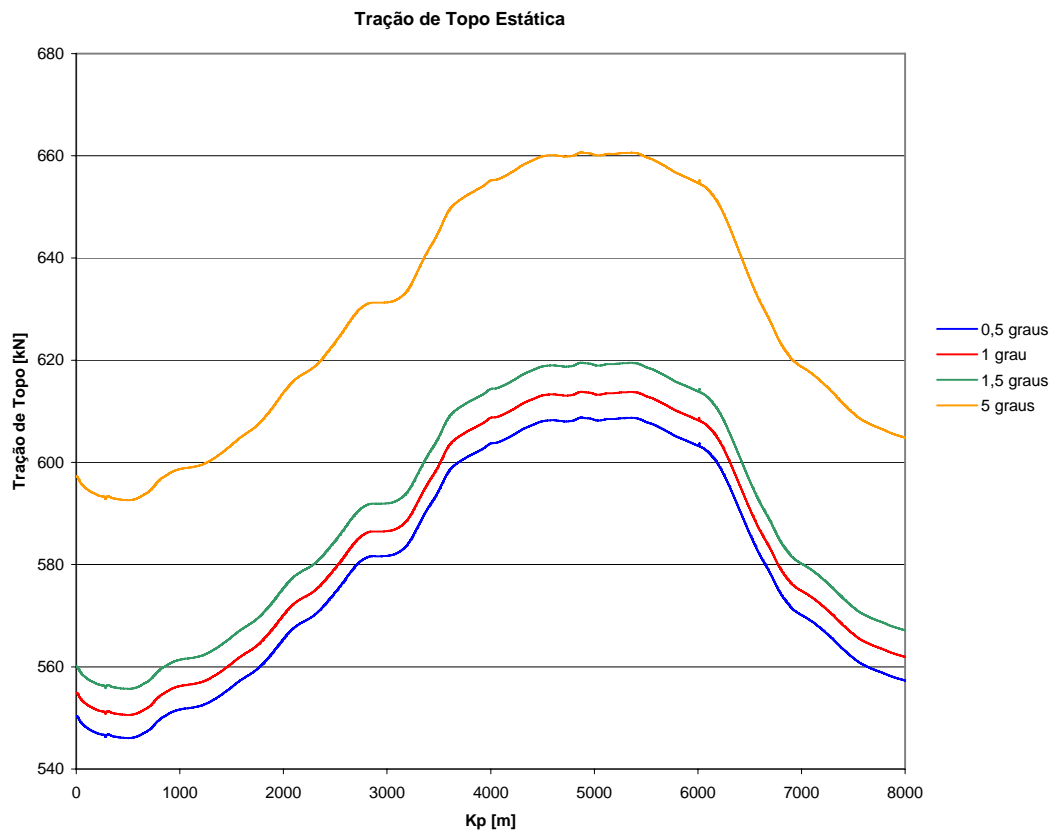


Figura 40 – Tração de Topo estática ao longo do lançamento

Já as figuras 41 e 42 mostram a variação da carga horizontal da catenária ao longo da rota.

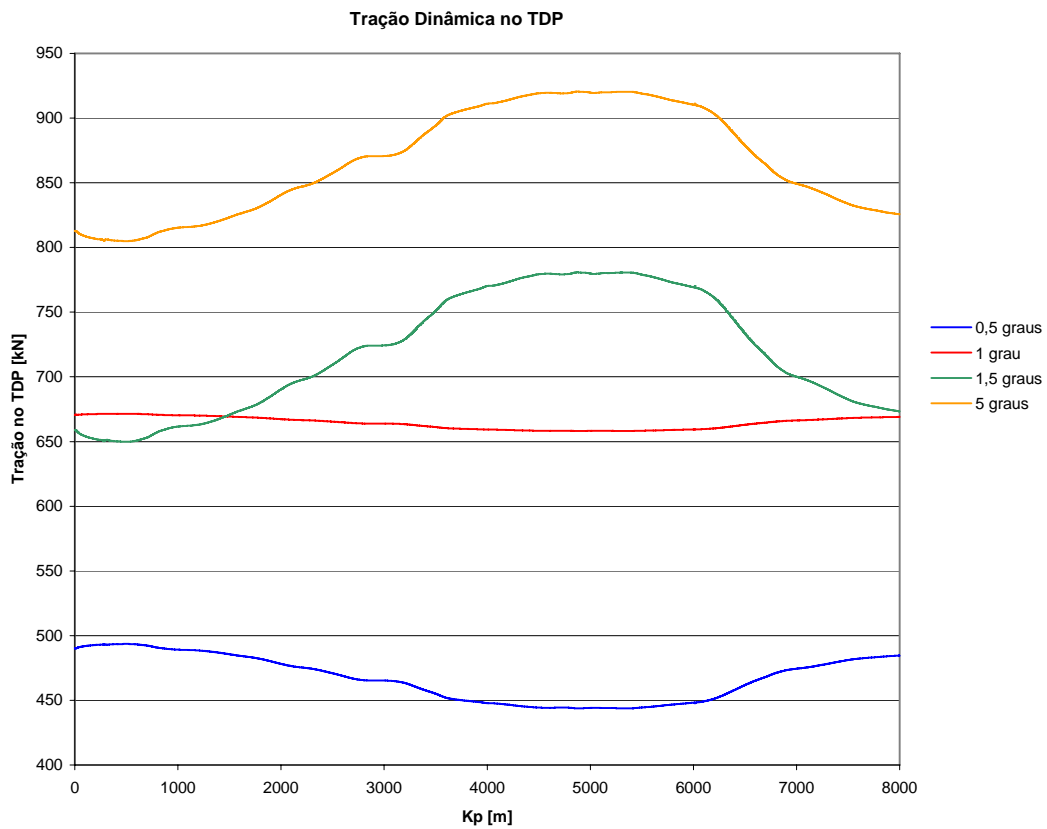


Figura 41 – Tração dinâmica no TDP ao longo do lançamento

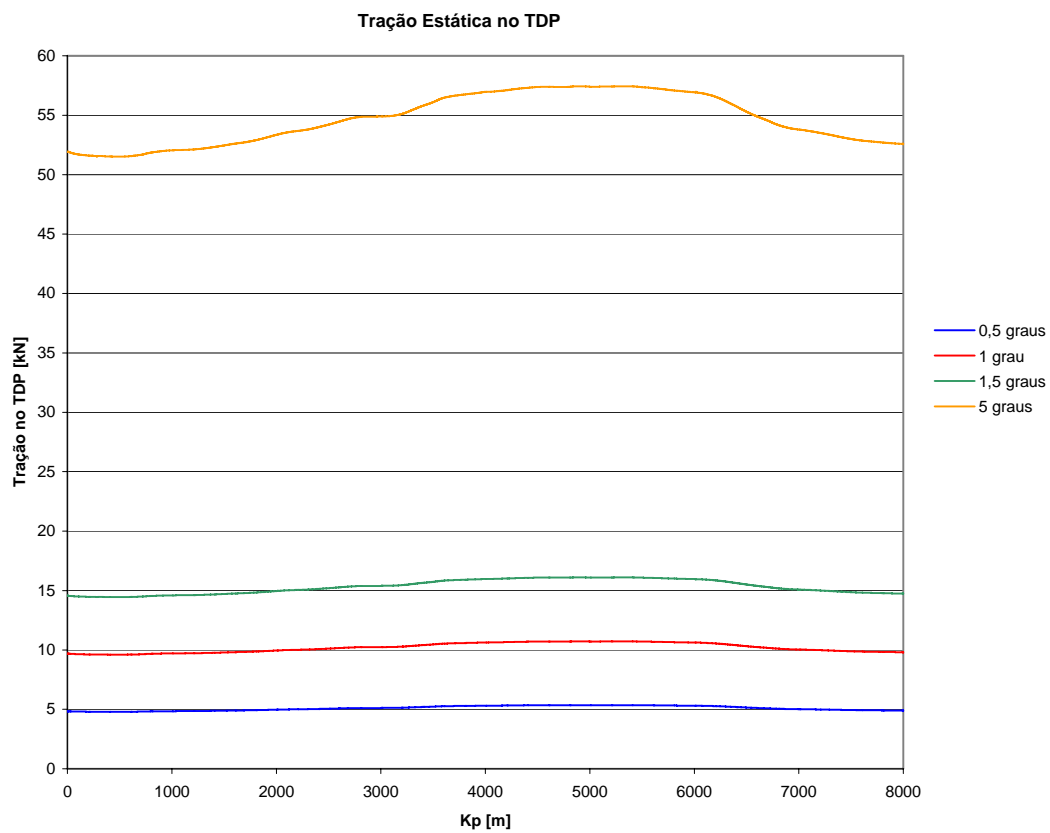


Figura 42 – Tração estática no TDP ao longo do lançamento

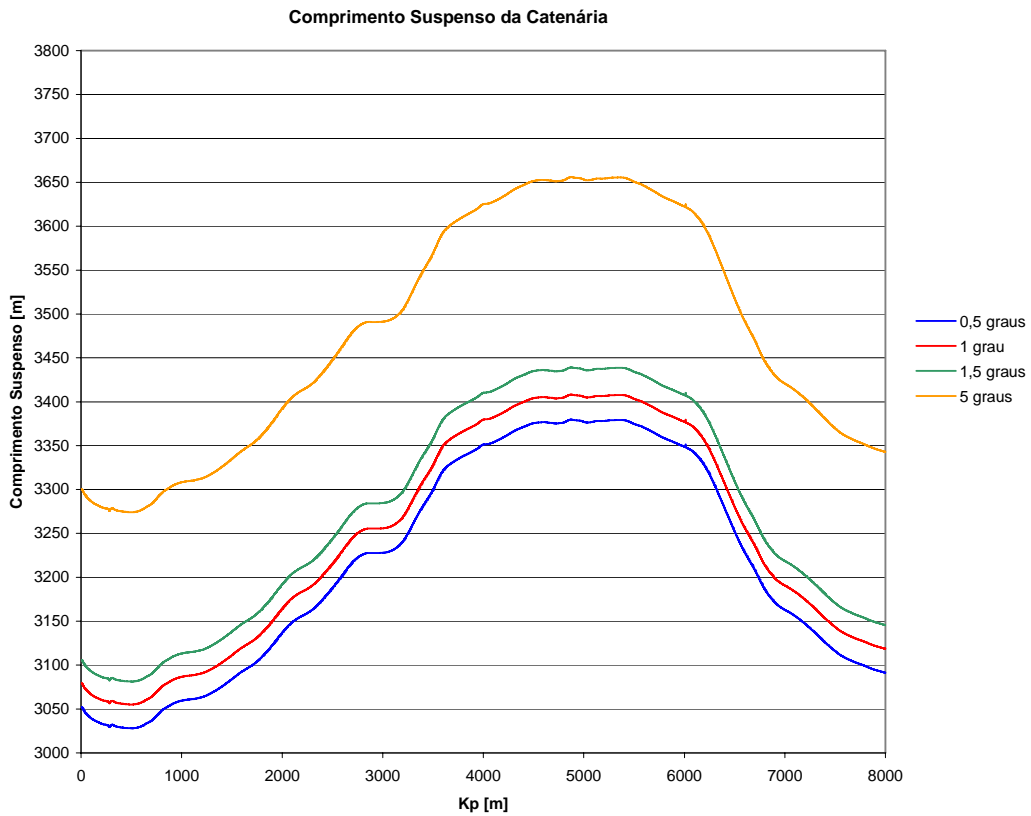


Figura 43 – *Comprimento Suspenso ao longo da rota*

O comprimento suspenso para diferentes ângulos de lançamento é apresentado na figura 43.

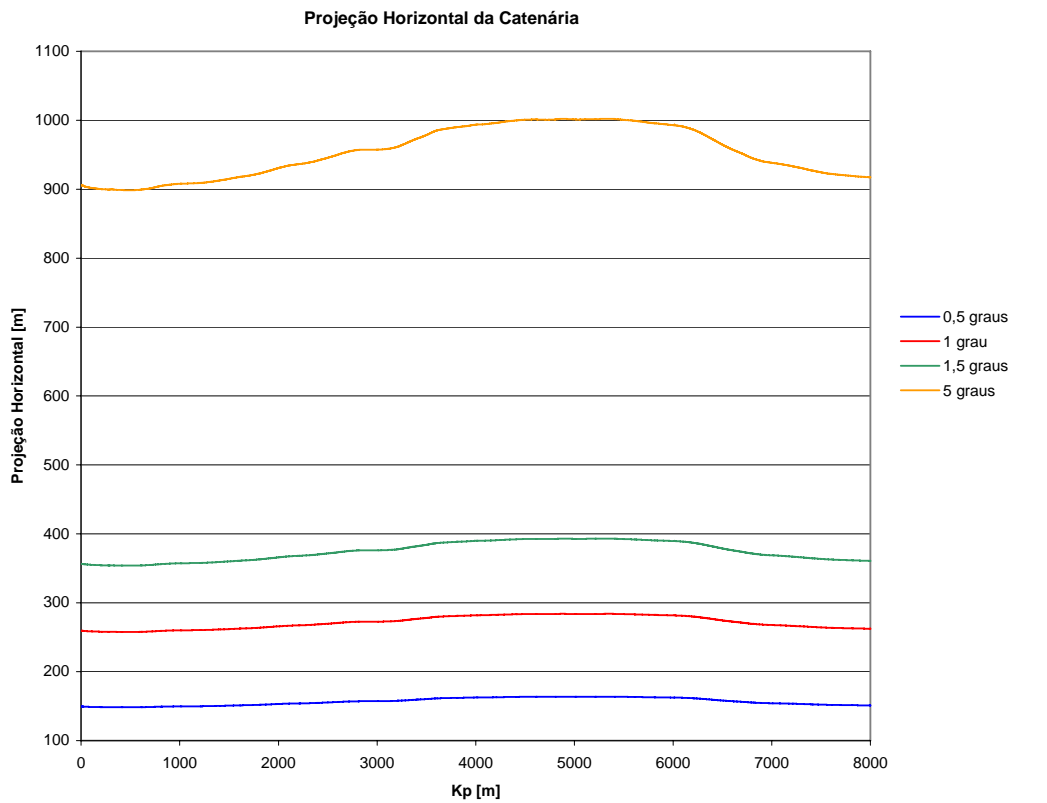


Figura 44 – *Projeção horizontal da catenária ao longo da rota*

Como pode ser observado no gráfico da figura 44, a variação do ângulo de topo tem grande impacto na projeção horizontal.

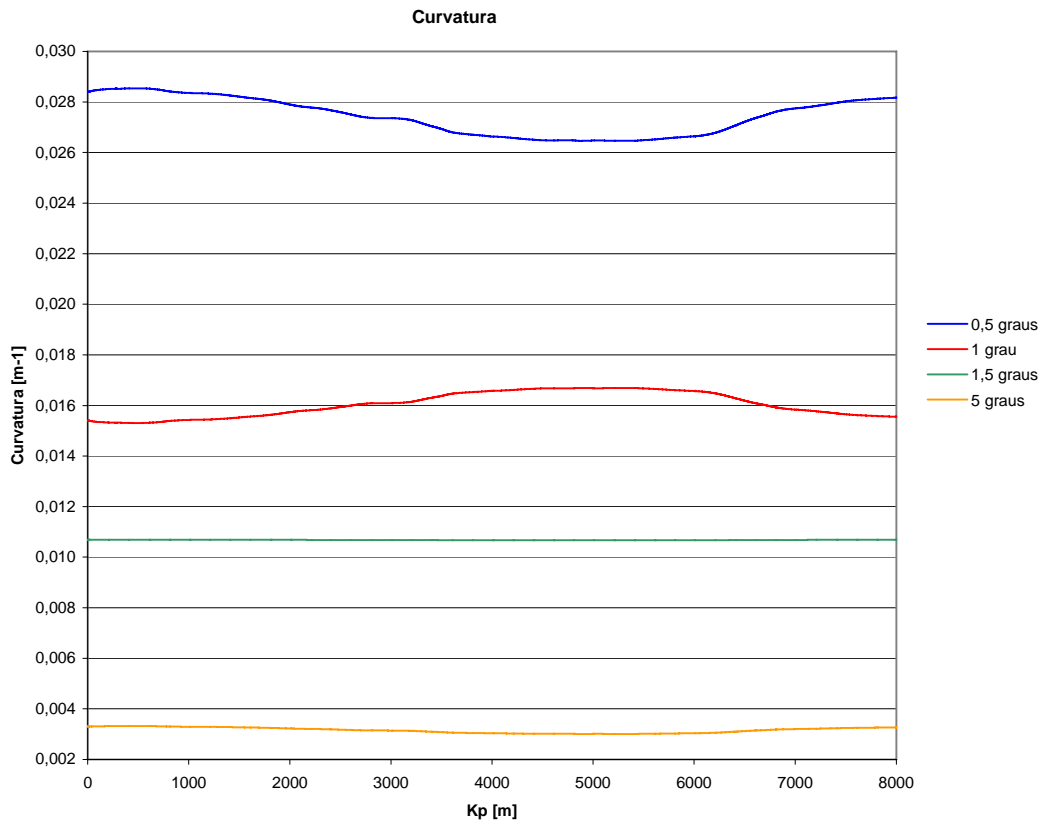


Figura 45 – Curvatura da catenária ao longo da rota

E, finalmente, o gráfico da figura 45 apresenta a curvatura do duto ao longo de seu lançamento, para diferentes configurações de catenária. A avaliação deste parâmetro é de suma importância para a garantia da integridade do flexível.

3.3.3 Cargas no momento da CVD de 2ª:

No momento da conexão em segunda extremidade, a inclinação do MCV precisa estar dentro do limite de alinhamento permitido pelo “hub” da estrutura instalada no fundo. Auxiliada por um cabo, a certificação da melhor configuração para conexão é efetuada, conforme figura 46.

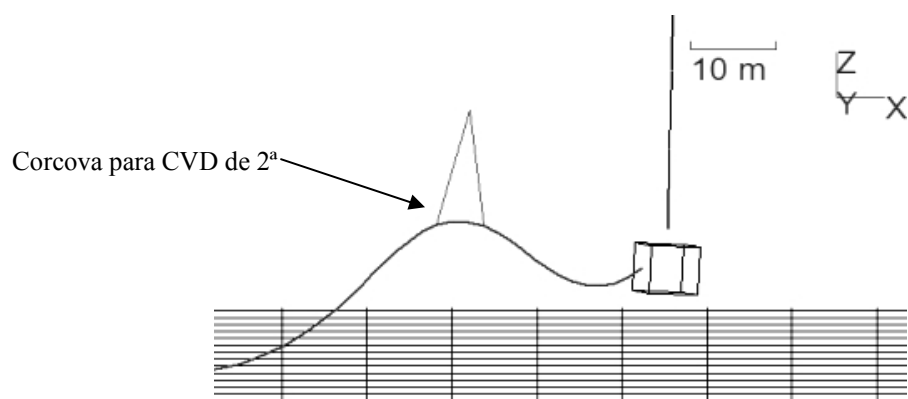


Figura 46 – Vista lateral do modelo de CVD 2ª em Orcaflex

A carga no cabo de conexão difere um pouco da carga durante o acoplamento em 1ª extremidade, visto que o “manifold” está 40m mais fundo que o poço. Os resultados são apresentados na tabela 6:

Tabela 6 – Cargas durante operação de CVD em 2ª extremidade

Parâmetro	Máxima tração estática [kN]	Máxima tração dinâmica [kN]
Cabo de conexão	905	970

3.3.4 Condição Crítica de Instalação

O equipamento de instalação do navio deve ter capacidade de sustentar a carga crítica de instalação, considerando a hipótese de um alagamento acidental. As figuras 47 e 48 apresentam os resultados de cargas de instalação, para a condição de duto alagado.

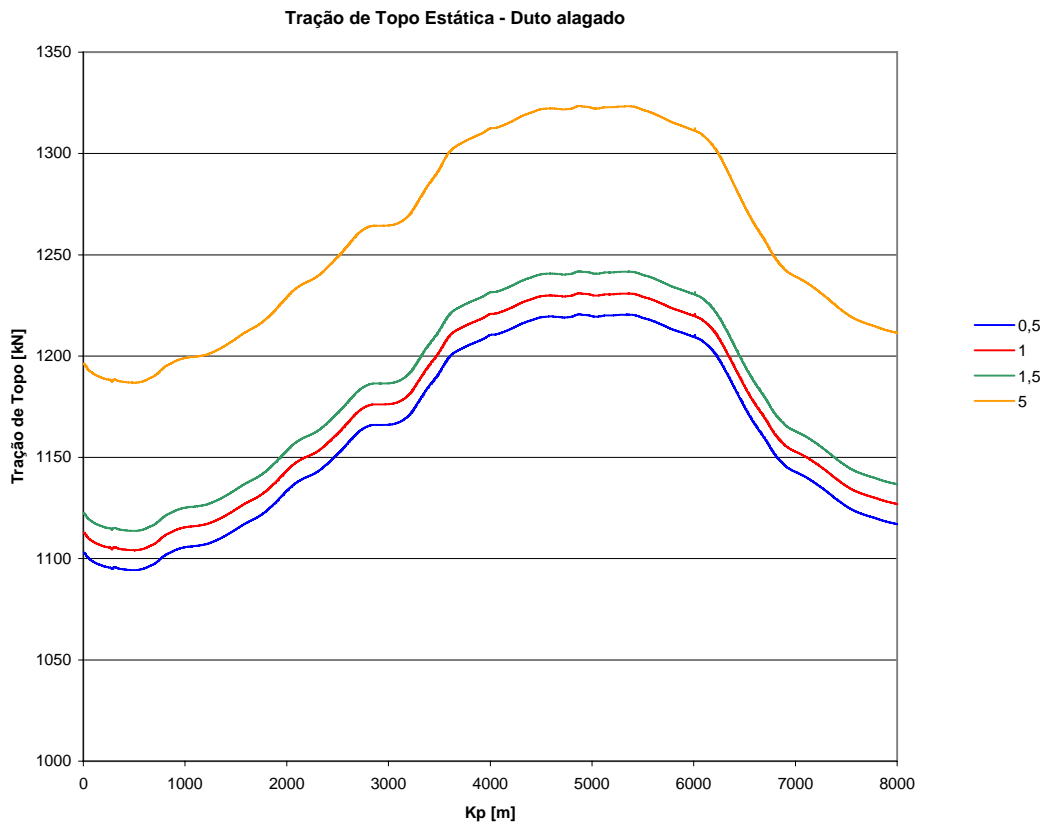


Figura 47 – Tração de topo estática para duto alagado

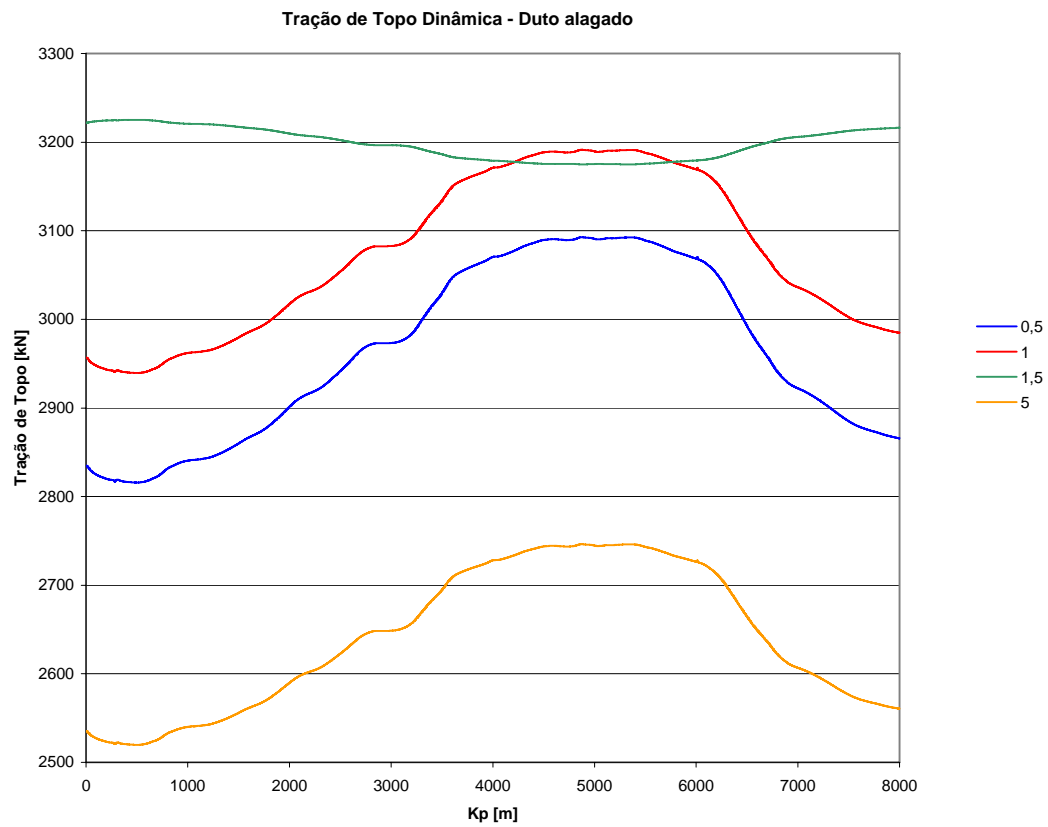


Figura 48 – Tração de topo dinâmica para duto alagado

3.4 COMENTÁRIOS SOBRE OS RESULTADOS

A operação de lançamento para conexão do poço em 1ª extremidade, lançamento ao longo da rota e conexão de 2ª extremidade no “manifold” foi investigada, e a utilização de dutos flexíveis de novas tecnologias provou ser a mais adequada para o cenário descrito. Comparando com os flexíveis convencionais, as cargas envolvidas são muito menores. Se, por outro lado, o duto rígido fosse usado, a viabilidade de conexão vertical direta ficaria comprometida.

Cargas de topo da ordem de 200ton foram obtidas, provando a necessidade de embarcações com sistemas de lançamento capazes de sustentação de cargas elevadas.

Em função dos valores obtidos de projeção horizontal, o monitoramento do TDP pode ser feito pelo mesmo navio que realiza a operação de lançamento. A exceção fica para o cenário de cinco graus de ângulo de topo, onde surge a necessidade de uma embarcação de suporte, em função da grande projeção horizontal da catenária.

No caso de alagamento do duto, o sistema de tensionadores deve ter uma capacidade de sustentação de carga de 400ton, o que permite a manobra de parada de lançamento e transferência para o sistema de abandono, que igualmente deve ser dotado de um guincho de 400ton.

3.5 ANÁLISE LOCAL NO FLEXÍVEL

Concluída a fase de análise global do lançamento, outro ponto de especial atenção refere-se à análise local do flexível, no ponto onde ocorre sua sustentação pelos tensionadores. Esforços de grande magnitude são aplicados nas regiões de contato dos

“tracks” com o duto, objetivando manter a sujeição do mesmo ao equipamento de lançamento.

Para a análise local do duto flexível, foi realizada uma modelagem por elementos finitos, baseada no exemplo proposto e validado através de experimentos por Cruz e Sousa [15] e [17].

Cada camada do duto foi modelada com o intuito de representar de maneira realista o comportamento estrutural do flexível.

Para as camadas resistentes à pressão, em função da complexidade de suas formas (camadas intertravadas), fez-se necessária a simplificação do modelo, com a adoção de uma camada homogênea com comportamento estrutural compatível com o da camada intertravada.

Segundo o modelo proposto por Cruz e Sousa ref [15] e [17], a espessura homogênea equivalente a uma camada intertravada pode ser expressa por meio da seguinte equação, que é obtida através da equivalência da rigidez à flexão:

$$t = \sqrt{12 \frac{I_x}{A}}$$

Onde:

t = espessura equivalente;

I_x = menor momento de área da seção;

A = Área da seção.

Para o novo flexível em questão, tem-se:

$$I_x = ((b \cdot h^3) / 12) + A \cdot d_1^2 + ((b \cdot h^3) / 12) + A \cdot d_2^2$$

Onde:

$$b = 1\text{mm}$$

$$h = 1,8\text{mm}$$

$$d_1 = 2,9\text{mm}$$

$$d_2 = 0\text{mm}$$

$$A = 1,8\text{mm}^2$$

Logo:

$$I_x = 16,11\text{mm}^4$$

$$\mathbf{t = 10.3\text{mm}}$$

3.5.1 Aperto mínimo para sustentação do duto

Para determinação do menor aperto para sustentação, no tensionador, da carga imposta pela catenária, deve-se considerar o comprimento dos “tracks”, o coeficiente de atrito entre as camadas do flexível e a máxima carga dinâmica do duto.

O aperto mínimo é determinado pela fórmula de atrito simples, conforme abaixo:

$$\text{Aperto} = \frac{T_{\text{topo}} \cdot FS}{\mu \cdot N \cdot n \cdot l}$$

Onde:

T_{topo} = máxima carga de tração;

μ = coeficiente de atrito entre as camadas do duto;

N = número de tensionadores;

n = número de “tracks”;

l = comprimento de contato dos “tracks” com o duto;

FS = Fator de segurança

3.5.2 Aplicação das cargas do estudo de caso

A análise da instalação no trecho mais profundo da rota levou em consideração as seguintes condições:

- Máxima carga suportada pelo sistema;
- Mínimo aperto necessário aplicado ao duto, para sustentação da carga;
- Fator de segurança igual a 1.3;
- Sistema de lançamento de dois tensionadores de 3 “tracks”, com cinco metros de comprimento e um duto com um coeficiente de atrito de 0,1 entre as camadas.

Neste caso, o aperto necessário é:

$$\text{Aperto [kN/m]} = \frac{2500 \cdot 1.3}{0.1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5}$$

$$\text{Aperto [kN/m]} = 1100 \text{ kN/m}$$

3.5.3 Modelo em elementos finitos

O software COSMOSWorks, que trabalha em ambiente SolidWorks, foi utilizado para a avaliação do comportamento estrutural do duto aplicado neste estudo de caso. O SolidWorks é um software para modelagem tridimensional, enquanto o aplicativo COSMOSWorks é provido de uma série de recursos, dentre eles a capacidade de avaliação estrutural através de FEA.

As figuras abaixo apresentam o modelo (figura 49) e a malha de elementos gerada (figura 50), formada por 19745 nós, 14484 elementos e 59235 graus de liberdade.

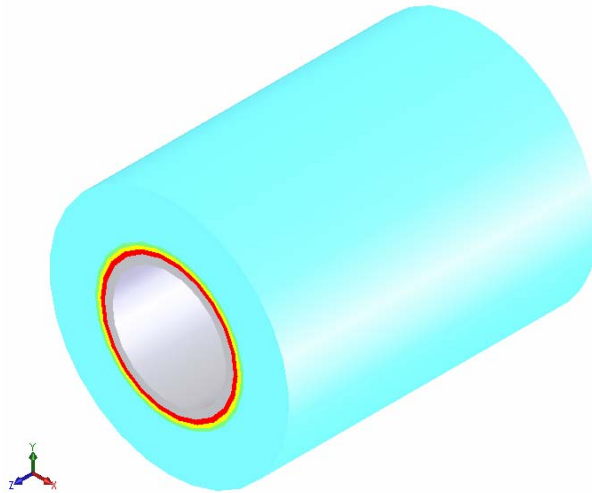


Figura 49 – Modelo 3D do duto flexível

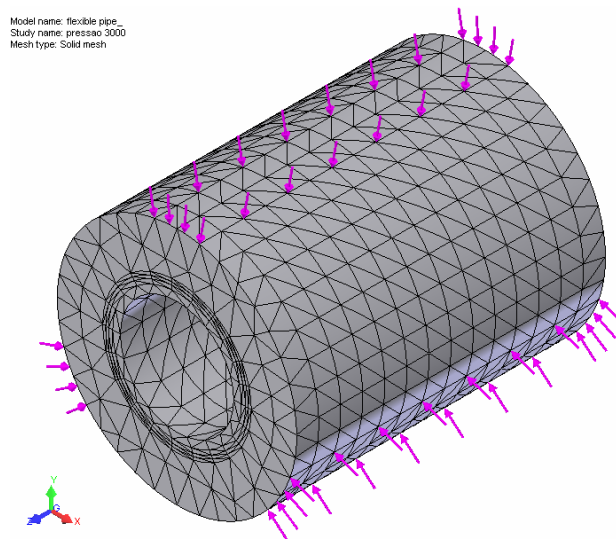


Figura 50 – Malha de elementos finitos

Diante da necessidade de aplicação de 1100 kN/m para sustentação da máxima carga de 2500kN, FEA foram realizadas para diferentes números de “tracks”: dois, três e quatro. As figuras abaixo apresentam os valores da tensão de Von mises para 3 “tracks” (figura 51), 2 “tracks” (figura 52) e 4 (figura 53).

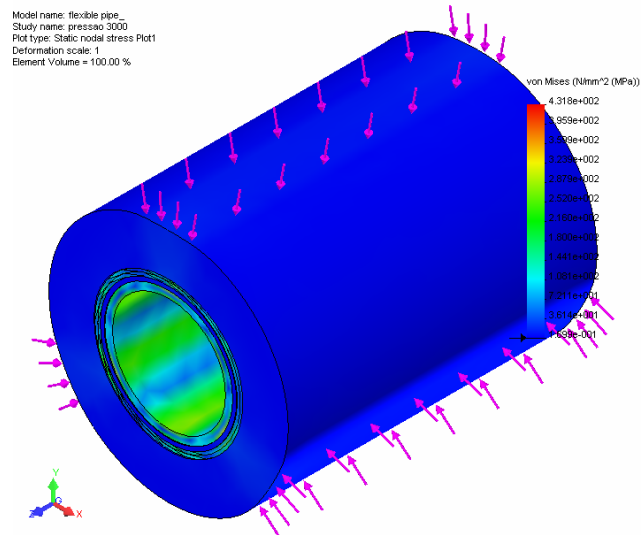


Figura 51 – Resultados de tensões de Von Mises devido à compressão do tensionador com três “tracks”

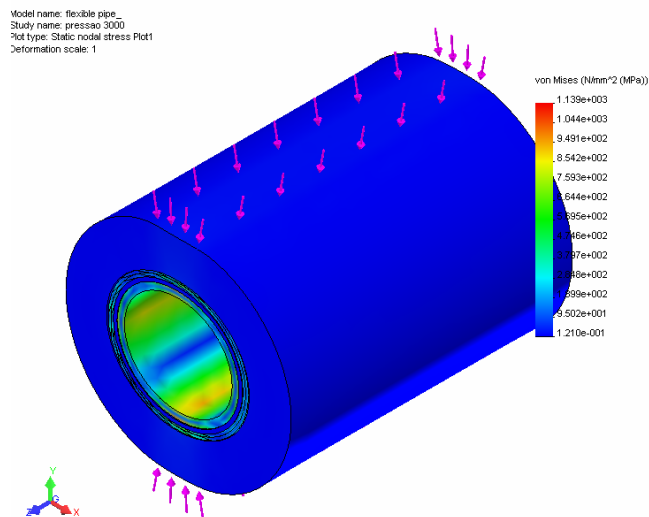


Figura 52 – Resultados de tensões de Von Mises devido à compressão do tensionador com dois “tracks”

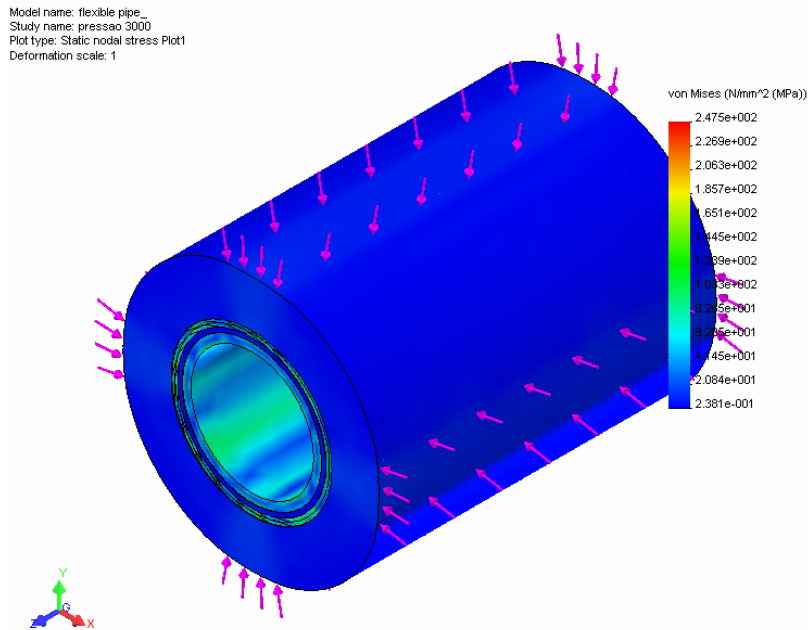


Figura 53 – Resultados de tensões de Von Mises devido à compressão do tensionador com quatro “tracks”

A figura 54 apresenta os resultados da análise de aperto com quatro “tracks” combinado com a carga máxima de tração de 2500 kN.

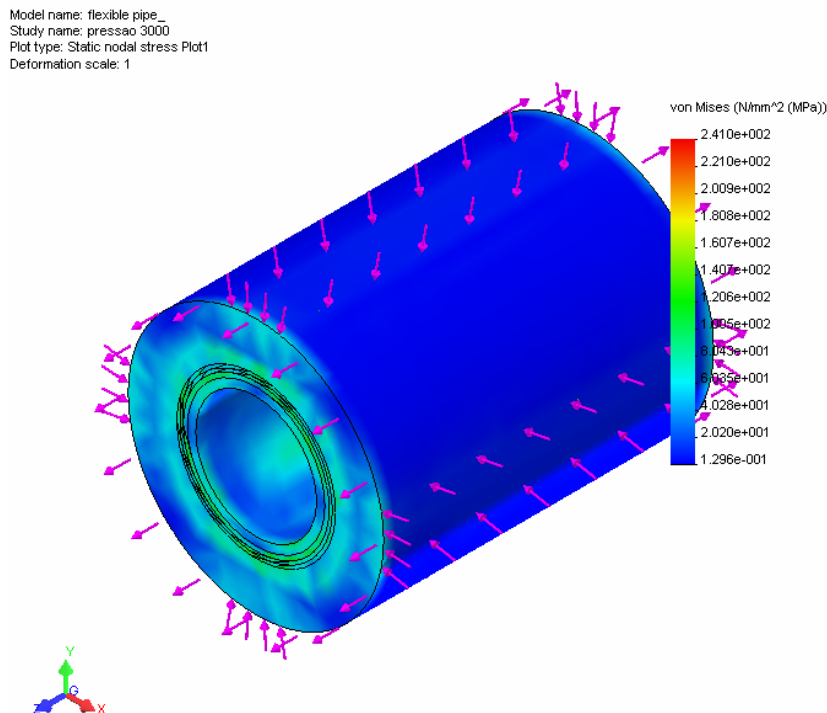


Figura 54 – Resultados de tensões de Von Mises devido à compressão do tensionador com quatro “tracks” e tração de 250ton

Conforme apresentado no apêndice B, quando uma espessura equivalente é utilizada para representar camadas não homogêneas, os valores de tensão devem ser corrigidos por um fator. Este fator é função da largura e espessura da camada, área da seção e número de arames. Cabe salientar, que nas análises do duto de novas tecnologias o valor 1 foi estabelecido em função das incertezas inerente a configuração estrutural das camadas compostas por novos materiais.

Novas análises devem ser realizadas com a aplicação do fator de correção quando maiores detalhes da composição dos novos flexíveis estiverem disponíveis.

3.6 COMENTÁRIOS SOBRE OS RESULTADOS

Os níveis de tensões resultantes, para o caso de aperto local do flexível nos tensionadores, estão abaixo da tensão de escoamento para os materiais que compõem cada camada do duto.

Avaliando os gráficos, nota-se uma redução significativa no nível de tensões com o aumento do número de “tracks”. A tabela 7 resume os valores:

Tabela 7 – *Nível de tensões para diferentes configurações de track*

Configuração	Máxima tensão de Von mises	Diferença percentual
3 “tracks”	431 MPa	NA
2 “tracks”	1139 MPa	+164%
4 “tracks”	247 MPa	-43%

Nota-se, portanto, a importância da utilização de um maior número de “tracks”, objetivando a manutenção das tensões dentro dos limites de integridade estrutural do duto.

O modelo em FEA foi validado através da comparação de seus resultados com os valores obtidos nas ref. [18] e [19], em análise e experimentos. Esta comparação pode ser vista com mais detalhe no apêndice B.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma discussão a respeito da viabilidade da utilização (lançamento e operação) de dutos flexíveis em ambiente de exploração “offshore” com profundidades de 3000m, além de uma análise comparativa com o uso de dutos rígidos nas mesmas condições. A análise global promoveu a comparação entre três diferentes tecnologias construtivas de dutos, e suas características intrínsecas, além da investigação e avaliação de diversas configurações de lançamento. O duto flexível de nova tecnologia, com estrutura composta por camada de tração reforçada por fibra de carbono, provou ser o mais adequado para águas ultraprofundas, em função de sua alta relação resistência/peso.

O estudo de caso apresentou a simulação de uma operação de lançamento, demonstrando sua viabilidade com a utilização dos novos dutos flexíveis. Finalmente, um modelo em FEA foi validado e as análises locais de integridade estrutural foram conduzidas.

Assim, o novo conceito de flexível provou ser capaz de viabilizar operações que seriam difíceis de realizar com dutos rígidos ou com dutos flexíveis convencionais, podendo estas novas técnicas construtivas tornarem-se importantes contribuições para a superação de um dos mais desafiadores obstáculos com que se defronta a indústria petrolífera, em cenários de exploração “offshore” em águas ultraprofundas.

4.1 CENÁRIOS FUTUROS

Com o aumento de descobertas de campos em águas ultraprofundas, a indústria terá que debruçar sobre todos os aspectos inovadores que fazem parte da exploração de petróleo em condições tão adversas, incluindo a transformação/substituição de

materiais, equipamentos e processos, bem como o desenvolvimento de novos conceitos de projeto.

Além das questões relacionadas à viabilidade do lançamento e da operação, analisados sob o ponto de vista estrutural, uma série de outros aspectos, que não foram foco deste trabalho, devem ser considerados, tais como: isolamento térmico, degradação de materiais compósitos em ambiente marinho, etc.

A viabilidade econômica da utilização dos novos materiais e técnicas também deve ser analisada criteriosamente, já que o custo total de um empreendimento de exploração offshore é fortemente influenciado pela escolha dos materiais e componentes, e pelos custos de instalação.

No âmbito do flexível com estrutura composta por camada de tração reforçada por fibra de carbono, a consolidação do arranjo estrutural deve ser investigada e novos modelos de simulação do comportamento intercamadas, específicos para esta composição estrutural, deverão futuramente surgir.

5 BIBLIOGRAFIA

- [1] PETROBRAS, *PROCAP 3000: próxima fronteira de exploração em águas ultraprofundas*, Rio de Janeiro, 2000.
- [2] PALMER, A. e KING, R., *Subsea Pipeline Engineering*, 2004.
- [3] O'BRIEN, P., *State of Art Flexible Riser Integrity Issues*, U.K., 2001.
- [4] EYLES, T. e HATTON, S., *Threaded Risers and Flowlines for Field Architecture*, Aberdeen, 2000.
- [5] FRAZER, I., *Deepwater: The Challenges Associated with Adapting Deep Water Technology to Ultra Deep Water Requirements*, Houston, 2003
- [6] THOMÉ, M. C. e GALGOUL, N. S., *Evaluation of a rigid pipe concept for deepwater production*, OMAE Rio de Janeiro, 2001
- [7] API, *API SPECIFICATION 17J Specification for Unbonded Flexible Pipe*, US, 2002
- [8] PRICE, J. C., *The "State of the Art" in Composite Material Development and Applications for the Oil and Gas Industry Materials*, Japão, 2002
- [9] NETO, E. e MAURÍCIO, J., *Flexible Pipe for Ultra-Deep water applications: the Roncador Experience*, OTC 2001
- [10] FERNANDES, A. C., *Up-to-date Spread-Sheet Program for Preliminary Analysis of Flexible and Steel Catenary Risers using Catenary concepts*, 10th International Symposium on Offshore Engineering, Rio de Janeiro, 1997.

- [11] ORCINA, *Design Software for Flexible Risers and Offshore Systems – Visual Orcaflex Manual User*, U.K., 1997.
- [12] DNV, *DNV-OS-F101 Submarine Pipeline Systems*, Noruega, 2000.
- [13] PINHO, U. F., *Caracterização dos estados de mar da bacia de Campos*, Rio de Janeiro, 2003.
- [14] ORCINA, *Orcaflex User Manual*, U.K., 2006.
- [15] CRUZ, F.T. L., *Análise estrutural de dutos flexíveis através do método de elementos finitos*, Tese de Mestrado USP, São Paulo, 1996
- [16] PETROBRAS, *N-2409 Flexible Pipe Specification*, 1994.
- [17] SOUSA, J. R. M., *Análises numéricas de risers flexíveis*, Tese de Mestrado COPPE/UFRJ, 1999.
- [18] SOUSA, J. R. M., LIMA, E. C. P., ELLWANGER G. B. e PAPALETTO, A., *Local Mechanical Behaviour of flexible pipes subjected to installation loads*, OMAE Rio de Janeiro, 2001.
- [19] SOUSA, J. R. M., LIMA, E. C. P., ELLWANGER G. B. e PAPALETTO, A., MAGLUTA, C., ROITMAN, N., *Analysis of the response of flexible risers to the loads imposed by hydraulic collars*, OMAE Cancun, 2003.
- [20] FERET, J. J. e BOURNAZEL, C. L., *Calculation of Stress and Slip in Structural Layers of Unbonded Flexible Pipes*, OMAE Journal, 1987.
- [21] RYTTER, J., BIRK-SØRENSEN, M., BENDIKSEN, E., LINDBERG, P., KULAKOV, V., *Flextreme - Pipe Design And Installation Analysis For Carbon Fibre Reinforced Flexible Pipe*, 3rd Workshop on Subsea Pipelines, Rio de Janeiro, 2002.

APÊNDICE A

Verificação da resistência ao colapso local de um duto rígido pela DNV-OS-F101, ref. [12].

Projeto de Dutos Rígidos

$E := 207000\text{MPa}$	Módulo de Elasticidade
$f_y := 448\text{MPa}$	Tensão de Escoamento
$\alpha_{fab} := 1$	Fator de Fabricação
$f_0 := 0.03$	Ovalização
$D := 0.1683\text{m}$	Diâmetro externo
$\epsilon_{dyn} := 0.005$	Deformação dinâmica
$\epsilon_{stat} := 0.002$	Deformação estática
$\gamma_F := 1.2$	Fator para carga funcional
$\gamma_C := 1$	Fator para carga condicional
$\gamma_E := 1.3$	Fator para carga ambiental
$p_e := 29.42\text{MPa}$	Pressão externa
$\gamma_{SC} := 1.04$	Fator para classe de segurança
$\gamma_m := 1.15$	Fator para resistência do Material
$\epsilon_A := 0$	Deformação Acidental
$\gamma_A := 0$	Fator para carga acidental
$\alpha_h := 0.845$	Mínimo de endurecimento por deformação (YS/UTS)
$\alpha_{gw} := 1$	Fator de soldagem (resistência a deformação)
$t_2 := 12.7\text{mm}$	Espessura do duto
$\gamma_\epsilon := 2.1$	Fator de resistência
$\nu := 0.3$	Coefficiente de Poisson

$$pel := 2 \cdot E \cdot \frac{\left(\frac{t2}{D}\right)^3}{1 - \nu^2}$$

$$pp := 2 \cdot fy \cdot \alpha fab \cdot \left(\frac{t2}{D}\right)$$

$$b := -pel$$

$$c := \left[(pp)^2 + pp \cdot pel \cdot f0 \cdot \frac{D}{t2} \right]$$

$$d := pel \cdot (pp)^2$$

$$v := \frac{1}{2} \cdot \left(d + \frac{-1 \cdot b \cdot c}{3} + \frac{2 \cdot b^3}{27} \right)$$

$$u := \frac{1}{3} \cdot \left(c + b^2 \cdot \frac{-1}{3} \right)$$

$$\phi := \arccos \left(\frac{-v}{\sqrt{-u^3}} \right)$$

$$y := -2 \cdot \sqrt{-u} \cdot \cos \left(60 \cdot \frac{\pi}{180} + \frac{\phi}{3} \right)$$

$$pc := \left(y - \frac{1}{3} \cdot b \right)$$

$$\varepsilon F := \varepsilon stat$$

$$\varepsilon E := (\varepsilon dyn - \varepsilon stat)$$

$$\varepsilon d := (\varepsilon F \cdot \gamma F \cdot \gamma c + \varepsilon E \cdot \gamma E + \varepsilon A \cdot \gamma A \cdot \gamma c)$$

$$\varepsilon c := 0.78 \cdot \left(\frac{t2}{D} - 0.01 \right) \cdot (\alpha h)^{-1.5} \cdot \alpha gw$$

$$\left(\frac{\varepsilon d}{\varepsilon} \right)^{0.8} + \left[\frac{pe}{pc} \right] = \blacksquare$$

$$\left(\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_c} \right)^{0.8} + \frac{p_e}{\gamma_{SC} \cdot \gamma_m} \leq 1$$

Para $D/t \leq 45$ e $p_i < p_e$.

Onde:

D = Diâmetro externo do duto;

t = espessura;

p_e = pressão externa;

p_c = pressão de colapso.

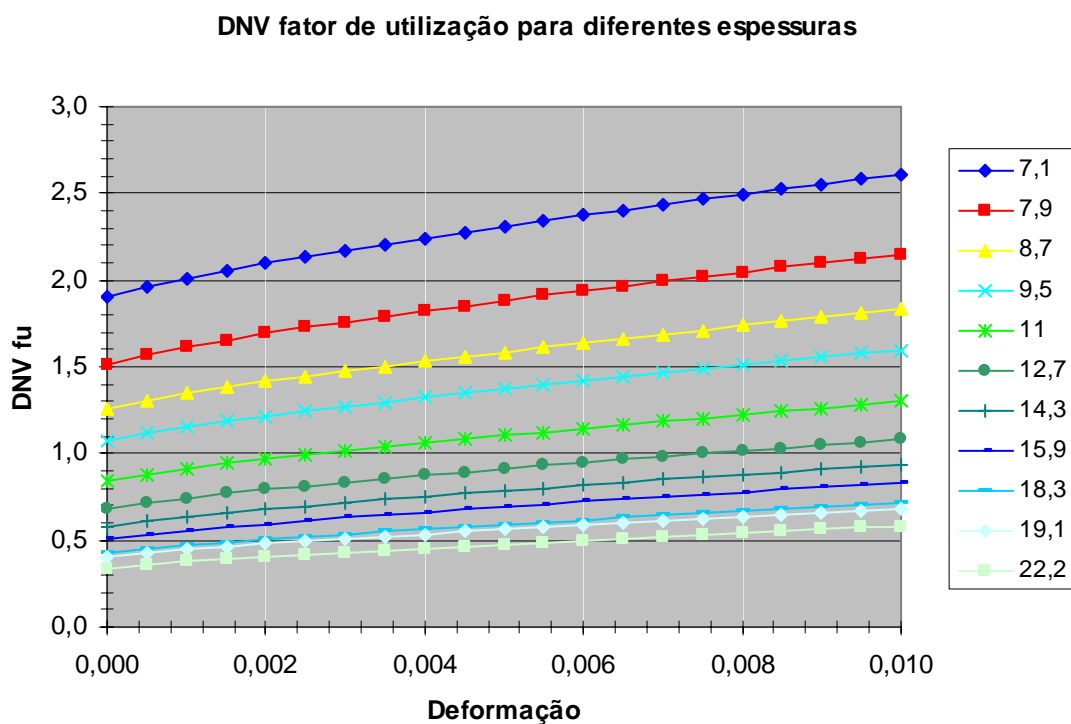


Figura 55 – Fator de utilização DNV para diferentes espessuras

Para determinação da deformação em função da curvatura do duto tem-se:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$\frac{M \cdot y}{I} = E \cdot \varepsilon$$

$$\varepsilon = y \cdot \frac{M}{E \cdot I}$$

$$M = k \cdot E \cdot I$$

$$\varepsilon = k \cdot y$$

Onde:

M = Momento de flexão

k = curvatura

APÊNDICE B

Comparação entre o modelo FEA proposto e os modelos apresentados na ref. [18] e [20].

As tabelas e figuras abaixo apresentam um resumo das análises de comparação realizadas. Para a comparação do modelo quando submetido à tração, tem-se:

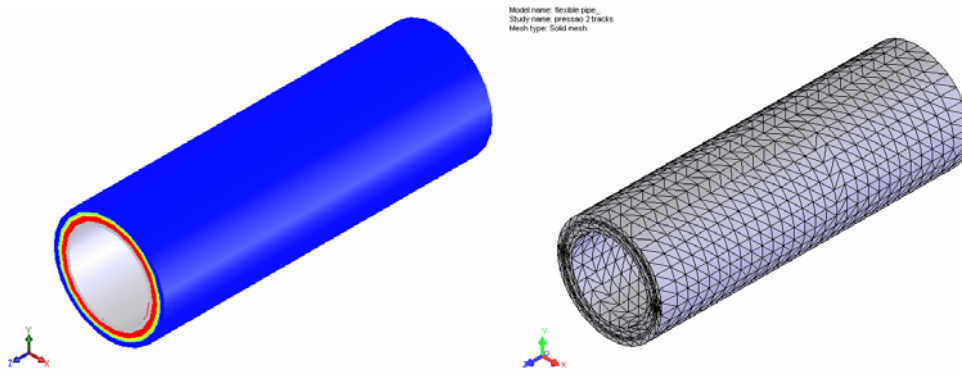


Figura 56 – Modelo 3D e malha de elementos finitos do duto flexível

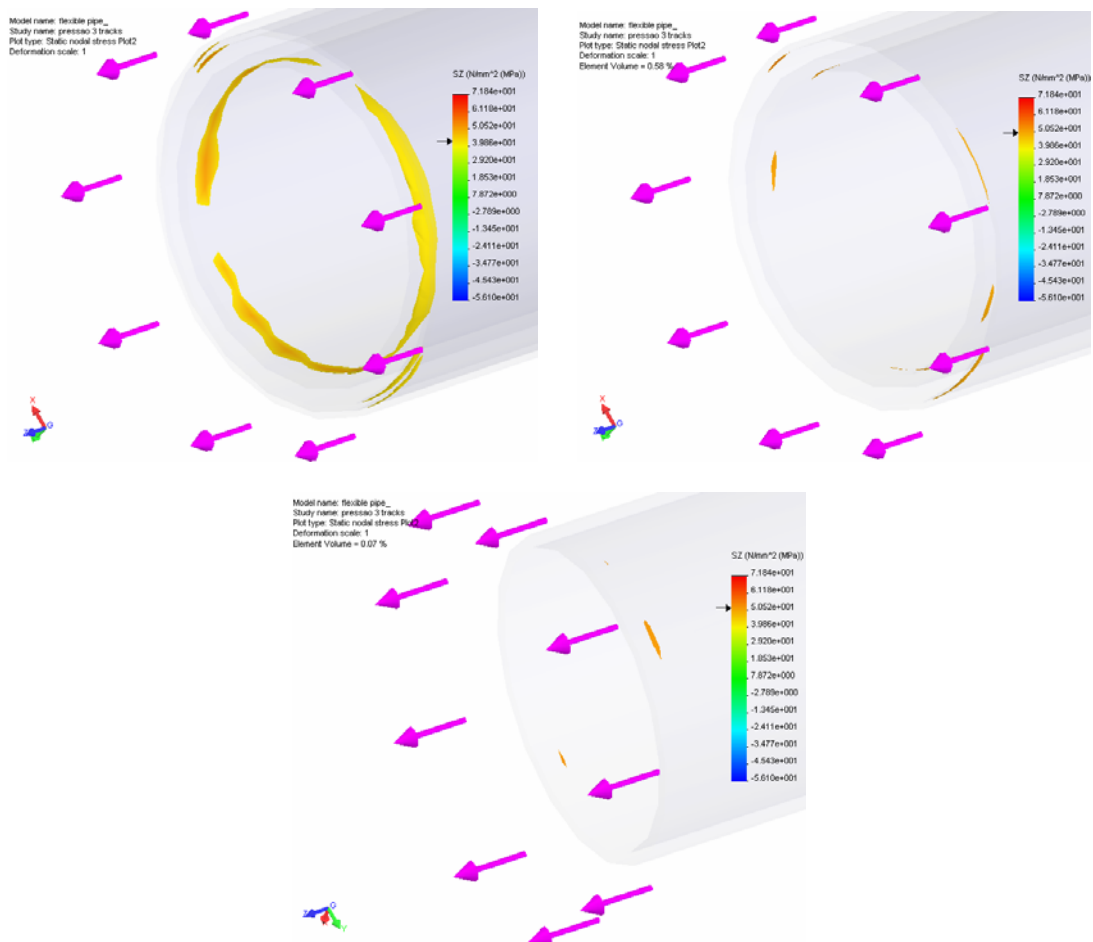


Figura 57 – Resultados de tensões Axiais na carcaça e armaduras de tração

Nos resultados de tensão axial é necessário aplicar o fator de correção de membrana, conforme ref. [18], neste caso igual a 1,979, acarretando nos resultados da tabela 8.

Tabela 8 – Resultados dos modelos quando submetidos à tração

Camada	Tensão Axial devido à aplicação de 50kN de tração		
	Feret [20]	Sousa [18]	Modelo
Carcaça	-108,2	-100,0	-102,9
Armadura Interna	102,9	90,0	98,0
Armadura Externa	89,2	84,0	86,0

O resultado do comportamento da estrutura do duto quando submetida aos esforços provenientes dos “tracks” dos tensionadores é apresentada abaixo:

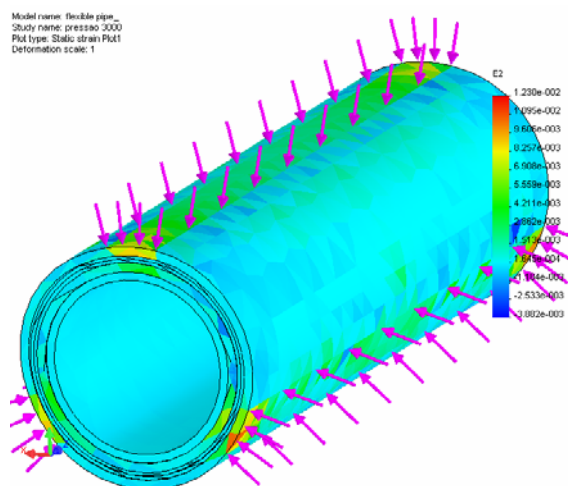


Figura 58 – Resultados de deformações no duto em função do aperto

A comparação entre resultados dos diferentes modelos é apresentada na tabela 9:

Tabela 9 – Resultados dos modelos quando submetidos ao aperto

Deformação em função de aperto de 155kN	
Sousa [18]	Modelo
0,013	0,0123

Os resultados confirmam a aplicabilidade do modelo de elementos finitos apresentado neste trabalho.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)