



## ANÁLISE DE DESCIDA DE TUBOS DE REVESTIMENTO DE POÇOS DE PETRÓLEO CONSIDERANDO UM MODELO NUMÉRICO DE CONTATO

Tiago Sten Freitas

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

Orientador: Fabrício Nogueira Corrêa

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2020

ANÁLISE DE DESCIDA DE TUBOS DE REVESTIMENTO DE POÇOS DE  
PETRÓLEO CONSIDERANDO UM MODELO NUMÉRICO DE CONTATO

Tiago Sten Freitas

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA 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 CIVIL.

Orientador: Fabrício Nogueira Corrêa

Aprovada por: Prof. Breno Pinheiro Jacob  
Prof. Fabrício Nogueira Corrêa  
Dr. Allan Carre de Oliveira

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2020

Freitas, Tiago Sten

Análise de Descida de Tubos de Revestimento de Poços de Petróleo Considerando Um Modelo Numérico de Contato / Tiago Sten Freitas. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2020.

XVIII, 158 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Fabrício Nogueira Corrêa

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 143-151.

1. Introdução. 2. Unidades Móveis de Perfuração. 3. Revestimentos. 4. Problemas de Contato. I. Corrêa, Fabrício Nogueira II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*“O que as suas mãos tiverem que fazer que o façam com toda a sua força, pois na sepultura, para onde você vai, não há atividade nem planejamento, não há conhecimento nem sabedoria”.*

*Eclesiastes 9:10 (NVI)*

# AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as conquistas até aqui e por renovar minhas forças a cada amanhecer.

Aos meus pais, Orly Freitas e Neurizette Sten Freitas e a minha irmã Saionara Sten Freitas, pela paciência, compreensão e pelos momentos de alegria.

Ao meu orientador Fabrício Nogueira Corrêa, pela confiança em me ceder esse tema e pela atenção dedicada ao longo de toda sua orientação.

Aos meus companheiros de laboratório, pela construção de um ambiente de trabalho agradável e motivador, em especial aos meus amigos do “aquário”, Ausberto Rivera Medina e Leonardo Tadeu Ribeiro Pereira pelo bom humor diário tornando os dias mais leves.

Aos docentes, amigos da graduação e funcionários da Universidade Vila Velha – UVV, em especial ao professor D.Sc. Henri Fiorenza pelos conselhos acadêmicos e profissionais.

Ao Laboratório de Métodos Computacionais e Sistemas *Offshore* - LAMCSO, pelo apoio financeiro, pela infraestrutura e pelas oportunidades.

Aos professores do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, pelos conhecimentos ministrados ao longo do curso.

A todos os outros que não foram aqui citados, mas que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração deste trabalho.

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001”

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001”

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

## ANÁLISE DE DESCIDA DE TUBOS DE REVESTIMENTO DE POÇOS DE PETRÓLEO CONSIDERANDO UM MODELO NUMÉRICO DE CONTATO

Tiago Sten Freitas

Fevereiro/2020

Orientador: Fabrício Nogueira Corrêa

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho apresenta uma abordagem computacional para a identificação de problemas de contato do tipo *pipe-in-pipe* entre corpos deformáveis, a identificação da região de contato é realizada por meio de um algoritmo baseado na técnica de *bounding box*. Com base na literatura referenciada e nas normas técnicas consultadas são descritos os conceitos fundamentais de um sistema de *riser* de perfuração e a operação de descida de colunas de revestimento em poços de petróleo, assim como, a metodologia de análise utilizada na modelagem. A fim de representar um cenário mais realista optou-se por uma metodologia de análise acoplada onde a unidade móvel de perfuração, o *riser* de perfuração e o solo são analisados de forma conjunta. As forças elásticas de ação e reação são calculadas de forma expedita pela aplicação de uma rigidez de contato, enquanto a dissipação de energia do contato é definida pelo amortecimento estrutural de *Rayleigh*. Os modelos dos estudos de caso foram configurados e simulados pela ferramenta computacional SITUA/Prosim. Os resultados apresentados demonstraram que foi possível a identificação contínua da região onde ocorreu o contato *pipe-in-pipe*, reportando os esforços envolvidos.

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

ANALYSIS OF DESCENT OF CASING PIPES OF PETROLEUM WELL  
CONSIDERING A NUMERICAL CONTACT MODEL

Tiago Sten Freitas

February/2020

Advisor: Fabrício Nogueira Corrêa

Department: Civil Engineering

This work presents a computational methodology for simulation of internal contact between elastic pipes, which is denominated pipe in pipe, the identification of the contact regions is performed using the *bounding box* technic. Based on the technical and scientific literature, technical rules and the state of art elastic, this work describes the background and principal concepts of the drilling risers and special operations for deploy well casing joint inside the drilling riser. In order to establish the structural safety and reliability of the casing running operations, dynamical simulations of the system are performed using numerical method including the pipe in pipe contact effects, between the drilling riser and casing joints. A fully coupled dynamic drilling rig+riser+soil describes more realistically the structural behavior of the system and this methodology is adopted in this research. A contact stiffness is defined in order to compute the contact reaction forces, between the pipes, the energy dissipation due to the contact process is represented using the Rayleigh methodology. The models case studies are presented; the dynamical simulations are performed using the SITUA/PROSIM numerical engine. The results obtained here show clearly the contact regions between the pipes. Moreover, the computation of internal and reaction forces were estimated.

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Contexto e Motivação .....	8
1.2	Objetivo .....	10
1.3	Estruturação do Texto .....	10
<b>2</b>	<b>UNIDADES MÓVEIS DE PERFURAÇÃO .....</b>	<b>11</b>
2.1	Introdução.....	11
2.1.1	Plataforma Autoelevatória .....	11
2.1.2	Plataforma Semissubmersível .....	13
2.1.3	Navio-Sonda.....	13
2.1.4	Monocoluna .....	14
2.2	<i>Risers</i> .....	15
2.3	<i>Riser</i> de Perfuração .....	17
2.3.1	Mesa Rotativa.....	19
2.3.2	Diverter .....	19
2.3.3	Juntas Flexíveis .....	20
2.3.4	Junta Telescópica .....	21
2.3.5	Sistema de Tração .....	22
2.3.6	Juntas de <i>Riser</i> .....	24
2.3.7	BOP.....	25
2.3.8	Sistema de Cabeça de Poço Submarina - SCPS.....	28
<b>3</b>	<b>REVESTIMENTO .....</b>	<b>30</b>
3.1	Introdução.....	30
3.2	Especificações de Tubos de Revestimentos .....	31
3.3	Operação de Descida da Coluna de Revestimento .....	32
<b>4</b>	<b>PROBLEMAS DE CONTATO .....</b>	<b>38</b>
4.1	Introdução.....	38

4.2	Tipos de Contato .....	42
4.3	Formulações de Contato .....	45
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA DE ANÁLISE .....</b>	<b>50</b>
5.1	Introdução.....	50
5.2	Metodologia de Análise da Unidade Flutuante .....	50
5.3	Metodologia de Análise do <i>Riser</i> de Perfuração .....	51
5.3.1	Metodologia de Análise do Sistema de Tração.....	54
5.3.2	Metodologia de Análise da Junta Flexível .....	57
5.3.3	Metodologia de Análise da Junta Telescópica .....	59
5.3.4	Metodologia de Análise do Solo .....	61
5.4	Metodologia de Análise do Contato .....	63
<b>6</b>	<b>AMORTECIMENTO .....</b>	<b>71</b>
6.1	Introdução.....	71
6.2	Amortecimento de Rayleigh.....	72
<b>7</b>	<b>CRITÉRIOS OPERACIONAIS .....</b>	<b>76</b>
7.1	Introdução.....	76
7.2	Tração nos Tracionadores .....	76
7.3	Tensão Máxima Atuante no <i>Riser</i> .....	77
<b>8</b>	<b>ESTUDOS DE CASO.....</b>	<b>80</b>
8.1	Introdução.....	80
8.2	Estudo de Caso 1 .....	81
8.2.1	Modelagem do Estudo de Caso 1 .....	82
8.2.2	Resultados do Estudo de Caso 1 .....	88
8.2.3	Custo Computacional.....	89
8.3	Dados Comuns aos Estudos de Caso 2, 3 e 4.....	90
8.3.1	Lâmina D'água e Fluido de Perfuração .....	90
8.3.2	Sonda de Perfuração.....	90
8.3.3	RAO de Movimentos .....	92
8.3.4	Carregamentos Ambientais .....	93

8.3.5	Amortecimento de Rayleigh .....	94
8.4	Estudo de Caso 2 .....	95
8.4.1	Modelagem do Estudo de Caso 2.....	95
8.4.2	Resultados do Estudo de Caso 2 .....	99
8.4.3	Custo Computacional.....	101
8.5	Estudo de Caso 3 .....	103
8.5.1	Modelagem do Estudo de Caso 3.....	103
8.5.1.1	<i>Riser</i> de Perfuração.....	105
8.5.1.1.1	Mesa Rotativa/Cunha.....	108
8.5.1.1.2	Diverter .....	109
8.5.1.1.3	Junta Flexível.....	109
8.5.1.1.4	Junta Telescópica.....	110
8.5.1.1.5	Tracionadores.....	112
8.5.1.1.6	Juntas de <i>Riser</i> .....	113
8.5.1.1.7	BOP.....	116
8.5.1.1.8	Sistema de Cabeça de Poço Submarina - SCPC.....	118
8.5.1.1.9	Condutor e Revestimento de Superfície .....	118
8.5.1.2	Curva P-y do Solo.....	120
8.5.1.3	Coluna do Revestimento Intermediário .....	123
8.5.2	Resultados do Estudo de Caso 3 .....	124
8.5.3	Custo Computacional.....	127
8.6	Estudo de Caso 4 .....	128
8.6.1	Modelagem do Estudo de Caso 4.....	129
8.6.2	Resultados do Estudo de Caso 4 .....	133
8.6.3	Custo Computacional.....	139
<b>9</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>140</b>
9.1	Sugestões para Trabalhos Futuros .....	142
<b>10</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>143</b>
	<b>APÊNDICE A - RAO DE MOVIMENTOS DA PLATAFORMA.....</b>	<b>152</b>
	<b>APÊNDICE B - TABELA COM OS DADOS DA CURVA P-Y.....</b>	<b>155</b>

**APÊNDICE C - VALIDAÇÃO DA CURVA P-Y .....157**

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Blecaute - Falha no posicionamento dinâmico. Adaptado de [37].....	1
Figura 1.2 – Deriva - Desconexão de emergência. Adaptado de [37] .....	2
Figura 1.3 – Risco de colisão. Adaptado de [37] .....	2
Figura 1.4 – Descida de revestimento .....	3
Figura 1.5 – Seção do <i>riser</i> de produção [56].....	3
Figura 1.6 – Vibrações na coluna de perfuração [11] .....	4
Figura 1.7 – Coluna de revestimento apoiada na cunha da mesa rotativa. Adaptado de [83] .....	5
Figura 1.8 – Junta telescópica .....	6
Figura 1.9 - Poço de petróleo [33, 53] .....	7
Figura 2.1 – Plataforma autoelevatória [49] .....	12
Figura 2.2 - Plataforma semissubmersível [49] .....	13
Figura 2.3 – Navio-Sonda Maersk Venturer [48] .....	14
Figura 2.4 - Monocoluna Sevan Brasil, fabricada em 2012 [67] .....	15
Figura 2.5 – Seção de <i>riser</i> flexível [56].....	16
Figura 2.6 – Configuração geométrica dos <i>risers</i> . Adaptado de [74] .....	16
Figura 2.7 – Esquema de um <i>riser</i> de perfuração .....	18
Figura 2.8 – (a) Mesa rotativa e bucha (b) Tubo apoiado na cunha [50].....	19
Figura 2.9 – (a) <i>Diverter</i> Cameron (b) Esquema com as válvulas seletivas [25] .....	20
Figura 2.10 – (a) e (b) Inclinações da junta flexível [83].....	21
Figura 2.11 – Junta telescópica .....	22
Figura 2.12 – (a)Tracionadores de ação direta (b) Tracionadores a cabo [3] .....	23
Figura 2.13 – Juntas de <i>riser</i> , detalhes do acoplamento [2].....	24
Figura 2.14 – Montagem da junta de <i>riser</i> com flutuadores [2] .....	25
Figura 2.15 – (a) Montagem do BOP (b) Descida do BOP pelo <i>moonpool</i> [55].....	26
Figura 2.16 – Configuração do BOP. Adaptado de [52].....	27
Figura 2.17 – Sistema de cabeça de poço submarina. Adaptado de [12].....	29
Figura 3.1 – Projeto de poço com quatro fases [33] .....	30
Figura 3.2 – Esquema da descida do revestimento de superfície e início da fase 3.....	33

Figura 3.3 – Montagem da coluna de revestimento [84] .....	34
Figura 3.4 – (a) Top drive (b) Chaves flutuantes [85] .....	35
Figura 3.5 – Bombeamento de fluido no interior da coluna de revestimento [84] .....	35
Figura 3.6 – (a) Coluna de revestimentos apoiada na cunha (b) Retirada da cunha para descida da coluna [86].....	36
Figura 3.7 – Elevador de tubos, cunha e bucha da mesa rotativa. Adaptado de [25] ....	36
Figura 4.1 – Contato, representação não linear.....	39
Figura 4.2 – Força <i>versus</i> deslocamento .....	39
Figura 4.3 – (a) e (b) Contato do tipo impacto [82] .....	40
Figura 4.4 – (a) e (b) Contato entre superfícies [10].....	41
Figura 4.5 – Contato ligado.....	42
Figura 4.6 – Contato sem separação .....	43
Figura 4.7 – Contato sem atrito.....	43
Figura 4.8 – Contato com fricção.....	44
Figura 4.9 – Contato rugoso.....	45
Figura 4.10 – Método das penalidades [10] .....	46
Figura 4.11 – Métodos de Lagrange e das penalidades [10].....	47
Figura 4.12 – (a) Detecção por ponto de integração (b) Detecção nodal [10] .....	48
Figura 4.13 – Efeito da rigidez no contato [10] .....	49
Figura 5.1 – Metodologia de análise desacoplada [42].....	52
Figura 5.2 – Metodologia de análise acoplada [42] .....	53
Figura 5.3 – Primeiro modelo simplificado [42].....	54
Figura 5.4 – Segundo modelo simplificado [42].....	55
Figura 5.5 – Modelo não linear de viga [42].....	55
Figura 5.6 – Relação não linear força <i>versus</i> deformação [42] .....	56
Figura 5.7 – Modelo não linear de mola [42] .....	56
Figura 5.8 – Relação não linear força <i>versus</i> deflexão [42].....	56
Figura 5.9 – Curva não linear da junta flexível [59] .....	58
Figura 5.10 – Junta flexível. Adaptado de [83].....	59
Figura 5.11 – Barrilete interno da junta telescópica .....	60
Figura 5.12 – Curva tensão <i>versus</i> deformação [42].....	61
Figura 5.13 – Reação do solo no revestimento [38].....	62

Figura 5.14 – Curva p-y típica [38].....	62
Figura 5.15 –Discretização do solo em camadas .....	63
Figura 5.16 – Volumes envoltórios [35] .....	65
Figura 5.17 – Caixas alinhadas aos eixos.....	65
Figura 5.18 – Caixas orientadas .....	66
Figura 5.19 - Polítopos com $n$ orientações discretas.....	66
Figura 5.20 – <i>Bounding box</i> .....	67
Figura 5.21 – <i>Bounding box</i> (contato entre linha).....	68
Figura 5.22 – Distância ponto a reta .....	69
Figura 5.23 – Aproximação parabólica (plano 3D) .....	69
Figura 5.24 - Aproximação parabólica.....	69
Figura 5.25 – Posição relativa entre duas circunferências .....	70
Figura 5.26 – Cálculo dos esforços no ponto de contato .....	70
Figura 6.1 – Amortecimento de Rayleigh [73] .....	74
Figura 7.1 – Força ao longo da coluna de <i>riser</i> .....	77
Figura 8.1 – Comportamento estrutural (SITUA/Prosim) .....	82
Figura 8.2 – Estudo de caso 1 - modelos 1 e 2 (SITUA/Prosim).....	82
Figura 8.3 – Estudo de caso 1 - modelo 1 .....	83
Figura 8.4 – Estudo de caso 1 - modelo 2 .....	83
Figura 8.5 – Discretização do modelo 2 (SITUA/Prosim).....	87
Figura 8.6 – Comportamento estrutural do modelo 1 .....	88
Figura 8.7 – Comportamento estrutural do modelo 2 .....	89
Figura 8.8 – Custo computacional (estudo de caso 1 - modelo 1) .....	89
Figura 8.9 – Custo computacional (estudo de caso 1 – modelo 2) .....	90
Figura 8.10 – Características da sonda.....	91
Figura 8.11 - Sistema de coordenadas utilizado como referência.....	91
Figura 8.12 – Aproamento da sonda .....	92
Figura 8.13 – RAO de <i>heave</i> .....	93
Figura 8.14 – Espectro de JONSWAP .....	94
Figura 8.15 – Perfil de corrente utilizado no estudo .....	94
Figura 8.16 – Estudo de caso 2 .....	96
Figura 8.17 – Contato <i>pipe-in-pipe</i> : (a) ligado (b) desligado (SITUA/Prosim).....	100

Figura 8.18 – Deslocamento ao longo das linhas (caso 2 - modelo 1_ <i>Pipe-in-pipe</i> ligado) .....	100
Figura 8.19 – Deslocamento ao longo das linhas (caso 2 - modelo 2_ <i>Pipe-in-pipe</i> desligado) .....	101
Figura 8.20 – Custo computacional (estudo de caso 2 - modelo 1 – contato ligado) ..	102
Figura 8.21 – Custo computacional (estudo de caso 2 - modelo 2 – contato <i>pipe-in-pipe</i> desligado) .....	102
Figura 8.22 – Esforços no topo (estudo de caso 2 - modelo 1).....	103
Figura 8.23 – Estudo de caso 3 .....	104
Figura 8.24 – <i>Tally</i> do <i>riser</i> de perfuração.....	106
Figura 8.25 – Curva de rigidez axial do barrilete interno da junta telescópica.....	111
Figura 8.26 – Representação dos tracionadores pelo SITUA .....	112
Figura 8.27 – Curva do tracionador .....	113
Figura 8.28 – BOP (SITUA/Prosim).....	117
Figura 8.29 – Curva P-y no intervalo de 0-100 m de profundidade .....	121
Figura 8.30 – Curva P-y no intervalo de 100-200 m de profundidade .....	121
Figura 8.31 - Curva P-y no intervalo de 200-300 m de profundidade .....	122
Figura 8.32 - Curva P-y no intervalo de 1900-2000 m de profundidade .....	122
Figura 8.33 – Detalhamento do modelo .....	124
Figura 8.34 – Esforços ao longo do <i>riser</i> de perfuração e da coluna do revestimento intermediário .....	125
Figura 8.35 – Momento ao longo do <i>riser</i> de perfuração e da coluna do revestimento intermediário .....	126
Figura 8.36 – von Mises ao longo do <i>riser</i> de perfuração/poço revestido e da coluna do revestimento intermediário.....	126
Figura 8.37 - Custo computacional (estudo de caso 3 – <i>riser</i> , sem coluna) .....	127
Figura 8.38 - Custo computacional (estudo de caso 3 – coluna 1200 m) .....	127
Figura 8.39 - Custo computacional (estudo de caso 3 – coluna 2000 m) .....	128
Figura 8.40 – Estudo de caso 4 .....	129
Figura 8.41 – Transição na coluna (SITUA/Prosim) .....	130
Figura 8.42 – Deslocamento da sonda .....	133
Figura 8.43 - Configuração inicial do estudo de caso 4.....	134
Figura 8.44 – Configuração final do estudo de caso 4.....	134

Figura 8.45 - Tensões de von Mises ao longo da coluna de trabalho/revestimento de superfície.....	135
Figura 8.46 – Tensão de von Mises ao longo da coluna de trabalho/revestimento de superfície ( <i>offset</i> 53 m).....	136
Figura 8.47 - Tensões de von Mises (topo da coluna de trabalho/revestimento).....	136
Figura 8.48 - Tensões de von Mises na coluna de trabalho/revestimento ( <i>mudline</i> )...	137
Figura 8.49 – Esforços ao longo da coluna de trabalho/revestimento de superfície....	138
Figura 8.50 - Custo computacional (estudo de caso 4) .....	139
Figura A.10.1 – RAO de surge .....	152
Figura A.10.2 – RAO de sway .....	152
Figura A.10.3 – RAO de roll.....	153
Figura A.10.4 – RAO de pitch .....	153
Figura A.10.5 – RAO de yaw .....	154
Figura A.10.6 – Deslocamento horizontal da barra vertical: Abaqus x Prosim.....	157
Figura A.10.7 – Deslocamento horizontal da barra vertical: Abaqus x Prosim.....	158

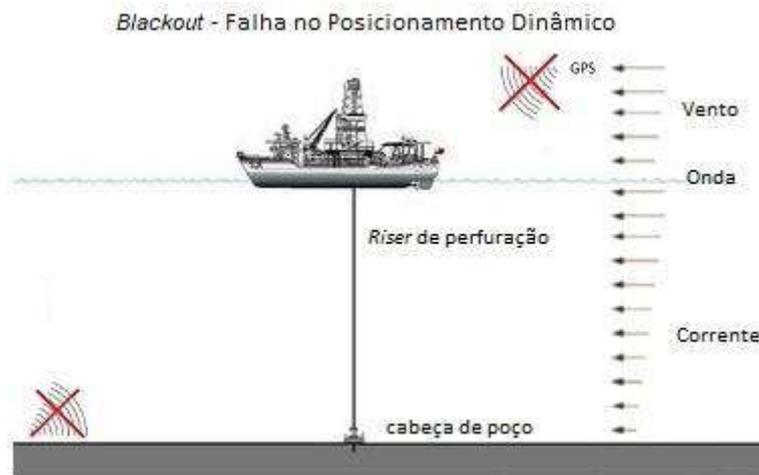
# LISTA DE TABELAS

Tabela 8.1 – Propriedades físicas e geométricas da viga 1 .....	84
Tabela 8.2 – Propriedades físicas e geométricas da viga equivalente.....	84
Tabela 8.3 – Propriedades físicas e geométricas da viga <i>pipe-in-pipe</i> .....	85
Tabela 8.4 – Coordenadas dos modelos 1 .....	86
Tabela 8.5 – Coordenadas dos modelos 2.....	86
Tabela 8.6 – Características da malha das vigas cilíndricas .....	87
Tabela 8.7 – Dados do amortecimento de Rayleigh .....	87
Tabela 8.8 – Características da sonda .....	91
Tabela 8.9 – Coordenadas da sonda de perfuração .....	92
Tabela 8.10 – Dados de vento .....	94
Tabela 8.11 – Dados do amortecimento de Rayleigh .....	95
Tabela 8.12 – Propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas da linha externa ....	97
Tabela 8.13 – Propriedades físicas e geométricas da linha interna.....	97
Tabela 8.14 – Características das malhas do estudo de caso 1 .....	98
Tabela 8.15 – Coordenadas da linha externa .....	98
Tabela 8.16 – Coordenadas da linha interna .....	99
Tabela 8.17 – Parâmetros de análise .....	99
Tabela 8.18 – Parâmetros de análise .....	105
Tabela 8.19 – Dados do <i>tally</i> da coluna de <i>riser</i> .....	107
Tabela 8.20 – Características da malha do <i>riser</i> de perfuração .....	108
Tabela 8.21 – Coordenadas da mesa rotativa.....	108
Tabela 8.22 – Coordenadas da cunha.....	109
Tabela 8.23 – Propriedades físicas e geométricas do <i>diverter</i> .....	109
Tabela 8.24 - Propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas das juntas flexíveis .....	110
Tabela 8.25 – Propriedades geométricas e físicas do barrilete interno .....	111
Tabela 8.26 – Propriedades geométricas e físicas do anel tracionador.....	111
Tabela 8.27 – Propriedades geométricas, físicas e hidrodinâmicas do barrilete externo .....	112

Tabela 8.28 – Propriedades geométricas e físicas do tracionador .....	113
Tabela 8.29 – Propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas das juntas com flutuadores.....	114
Tabela 8.30 – Propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas das juntas com flutuadores.....	115
Tabela 8.31 – Propriedades físicas, geométricas das juntas sem flutuadores .....	115
Tabela 8.32 – Propriedades físicas, geométricas dos <i>pup joints</i> .....	116
Tabela 8.33 – Propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas do LMRP .....	116
Tabela 8.34 – Propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas do BOP <i>Stack</i> .....	117
Tabela 8.35 – Propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas do sistema de cabeça de poço submarina.....	118
Tabela 8.36 – Propriedades físicas e geométricas do condutor e do revestimento de superfície .....	119
Tabela 8.37 – Características da malha dos revestimentos do poço .....	119
Tabela 8.38 – Propriedades do solo para geração da curva P-y.....	120
Tabela 8.39 – Propriedades físicas e geométricas da coluna do revestimento intermediário .....	123
Tabela 8.40 – Características da malha da coluna do revestimento intermediário .....	123
Tabela 8.41 – Propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas da coluna de trabalho/revestimento de superfície .....	131
Tabela 8.42 – Características da malha da coluna de trabalho/revestimento de superfície .....	131
Tabela 8.43 – Propriedades físicas e geométricas do condutor .....	132
Tabela 8.44 – Características da malha do condutor.....	132
Tabela 8.45 – Parâmetros da análise .....	133
Tabela 8.46 – Tensões de von Mises (topo da coluna de trabalho) .....	137
Tabela 8.47 – Tensões de von Mises ( <i>mudline</i> ) .....	138
Tabela 8.48 – Força ao longo da coluna de trabalho/revestimento de superfície .....	138
Tabela 10.1 – Dados da curva P-y, camadas 1 a 4.....	155
Tabela 10.2 – Dados da curva P-y, camadas 5 a 8.....	155
Tabela 10.3 – Dados da curva P-y, camadas 9 a 12.....	155
Tabela 10.4 – Dados da curva P-y, camadas 13 a 16.....	156
Tabela 10.5 – Dados da curva P-y, camadas 17 a 20.....	156

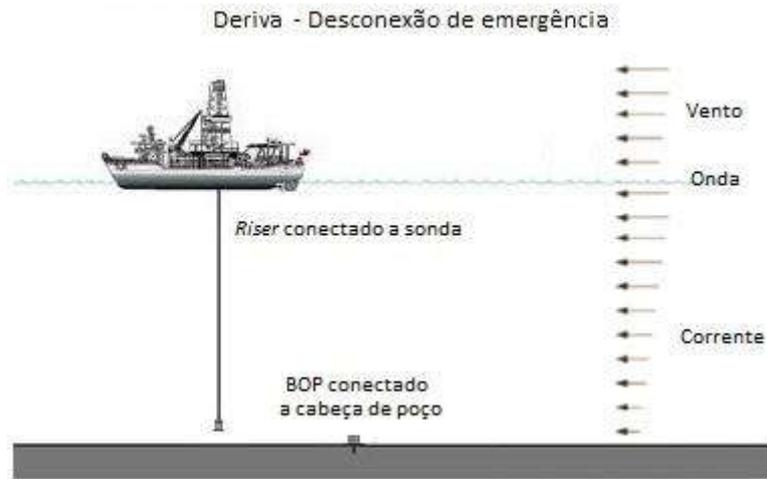
# 1 INTRODUÇÃO

Nas operações de exploração de petróleo, sobretudo no cenário *offshore*, o contato entre estruturas ou equipamentos podem ocorrer de diversas formas, como por exemplo, em uma situação de *blackout* de uma sonda de perfuração equipada com Posicionamento Dinâmico – DP, na qual uma pane elétrica no sistema de posicionamento conjuntamente com a ação dos carregamentos ambientais poderá direcionar a unidade de perfuração a entrar em estado de deriva, visto que a perda de funcionamento dos propulsores impede a restauração de sua posição (Figura 1.1).



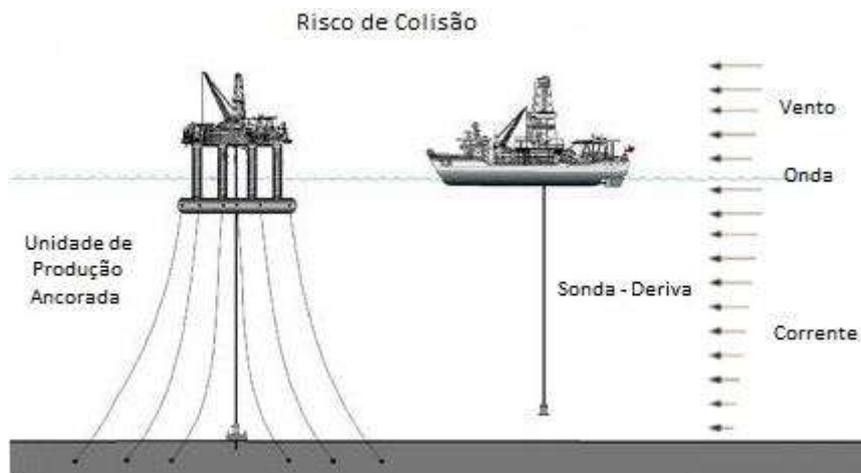
**Figura 1.1 – *Blackout* - Falha no posicionamento dinâmico. Adaptado de [37]**

Conforme a sonda vai se distanciando da sua posição em função do estado de deriva, a fim de evitar um colapso da coluna de *riser*, há a necessidade de realizar um procedimento de desconexão visto que a coluna, em sua extremidade inferior, está conectada à cabeça do poço. Após a desconexão a sonda deriva com o *riser* de perfuração suspenso (Figura 1.2).



**Figura 1.2 – Deriva - Desconexão de emergência. Adaptado de [37]**

Nesta situação, a sonda pode se aproximar de uma unidade de produção ancorada na mesma localidade, havendo assim risco da colisão entre o *riser* de perfuração e as linhas de ancoragem ou com as linhas de produção. Se isto ocorrer, a linha de ancoragem pode exceder seu limite de carga e romper, por sua vez o *riser* de perfuração pode ser danificado ou se prender na linha de ancoragem, guiando a unidade de perfuração em deriva ao encontro da unidade de produção (Figura 1.3) [27].

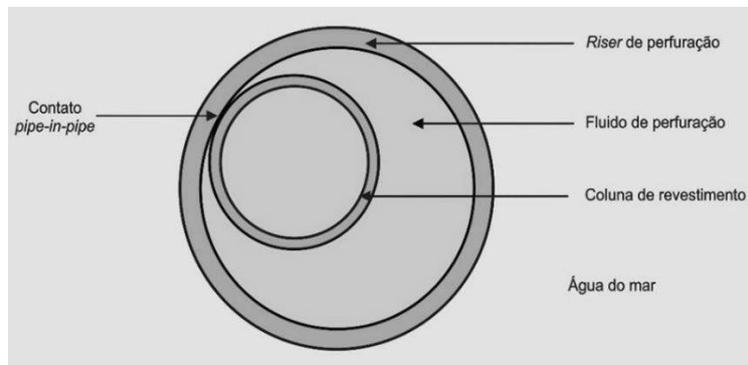


**Figura 1.3 – Risco de colisão. Adaptado de [37]**

Ainda no cenário *offshore*, existem outras situações mais específicas onde o contato entre estruturas ou equipamentos podem existir como por exemplo nas operações de perfuração, revestimento, cimentação, completação, produção ou injeção de um poço.

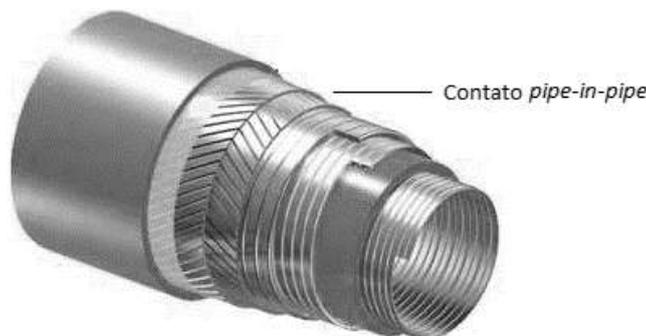
Neste contexto o termo *pipe-in-pipe* é largamente empregado para referir-se a uma geometria composta por um tubo interno a outro, ou seja, quando uma estrutura tubular de menor diâmetro está envolvida por outra de maior diâmetro, o espaço entre a parede externa do duto de menor diâmetro e a parede interna do duto de maior diâmetro é chamado de espaço anular, este, pode estar livre ou preenchido por algum fluido ou material.

A Figura 1.4 apresenta um exemplo de contato *pipe-in-pipe*, onde temos a vista superior de um tubo de revestimento interno a uma junta de *riser*, o revestimento está descentralizado em relação a estrutura de maior diâmetro, sendo que parte da área de sua parede externa encontra-se em contato com parte da área da parede interna do *riser* [27, 74].



**Figura 1.4 – Descida de revestimento**

Os *risers* flexíveis de produção também são um exemplo de estruturas *pipe-in-pipe* onde o espaço anular está preenchido por várias camadas composta de materiais diferentes (Figura 1.5).



**Figura 1.5 – Seção do riser de produção [56]**

Na perfuração de um poço submarino as manobras realizadas pela coluna de perfuração, as operações de descida de revestimentos e ferramentas pelo interior da coluna de *riser* são outros exemplos de *pipe-in-pipe*, entretanto, nestas operações o espaço anular está preenchido por fluido ou vazio em casos de perda de circulação.

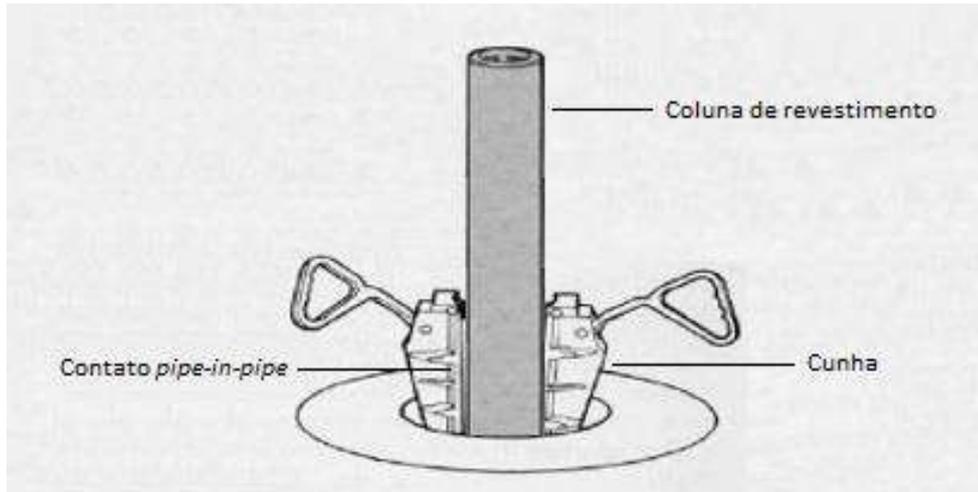
Por exemplo, quando a broca está perfurando, a coluna de perfuração interna ao *riser* e ao poço encontra-se sobre rotação, contatos e impactos podem ocorrer continuamente ao longo da estrutura, sendo que as vibrações ao longo da coluna representam um parâmetro determinante na eficiência da perfuração (Figura 1.6), uma vez que, não sejam controladas, podem resultar em fadiga das tubulações, falha prematura dos componentes da coluna, redução da vida útil da broca, mudanças abruptas na direção do poço [11].



**Figura 1.6 – Vibrações na coluna de perfuração [11]**

Em casos mais extremos as vibrações laterais combinadas com as torcionais, causadas pela excentricidade dos tubos, podem levar a coluna de perfuração assumir uma geometria helicoidal, logo a mesma entrará em contato com a parede interna do *riser* e do poço [22].

Nas manobras de descida de revestimentos realizadas após a perfuração de cada fase do poço, em determinados momentos do procedimento como por exemplo no acoplamento das juntas, o contato *pipe-in-pipe* ocorre no topo da estrutura onde a coluna de revestimentos permanece suspensa sendo o peso da mesma apoiada na cunha da mesa rotativa para que uma nova junta seja adicionada à seção (Figura 1.7).



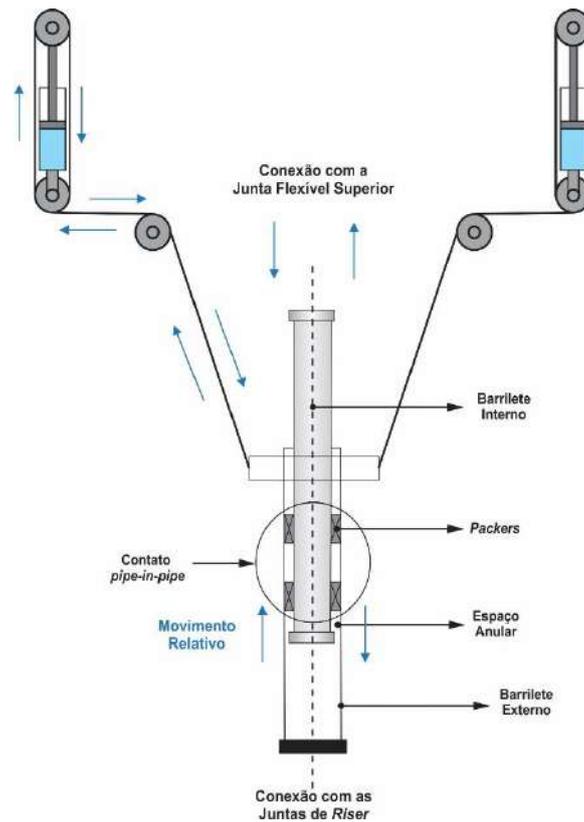
**Figura 1.7 – Coluna de revestimento apoiada na cunha da mesa rotativa.**

**Adaptado de [83]**

Note que apesar do contato *pipe-in-pipe* ocorrer no topo da estrutura busca-se ao longo da coluna de revestimento mitigar o contato *pipe-in-pipe* visto que o mesmo afeta a eficiência das operações realizadas pelo interior da coluna de *riser* e do poço [21, 62].

Possíveis acidentes, como choques entre a parede interna do *riser* ou do poço com a coluna de revestimento ou o rompimento da coluna de revestimento podem causar danos irreversíveis impedindo assim a continuidade da operação, ocasionando paradas para manutenção ou em casos mais extremos inviabilizando o projeto.

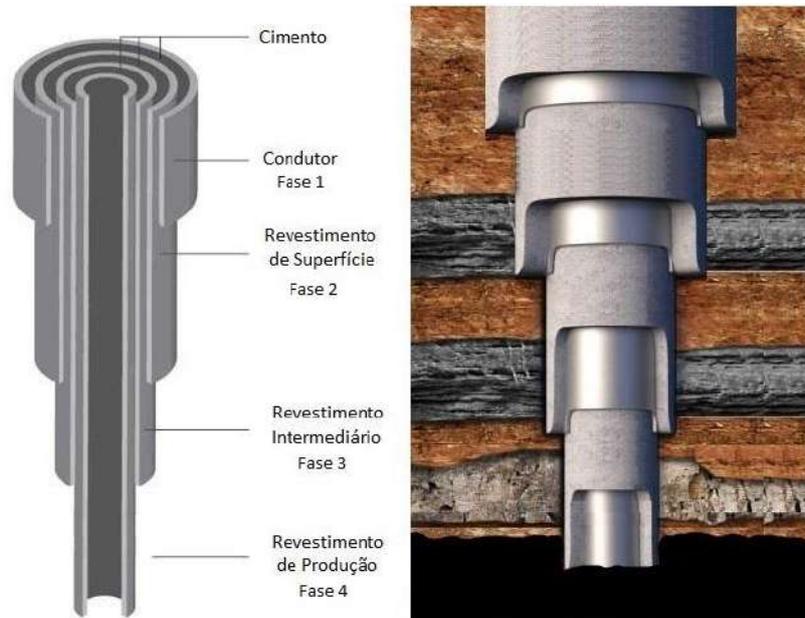
Entretanto, em outras situações o contato deve existir pois o mesmo é inerente ao funcionamento dos equipamentos, podemos citar como exemplo, a dinâmica do movimento dos barriletes interno e externo de uma junta telescópica, onde o contato se faz presente por meio dos *packers* (Figura 1.8).



**Figura 1.8 – Junta telescópica**

Outra situação na qual o contato é inerente encontra-se na arquitetura de um poço onde alguns equipamentos como alojadores, suspensores de revestimentos, revestimentos e buchas, após a sua instalação comportam-se como estruturas *pipe-in-pipe*.

A Figura 1.9 apresenta um poço composto por quatro fases observe que após a cimentação o espaço anular entre os revestimentos encontra-se preenchido, entretanto, em algumas situações o cimento não atinge o topo do revestimento, este cenário, pode ser modelado como uma estrutura *pipe-in-pipe* podendo assim simular quais as consequências no projeto devido a falhas na cimentação.



**Figura 1.9 - Poço de petróleo. Adaptado de [33, 53]**

Em todos os exemplos citados anteriormente o contato está presente, em geral as ações de contato são o mecanismo mais comum para as transferências de forças entre estruturas ou sólidos, na prática a grande maioria das aplicações de mecânica estrutural envolve algum tipo de contato sendo que em alguns casos o mesmo deve ser evitado entretanto em outros o contato é fundamental para o funcionamento das estruturas ou equipamentos [77, 78].

O fato é que frequentemente os projetistas de sistemas ou estruturas *offshore* precisam lidar com situações que envolvem interações entre estruturas ou equipamentos, sendo que geralmente modelos teóricos, experimentais ou modelos numéricos são utilizados como ferramentas para estudar os efeitos deste fenômeno físico nos projetos.

Citando novamente como exemplo as operações de perfuração, revestimento, cimentação, completação, produção ou injeção de um poço *offshore*, importante ressaltar que boa parte dos procedimentos destas operações são realizadas pelo interior de um *riser* submarino sendo este a ligação física entre a cabeça de poço submarina e a plataforma na superfície.

A abordagem mais comum para determinar a operação segura de um *riser* de perfuração é conduzir simulações numéricas. Com base nos dados de entrada das condições ambientais esperadas, propriedades da embarcação e nas respostas estáticas e

dinâmicas do *riser* obtêm-se os resultados das análises, normalmente estes determinam envelopes operacionais seguros onde os limites são definidos.

Na maioria desses problemas, faz-se necessário utilizar modeladores que possam reproduzir as diversas formas geométricas utilizadas, bem como gerar a malha de elementos finitos correspondente.

Usualmente em análises globais as estruturas modeladas empregam o método de elementos finitos de pórtico, este método provou-se eficiente para avaliar, o comportamento dinâmico, os modos de vibração, os esforços, deslocamentos e curvaturas destas estruturas. Diversas ferramentas sofisticadas de análise de *risers* foram desenvolvidas como por exemplo os softwares Flexicon, DeepRiser, Orcaflex Situa/Prosim [37, 59, 80].

As operadoras estão cada vez mais apreciando os benefícios que os sistemas de gerenciamento de *riser* oferecem para melhorar a operabilidade, aumentar a vida útil dos equipamentos e, principalmente, definir parâmetros seguros para a condução dos procedimentos.

Procurou-se descrever nesta seção exemplos e conceitos gerais que envolvem os aspectos de contato entre estruturas ou equipamentos *offshore*, bem como apresentar as principais técnicas e ferramentas utilizadas pelos projetistas para estudar os efeitos deste fenômeno físico. Nas seções a seguir 1.1 e 1.2 é apresentado de forma mais detalhada a proposta de pesquisa e estudo desta dissertação.

## 1.1 Contexto e Motivação

Boa parte da complexidade do controle de processos exploratórios *offshore* no atual cenário petrolífero mundial advém de instabilidades impostas pelos carregamentos ambientais, distâncias da costa e profundidade da lâmina d'água de operação.

Como solução técnica e econômica a indústria tem investido muito nos últimos anos no desenvolvido de novas tecnologias e metodologias relacionadas a eficiência nos procedimentos de perfuração.

O estudo do comportamento dos elementos que compõem um sistema de perfuração, como por exemplo, plataformas, *risers*, equipamentos de segurança de poço, sistemas de cabeça de poço tornaram-se objeto de estudo nos centros de pesquisa.

Motivado principalmente pela necessidade do conhecimento prévio dos cenários de exploração antes mesmo do início das operações, principalmente em águas profundas e ultraprofundas, fez com que atualmente as operadoras considerem imprescindível o uso de ferramentas sofisticadas para simulações detalhadas destes cenários, sendo assim análises globais são largamente aplicadas em modelos de estruturas delgadas com seção circular, como por exemplo em análises de *riser*.

A modelagem de um sistema de *riser* envolve interações entre a unidade flutuante, o *riser* e o solo, a não linearidade presente nestes problemas pode trazer dificuldades na convergência destas análises dinâmicas, o contato por exemplo é um importante tipo de não linearidade comum nestas análises.

Em geral análises que envolvem problemas de contato podem ser realizadas a partir de modelos teóricos, experimentais ou modelos numéricos, separadamente ou em conjunto, porém, em boa parte destes problemas as soluções analíticas apresentam limitações, muitas vezes as formulações analíticas são impossíveis de serem resolvidas.

As análises experimentais com modelos ensaiados em laboratório apresentam desvantagens como: o tempo para efetuar o grande número de ensaios, disponibilidade de laboratórios ou em alguns casos altos investimento na construção destes, além da necessidade de montagem dos modelos físicos.

Com um custo relativamente menor as técnicas de simulação numérica possuem a vantagem de permitir uma série de testes nas estruturas ou nos protótipos possibilitando assim maior flexibilidade em relação a mudanças de projeto, principalmente antes da fase de execução.

Apesar das técnicas de simulação numéricas apresentarem um custo relativamente menor, as formulações implementadas na solução dos problemas de contato podem aumentar o custo computacional encarecendo assim essa técnica.

Importante ressaltar que em função da complexidade que envolve a modelagem e a solução dos problemas de contato o custo computacional justifica-se, o que pode inviabilizar essa técnica é a forma de implementação. Neste contexto, faz-se importante o entendimento e o estudo das metodologias utilizadas na implementação das soluções dos problemas de contato.

## 1.2 Objetivo

Apresentar uma metodologia para identificação de problemas de contato do tipo *pipe-in-pipe* entre corpos deformáveis, baseada na interpenetrabilidade volumétrica, em análises globais de estruturas esbeltas de seção circular, modeladas através de elementos finitos de pórtico.

Configurar a modelagem de um sistema de *riser* de perfuração, realizar simulações estáticas e dinâmicas, estudar o comportamento da operação de descida de tubos de revestimento de poços de petróleo e reportar os esforços envolvidos na operação.

## 1.3 Estruturação do Texto

O Capítulo 2 apresenta o conceito de unidades móveis de perfuração, sendo este aplicado às plataformas *offshore* com boa capacidade de locomoção, optou-se também por inserir neste capítulo o conceito de *riser* de perfuração uma vez que esta estrutura e seus equipamentos formam um sistema integrado com as unidades móveis.

O Capítulo 3 apresenta as especificações dos revestimentos e uma descrição da operação de descida da coluna de revestimento em um poço submarino.

O Capítulo 4 aborda os problemas de contato, apresentando os tipos de contato mais comuns modelados em programas de métodos dos elementos finitos e suas formulações.

Enquanto que no Capítulo 5, baseado nas normas ISO 13264-1 [41], ISO 13264-2 [42], API RP 16Q [4] e API RP 2GEO [5] é apresentada a metodologia de análise utilizada na modelagem de um *riser* de perfuração interagindo com o solo e com os revestimentos de um poço assim como a metodologia de análise do contato *pipe-in-pipe*.

O Capítulo 6 apresenta os conceitos de amortecimento, logo após, o Capítulo 7 apresenta os critérios operacionais utilizados em análises de *risers* de perfuração.

No Capítulo 8 são apresentados os quatro estudos de caso, os aspectos envolvidos na modelagem e os resultados das simulações numéricas.

Por fim o Capítulo 9, apresenta as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros. Sequencialmente as Referências Bibliográficas e os Apêndices complementam o texto da dissertação.

## 2 UNIDADES MÓVEIS DE PERFURAÇÃO

### 2.1 Introdução

As sondas de perfuração rotativa são estruturas de aço no formato de uma torre, composta por um conjunto de equipamentos utilizados para realizar operações de perfuração, completação e intervenção em poço.

Estão equipadas com sistema de sustentação e elevação de cargas, sistema de circulação e tratamento de fluidos, perfuração e completação, sistema de rotação da coluna de perfuração, sistema de segurança de poço, sistema de geração e transmissão de energia e sistemas de monitoração.

As sondas, em relação a sua estrutura de suporte, podem estar em terra ou montadas em uma estrutura marítima como em plataformas fixas ou flutuantes [36].

As unidades móveis de perfuração são plataformas flutuantes localizadas em ambiente marítimo, seu tipo de estrutura, material e resistência são fabricadas de acordo com a sua funcionalidade, condições ambientais, profundidade da lâmina d'água, condições e tempo de operação, as unidades mais utilizadas são as autoelevatórias, as semissubmersíveis, os navios-sonda e as monocolunas [12, 16].

Com exceção das autoelevatórias as demais unidades móveis flutuantes de perfuração podem ser fundeadas por meio de âncoras, entretanto, atualmente o posicionamento e estabilidade destas unidades é realizado por posicionamento dinâmico, onde não existe ligação física da plataforma com o fundo do mar, exceto a dos equipamentos de perfuração que atingem o leito marinho, sensores acústicos determinam a deriva da unidade flutuante, e propulsores no casco, *thrusters*, acionados por computador, restauram a posição da plataforma [12, 60].

#### 2.1.1 Plataforma Autoelevatória

As plataformas autoelevatórias (Figura 2.1) são constituídas basicamente de uma balsa equipada com estruturas de apoio, três ou mais pernas de tamanho variável, que, acionadas através de um sistema elétrico ou hidráulico, movimentam-se mecanicamente, através de engrenagens, para baixo ou para cima.

Para fixação em uma locação, as pernas são acionadas para baixo até atingirem o fundo do mar. Em seguida inicia-se a elevação da plataforma acima do nível da água, a uma altura segura e fora da ação das ondas [16, 36].

Devido a estabilidade estrutural a perfuração através dessa plataforma é similar à perfuração *onshore*, sendo que o controle de poço pode ser feito na superfície, onde o *Blowout Preventer* - BOP está instalado.



**Figura 2.1 – Plataforma autoelevatória [49]**

Apesar da construção de autoelevatórias de nova geração, o limite operacional é de até 200 m de lâmina d'água, o que as torna pouco usuais no atual cenário petrolífero mundial onde a maioria dos poços explorados estão localizados em águas profundas e ultraprofundas [36, 49].

### 2.1.2 Plataforma Semissubmersível

As plataformas semissubmersíveis (Figura 2.2) são unidades compostas de uma estrutura com um ou mais conveses, apoiados sobre colunas, as quais por sua vez se apoiam em flutuadores submersos, os *pontoons*.

Os modelos mais comuns possuem de quatro a seis colunas e de dois a quatro *pontoons*, quando em movimento, devido a sua capacidade de flutuação, apresentam boa mobilidade, o transporte de uma locação para outra é realizado através de operações de reboque ou pelo próprio sistema de propulsão.

Por suas características as semissubmersíveis são usadas tanto para produção quanto para perfuração sendo que o controle de poço é realizado no fundo do mar onde está instalado o BOP, podendo operar em águas profundas e ultraprofundas [16, 49].



**Figura 2.2 - Plataforma semissubmersível [49]**

### 2.1.3 Navio-Sonda

Os navios-sonda são unidades flutuante com casco em forma de navio, sua maior capacidade de carga lhe confere autonomia para operar a grandes distâncias da costa permitindo o alcance a maiores profundidades, como por exemplo, o navio-sonda Maersk Venturer (Figura 2.3) que está equipado para perfurar em águas ultraprofundas, em 2016,

perfurou um poço a 250 km da costa do Uruguai em lâmina d'água de 3400 metros, estabelecendo um novo recorde mundial [75].

Nestas unidades a torre de perfuração está localizada no centro do navio, onde uma abertura no casco, o *moonpool*, permite a passagem da coluna de perfuração, o sistema de controle de poço também é posicionado no solo marinho, sendo a operação do navio dependente das condições ambientais, principalmente do movimento de *heave*, em casos extremos há a necessidade de interrupção das operações de perfuração [48].



**Figura 2.3 – Navio-Sonda Maersk Venturer [48]**

#### 2.1.4 Monocoluna

As monocolunas, conforme ilustra a Figura 2.4, são uma alternativa frente aos limites operacionais impostos pelos carregamentos ambientais, estas unidades são baseadas na tecnologia de construção de um casco cilíndrico assemelhando-se a uma plataforma *Spar*, entretanto, com um calado menor, apresentam boa capacidade de armazenamento e boa relação de peso de convés [26].

O casco tem como característica um duplo fundo e duplo costado para reduzir os riscos de perda de estabilidade e poluição em caso de vazamento, o casco reforçado também confere maior confiabilidade para operações em águas congeladas [67].

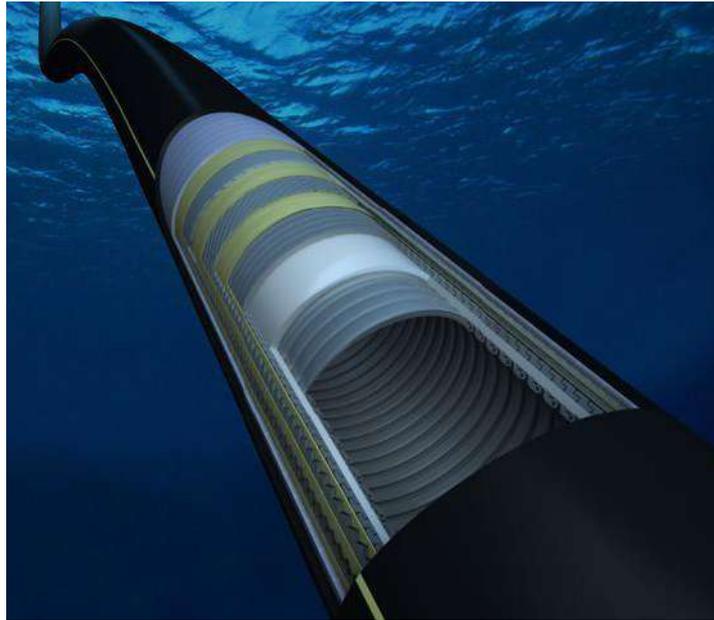


**Figura 2.4 - Monocoluna Sevan Brasil, fabricada em 2012 [67]**

## 2.2 *Risers*

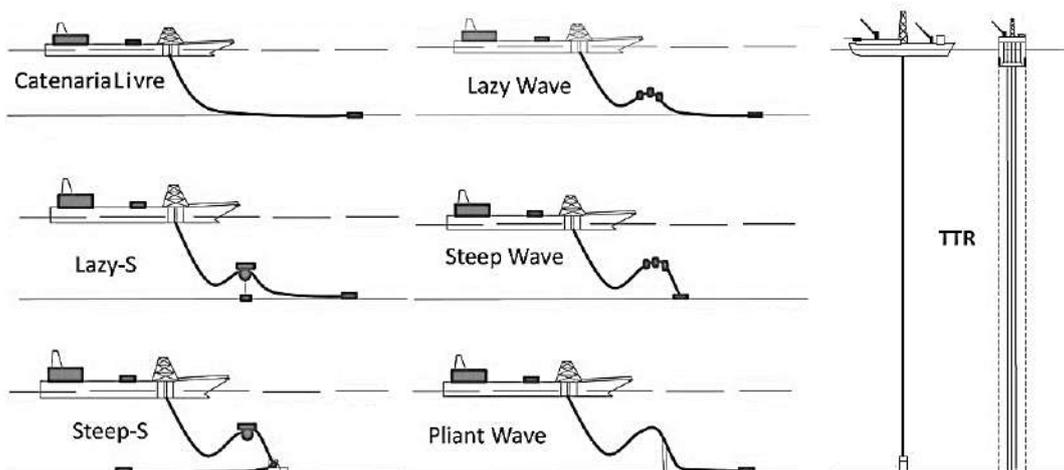
De forma abrangente *risers* são estruturas tubulares esbeltas cujo objetivo é conectar a cabeça de poço submarina à unidade flutuante, tal denominação também tem sido utilizada para se referir aos trechos de tubulação, igualmente suspensos em unidades de produção. Existem vários tipos de *risers* e estes podem ser classificados de acordo com sua constituição estrutural, configuração geométrica e finalidade [36].

Quanto a sua constituição estrutural, os *risers* podem ser classificados como rígidos ou flexíveis. Os rígidos, geralmente em aço, são compostos por juntas de tubos soldadas ou acopladas, enquanto que os flexíveis (Figura 2.5) são produzidos a partir do entrelaçamento entre materiais poliméricos, que conferem isolamento e proteção, e armaduras que lhes garantem resistência mecânica [56].



**Figura 2.5 – Seção de *riser* flexível [56]**

Conforme ilustra a Figura 2.6 a configuração geométrica dos *risers* flexíveis podem apresentar-se na forma de catenária livre, *lazy wave*, *lazy s*, *steep wave*, *steep s* ou *pliant wave*, por sua vez, os *risers* rígidos, além de algumas configuração combinadas com as linhas flexíveis, também apresentam a configuração vertical, denominado de *riser* tracionado no topo, *Top Tensioned Riser – TTR* [27, 74].



**Figura 2.6 – Configuração geométrica dos *risers*. Adaptado de [74]**

Por fim quanto à sua finalidade, os *risers* podem ser utilizados para as atividades de perfuração, completção, exportação, produção ou injeção.

## 2.3 *Riser* de Perfuração

Apresentando uma geometria vertical o *riser* de perfuração é uma coluna formada por juntas de *riser* e equipamentos específicos, tem como funções principais proteger e guiar a coluna de perfuração permitindo sua passagem pelo seu interior, bem como retornar o fluido de perfuração e os detritos do poço para a superfície.

As juntas geralmente são fabricadas em aço, apesar de já existirem no mercado *risers* de perfuração de materiais alternativos, como alumínio e compósitos. A configuração da coluna apresenta trechos onde as juntas estão equipadas com e sem flutuadores, enquanto que os equipamentos possuem funções específicas como por exemplo reduzir os esforços da estrutura, prover segurança ou compensar e permitir o movimento relativo da coluna de *riser* em relação a sonda [27, 74].

Embora os *risers* de perfuração operem essencialmente de uma forma eles podem ser usados de três modos distintos: conectado, suspenso e desconectado.

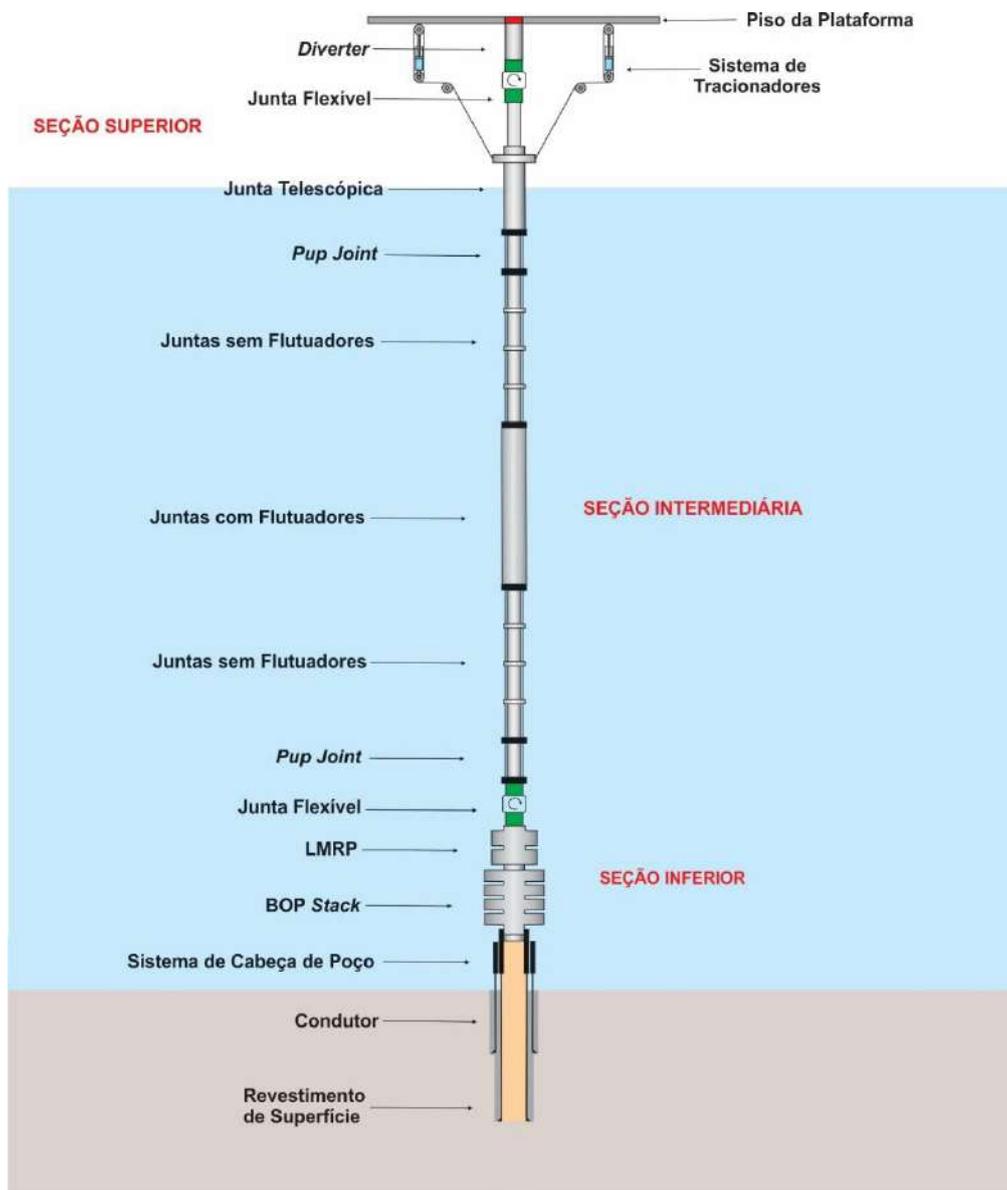
A maior parte de sua vida útil o *riser* opera no modo conectado. Nessa condição as principais preocupações são as respostas estáticas e dinâmicas da estrutura, induzida pelos movimentos da unidade de perfuração. O modo conectado pode ser dividido em condição operacional e condição não operacional.

Na operacional as condições ambientais e do poço favorecem, de forma segura, a continuidade dos procedimentos normais de perfuração, por sua vez, na condição não operacional os procedimentos normais de perfuração não podem continuar, entretanto, o *riser* pode permanecer conectado, neste caso apenas as operações de circulação são executadas, nestas condições os operadores, devem estar em estado de alerta, para uma eventual desconexão de emergência [52, 80].

O modo suspenso, ocorre nos estágios iniciais da perfuração, onde ao final da fase dois, o *riser* é utilizado para instalar o BOP, à medida que o equipamento se aproxima do leito marinho o *riser* pode ser danificado por uma “aterrissagem” ou impacto severo.

Por fim, o modo desconectado, ocorre quando as condições ambientais excedem a janela operacional, nestes casos, em procedimentos de desconexão de emergência, deve-se tomar medidas para assegurar que os esforços, decorrentes desta ação, não resultem em deformações permanente ao *riser* [42].

Basicamente, o *riser* de perfuração pode ser dividido em três seções: uma seção superior formada pelo *diverter*, junta flexível, sistema de tracionadores e junta telescópica, uma seção intermediária, formada pelas juntas de *risers* configuradas com e sem flutuadores, *pup joints* que são juntas menores de tamanhos variáveis para ajustar o tamanho da coluna, e por fim uma seção inferior, composta por uma junta flexível, pelos equipamentos de segurança do poço, *Lower Marine Riser Package - LMRP* e *BOP Stack*, e pelo sistema de cabeça de poço submarina. A Figura 2.7 ilustra uma vista esquemática de um *riser* de perfuração [4].



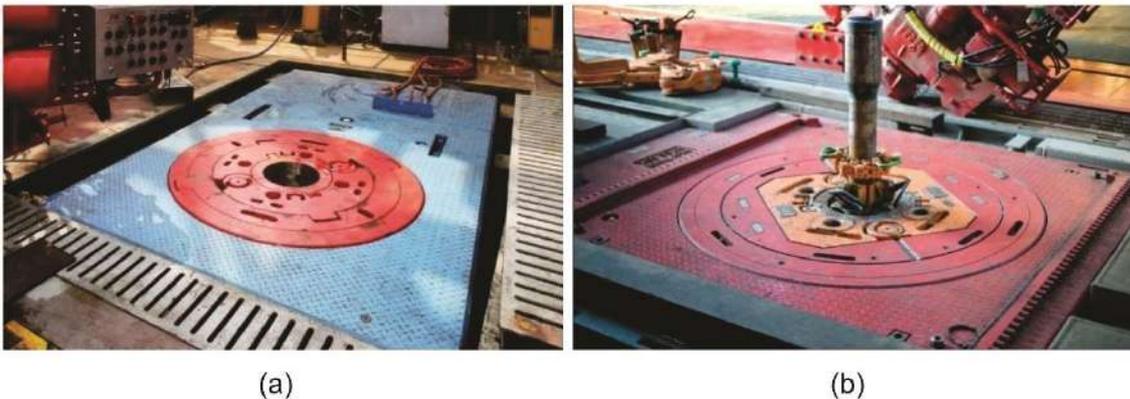
**Figura 2.7 – Esquema de um *riser* de perfuração**

### 2.3.1 Mesa Rotativa

Em sondas terrestres a mesa rotativa (Figura 2.8a) é o equipamento mecânico responsável pela transmissão de rotação à coluna de perfuração, ela recebe energia sob forma de rotação no plano horizontal e a transforma em rotação vertical, que por sua vez é transmitida à coluna de perfuração. A utilização da mesa rotativa como ferramenta capaz de rotacionar a coluna de perfuração, depende do uso concomitante de outros equipamentos como o *kelly* e o *swivel* [76].

Em sondas *offshore* a função outrora desempenhada pela mesa rotativa foi substituída pelo *top drive* sendo este agora o equipamento que permite a manobra da coluna de perfuração com rotação e circulação de fluidos, entretanto, a mesa rotativa continua sendo usada para suportar o peso da coluna durante as manobras de perfuração e descida de revestimento, tal procedimento é conhecido como acunhamento, visto que a sustentação da coluna se dá através de uma ferramenta chamada cunha, que é encaixada na bucha da mesa rotativa (Figura 2.8b) [22].

Não menos importante a mesa rotativa é comumente referenciada como o ponto zero da coluna de *riser* de perfuração visto que a mesma está instalada no piso da plataforma e os demais componentes da coluna são posicionados abaixo da mesa rotativa.



**Figura 2.8 – (a) Mesa rotativa e bucha (b) Tubo apoiado na cunha [50]**

### 2.3.2 Diverter

O *diverter* (Figura 2.9) é um equipamento de segurança utilizado na perfuração para o controle de poço, trabalha a baixas pressões e é utilizado para redirecionar o fluxo do fluido invasor. Em sondas flutuantes geralmente é montado na subestrutura da plataforma, ficando localizado no topo do *riser* logo abaixo da mesa rotativa.

O equipamento é acionado quando um fluxo raso de gás é encontrado durante a perfuração ou em caso de ocorrência de *kick*, quando parte do fluido invasor passa para o interior da coluna de *riser* antes do fechamento do BOP [11].

Nestes casos o preventor anular do *diverter* é acionado e um sistema desviador é usado como dispositivo de segurança, o objetivo é impedir que o fluido invasor alcance o piso da plataforma, sendo o mesmo redirecionado pela linha desviadora para um dos bordos da plataforma, em geral para uma área a favor do vento. Normalmente, as válvulas seletivas localizadas em cada linha desviadora podem ser operadas separadamente, para que os plataformistas possam desviar o fluxo na direção correta [25, 47].



**Figura 2.9 – (a) *Diverter* Cameron (b) Esquema com as válvulas seletivas [25]**

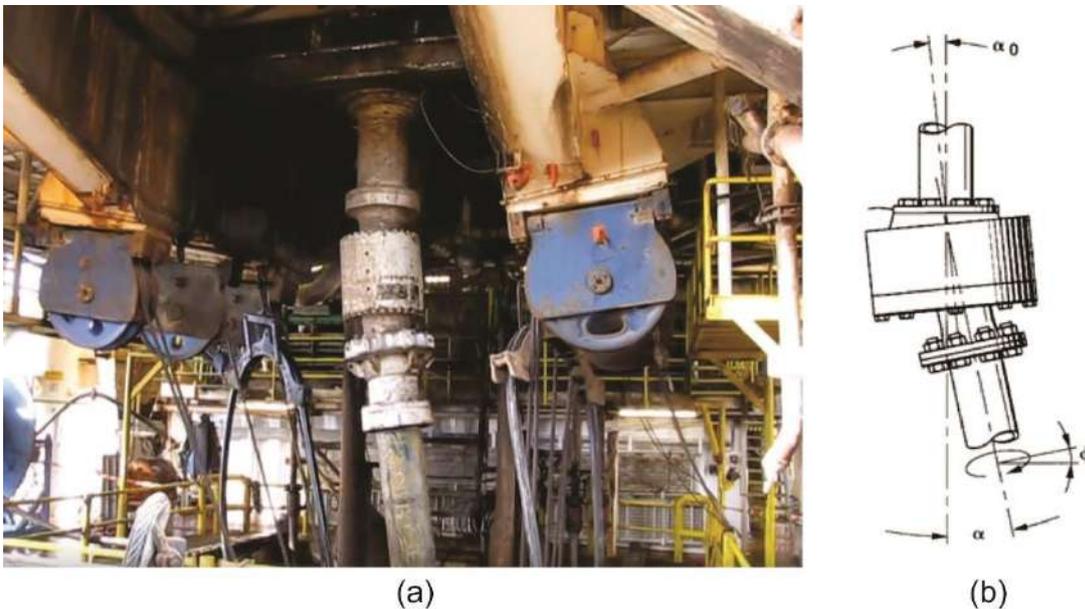
### 2.3.3 Juntas Flexíveis

As juntas flexíveis (Figura 2.10) são equipamentos que reagem a esforços de tração, compressão e deflexões angulares, permitem também a rotação angular. A rigidez rotacional desta junta é uma função não linear do ângulo e possui uma grande variedade de rigidez disponível por grau de rotação. Normalmente são instaladas, em dois pontos da coluna: na seção superior, entre o *diverte* e a junta telescópica, e na seção inferior acima do LMRP [4].

Por meio do movimento relativo entre o núcleo da junta e sua parte externa, na seção superior a junta é instalada para permitir a inclinação do *riser* em função do passeio da plataforma, reduzindo assim o momento fletor que atua ao longo da coluna, por sua vez, a junta instalada no topo do LMRP confere ao sistema um maior grau de flexibilidade mecânica, permitindo maiores deflexões na extremidade inferior da coluna, reduzindo

assim os momentos fletores que precisam ser suportados pelo sistema de cabeça de poço submarina [61].

Ainda em alguns casos é possível o arranjo da coluna contar com uma junta adicional instalada em uma posição intermediária, abaixo da junta telescópica, o objetivo é permitir que o *riser* tolere algum nível de contato com o *moonpool* e com a quilha da embarcação, caso de navios-sonda, evitando assim maiores danos no caso de uma desconexão de emergência, visto que, a junta intermediária proporciona um ponto adicional de articulação a estrutura, ao em vez de restringir o ângulo com sua rigidez fornecendo assim maior complacência ao sistema [41, 42].

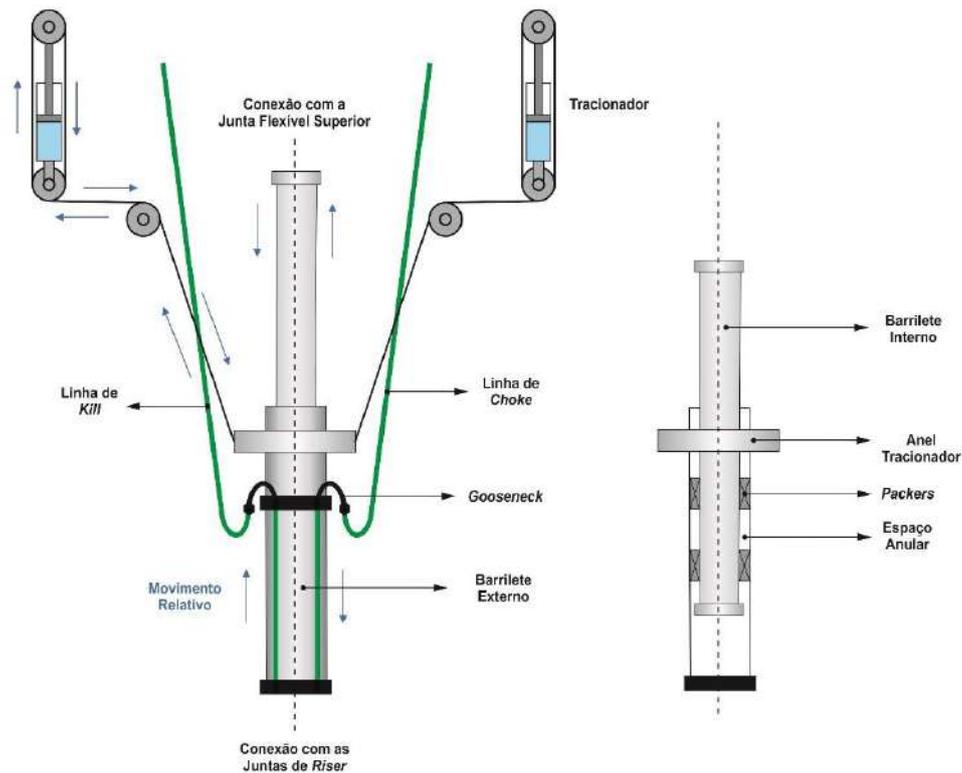


**Figura 2.10 – (a) e (b) Inclinações da junta flexível [83]**

### 2.3.4 Junta Telescópica

A junta telescópica (Figura 2.11) é um dispositivo que atua em conjunto com o sistema de tração, sendo a ligação entre a coluna de *riser* e a unidade de perfuração. O dispositivo possui dois barriletes cilíndricos concêntricos que por meio de deslizamento permitem o movimento relativo vertical entre a sonda e a coluna de *riser*.

O barrilete interno está conectado a base da junta flexível superior, enquanto que, o barrilete externo está conectado ao topo da primeira junta da coluna de *riser*, o dispositivo está equipado com *packers* para vedar o espaço anular entre os barriletes, ainda no barrilete externo há uma interface para o acoplamento do anel tracionador, em alguns casos, o anel é parte integrante do barrilete [32].



**Figura 2.11 – Junta telescópica**

Posicionadas abaixo do anel as linhas de *choke*, *kill* e auxiliares também são conectadas ao barrilete externo por meio do *gooseneck*, que é uma tubulação rígida em forma de U usada como conduíte para fluidos de perfuração de alta pressão, o *gooseneck* realiza a interface entre as partes flexíveis e rígidas das linhas auxiliares [2, 25].

### 2.3.5 Sistema de Tração

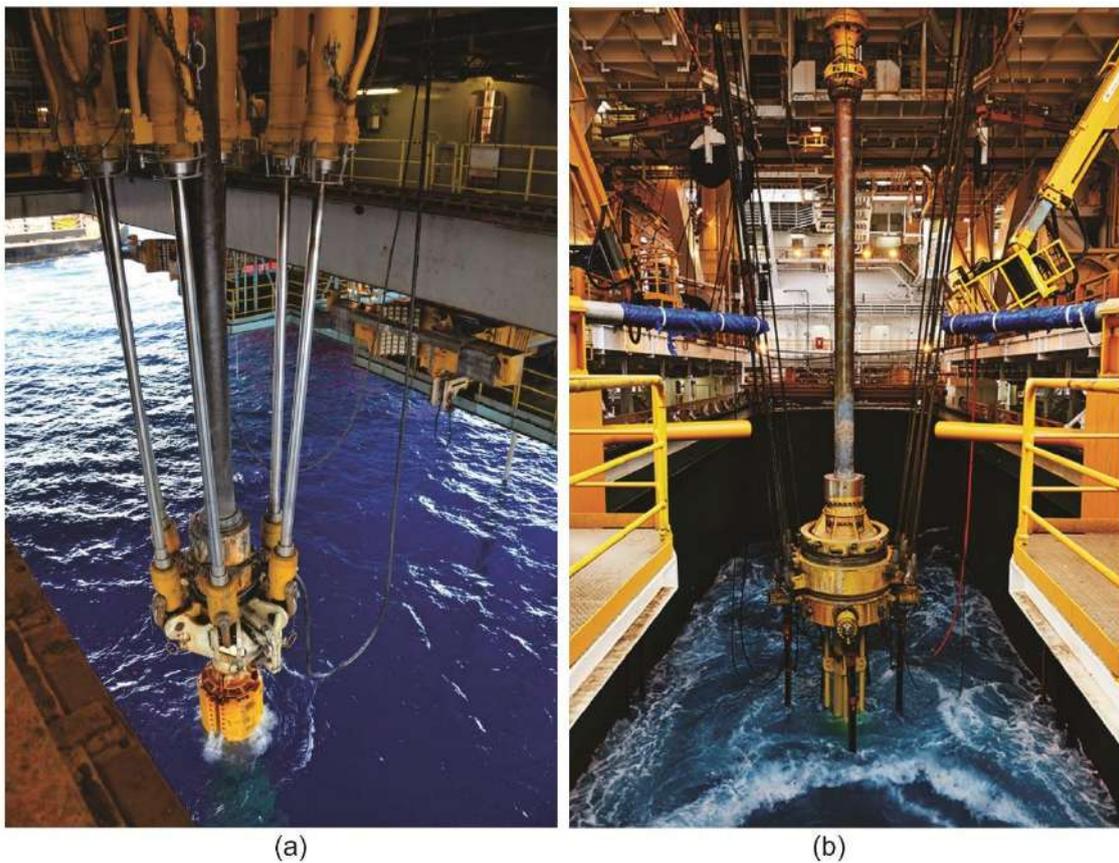
O sistema de tração de um *riser* de perfuração é utilizado para aplicar uma força vertical ao topo da coluna capaz de suportar o peso próprio da estrutura mantendo-a tracionada próxima de um valor constante, evitando assim a falha por flambagem.

A tração aplicada proporciona estabilidade ao *riser* durante a perfuração sendo possível, durante a operação, um acréscimo de tração por parte do sistema para controlar e corrigir os deslocamentos laterais e o aumento de ângulo e inclinação da coluna [7].

O sistema de tração funciona também como um sistema compensador de movimento, capaz de absorver os movimentos verticais da sonda, por exemplo, quando a sonda se movimenta para baixo, devido à ação de uma onda, o sistema atua para evitar

a flambagem da coluna, em contrapartida, quando a sonda se movimenta para cima, o sistema atua evitando que a coluna seja esticada. Caso não houvesse esse controle toda essa variação nos esforços, além de deformar as juntas de *riser*, poderia causar falhas por fadiga [4, 41].

O sistema é formado por um conjunto de acumuladores hidráulicos-pneumáticos conectados a um conjunto de vasos de pressão com grande volume. Os tracionadores de atuação direta (Figura 2.12a) podem ser conectados diretamente no *riser* por meio de hastes, já os tracionadores a cabo (Figura 2.12b) são configurados para manter a tração por meio de um sistema de cabos de aço e polias conectadas ao *riser*.



**Figura 2.12 – (a)Tracionadores de ação direta (b) Tracionadores a cabo [3]**

O ponto de conexão entre os tracionadores e o *riser* está localizado no barrilete externo da junta telescópica, onde os cabos ou as hastes estão conectados e distribuídos uniformemente em torno do anel tracionador [2, 32].

Normalmente os tracionadores de cabos de aço possuem uma relação de 4:1 entre o comprimento do cabo e o curso do cilindro, isto significa que se o curso do cilindro for

de 4 metros podem ser pagos ou recolhidos 16 metros de cabos por unidade. Usualmente neste sistema são utilizados 8 ou 12 unidades.

Os tracionadores de atuação direta possuem um cilindro de curso mais longo para obter maior capacidade de carga necessária para compensar os movimentos, dispensando assim o uso de cabos de aço, a haste do pistão está diretamente ligada ao anel tracionador, possuem uma relação de curso de 1:1, cada unidade é capaz de aplicar uma tração maior ao *riser*, sendo que o sistema composto por tracionadores de ação direta necessita de um número menor de unidades [32, 58].

### 2.3.6 Juntas de *Riser*

O *riser* de perfuração (Figura 2.13) é composto por um tubo central de 21 in de diâmetro nominal e comprimento variando entre 75 e 90 ft. Anexado ao tubo central há outros tubos periféricos com diâmetro nominal entre 4 e 5 in.

A tubulação central, e de maior diâmetro, é responsável por conduzir e abrigar a coluna de perfuração e proporcionar o retorno do fluido de perfuração para a superfície [2].

As tubulações menores, adjacentes à tubulação central, são configuradas como: linhas de *kill* e *choke*, as quais são usadas para controlar o poço no caso de *kick*, linha de *booster* para injetar fluido de perfuração na base do *riser* para ajudar no retorno do fluido para a superfície e linhas auxiliares, hidráulicas e elétricas, para comandar as operações de travamento e destravamento dos conectores hidráulicos e o acionamento dos equipamentos de segurança do poço [52].

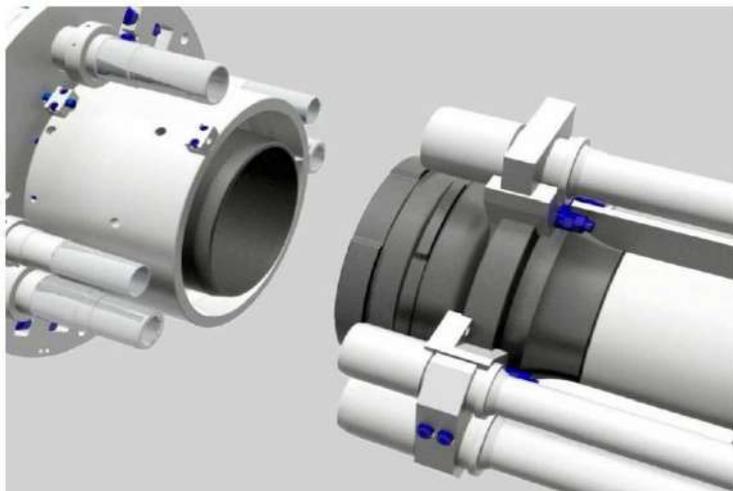


Figura 2.13 – Juntas de *riser*, detalhes do acoplamento [2]

As juntas de *riser* (Figura 2.14) podem estar equipadas com módulos de flutuação, fabricados em espuma sintética, a função destes módulos é adicionar empuxo à coluna, reduzindo assim seu peso próprio e conseqüentemente a tração de topo.

Normalmente o trecho intermediário da coluna é composto pelas juntas com flutuadores, por sua vez, um pequeno trecho próximo à superfície é configurado por juntas sem os módulos de flutuação, para reduzir as cargas hidrodinâmicas na zona onde as forças das ondas são maiores, a *splash zone*. Por fim o trecho inferior da coluna também é configurado por juntas sem os flutuadores, para evitar a concentração de tensões no BOP [74].



**Figura 2.14 – Montagem da junta de *riser* com flutuadores [2]**

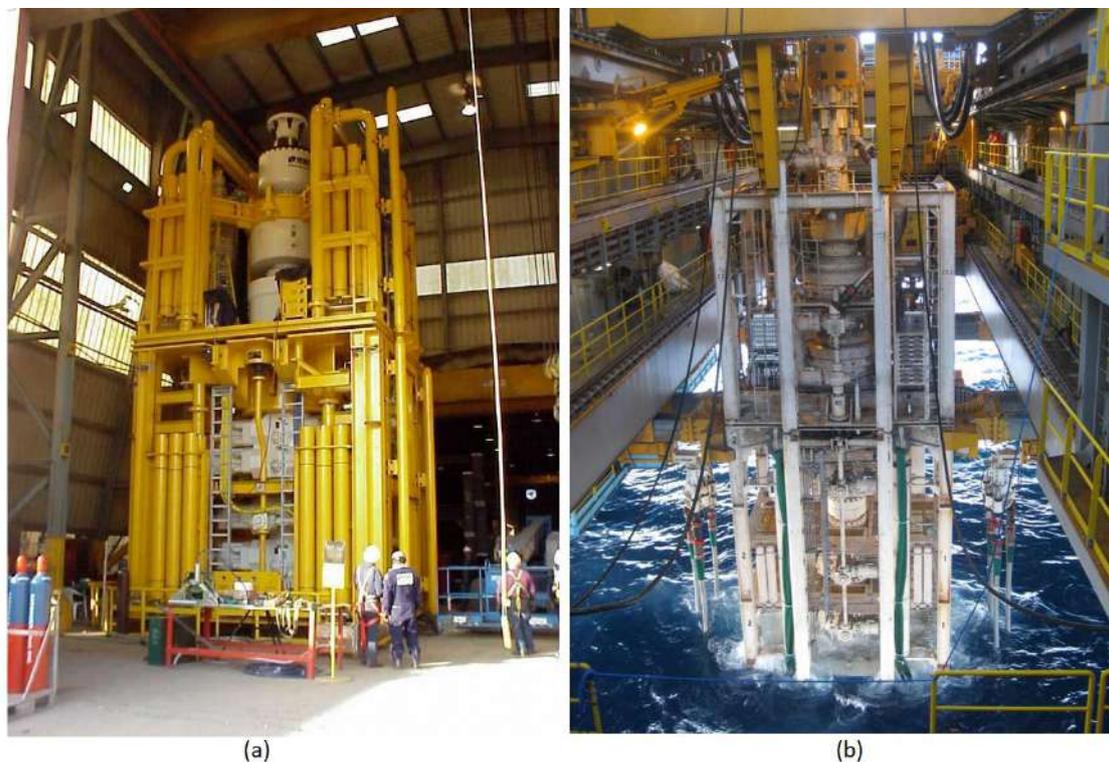
As *pup joints* são juntas de *riser* mais curtas normalmente compreendem um range entre 10 e 40 ft, estes comprimentos devem estar disponíveis na sonda para ajustar o espaçamento adequado da coluna de *riser* em função da lâmina d'água [80].

### 2.3.7 BOP

O BOP (Figura 2.15) é o equipamento principal do sistema de segurança e controle de poço submarino é composto pelo conjunto LMRP e BOP *Stack*, o sistema é formado por uma determinada quantidade de válvulas instaladas acima da cabeça de poço, que são acionadas em caso de ocorrência de *kick* ou em desconexões de emergência.

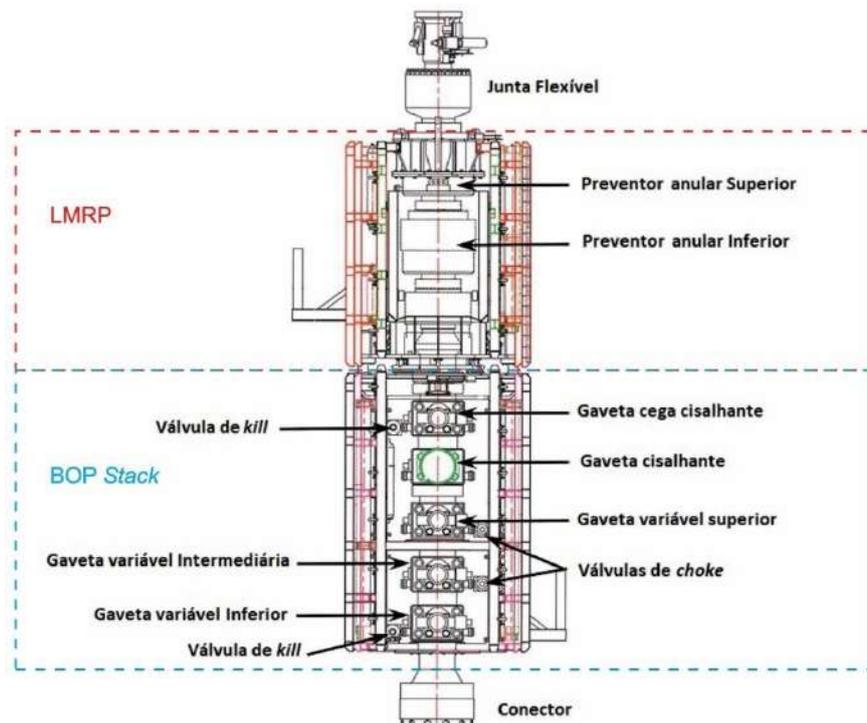
Instalado pelo *riser* de perfuração, após o término da fase dois, o conjunto pode ser projetado para uma variedade de configurações, dependendo do tipo, da profundidade da lâmina d'água, da pressão de trabalho, etc.

Apesar de variar dependendo da região onde se perfura, a configuração típica do BOP apresenta um preventor anular três gavetas de tubos sendo pelo menos uma variável e pelo menos uma cisalhante [11, 12].



**Figura 2.15 – (a) Montagem do BOP (b) Descida do BOP pelo moonpool [55]**

A Figura 2.16 ilustra a configuração de um BOP. Localizado na parte superior do conjunto o LMRP inclui, dois preventores anular, por sua vez o BOP *Stack* é composto por um conjunto de gavetas e válvulas submarinas das linhas de *choke, kill* [52, 60].



**Figura 2.16 – Configuração do BOP. Adaptado de [52]**

Um elemento estrutural importante neste conjunto são os conectores que mecanicamente, na parte superior, unem o LMRP a junta flexível do *riser* e na parte inferior, unem o BOP *stack* a cabeça de poço além do mais um conector intermediário fornece uma interface liberável entre o LMRP e o BOP *Stack*.

Podemos citar como exemplo o conector do tipo H-4, sendo possível a desconexão do conjunto em condições operacionais de ângulos de até 15° de inclinação, cenário provável em casos de deriva da sonda onde há a necessidade de fechamento imediato do poço, logo o *riser* pode ser desconectado no LMRP mantendo o BOP *Stack* sobre a cabeça do poço.

A padronização do tipo de conector, permite que qualquer BOP se conecte a qualquer poço [79, 68].

Outro aspecto importante no BOP é a funcionalidade dos preventores anular e das gavetas de tubos, a tomada de decisão para acionar determinado elemento de segurança depende das condições da perfuração para tal as operadoras possuem procedimentos padrões para garantir a segurança de fechamento do poço.

Por exemplo, em caso de *kick*, o preventor anular do LMRP é o primeiro elemento a ser acionado, podendo ser fechado em diversos diâmetros, permite a movimentação da

coluna de perfuração, *stripping*, mesmo estando fechado. Já em casos de desconexão, as gavetas devem ser acionadas, a escolha entre uma ou outra opção depende da avaliação do cenário em que ocorre a desconexão [11, 66].

Em casos de necessidade de corte da coluna pela gaveta cisalhante, a gaveta de tubos fixa, que veda apenas tubos de um diâmetro específico, 5 in, por exemplo, pode ser acionada para permitir o apoio da coluna de perfuração no próprio BOP, procedimento conhecido como *hangoff*, antes do corte. Por sua vez a gaveta de tubos variáveis veda contra uma faixa de diâmetros determinados, por exemplo entre 6 <sup>5</sup>/<sub>8</sub> in e 3 <sup>1</sup>/<sub>2</sub> in.

A gaveta cega é projetada para fechar e vedar o poço quando não há ferramentas dentro do mesmo, já a gaveta cega cisalhante, como sugere o nome, permite o corte da coluna de perfuração e alguns tipos de revestimento, muito útil em caso de uma desconexão de emergência, além do corte a gaveta cega também deve prover vedação do poço após o corte, existem variações das gavetas cisalhantes como as supercisalhantes, que cortam tubos e revestimentos maiores, até 13 <sup>3</sup>/<sub>8</sub> in, entretanto não promovem vedação [11, 66, 76].

Em função do acidente de Macondo, ocorrido no Golfo do México em 2010, que ocasionou o naufrágio da plataforma *Deepwater Horizon* sepultando 11 pessoas, a regulamentação que envolve a segurança de poço na perfuração passou a adotar novos procedimentos, sobretudo em especial aos relacionados com o funcionamento do BOP.

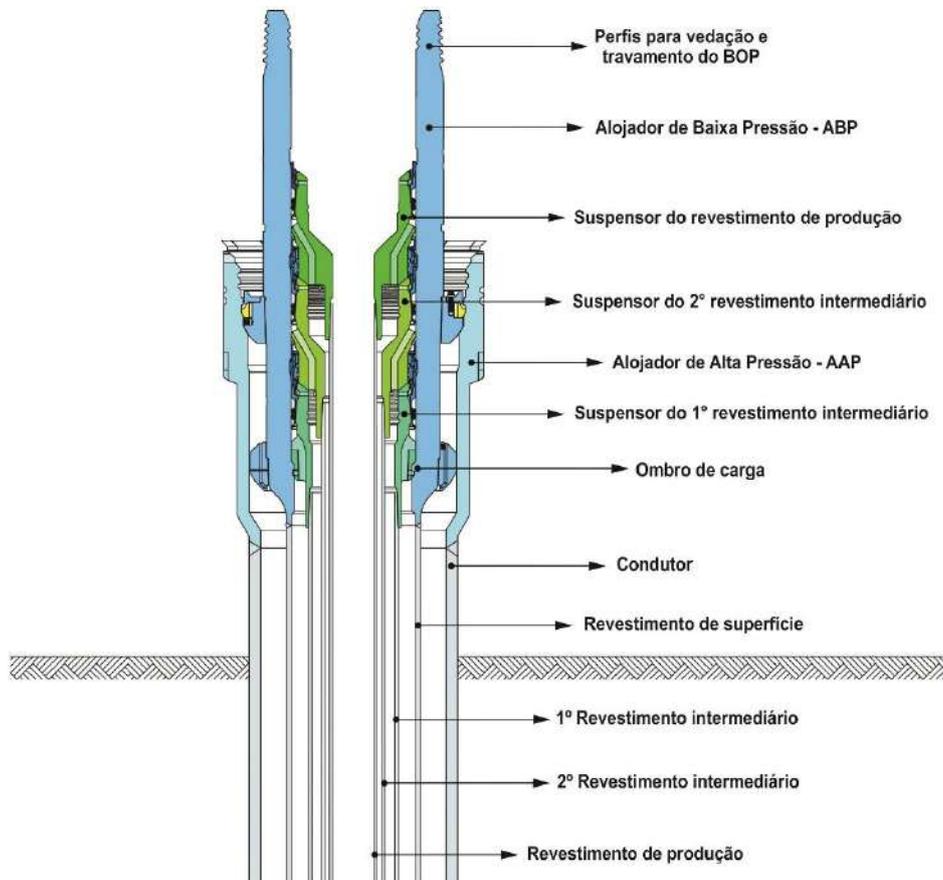
A fim de garantir a confiabilidade do equipamento as agências reguladoras passaram a submeter as operadoras a uma nova política de testes do equipamento durante toda a sua vida útil. Estes testes permitem evitar alguns modos de falha e com isso, prevenir a sua ocorrência em momentos indesejáveis durante a operação [52].

### 2.3.8 Sistema de Cabeça de Poço Submarina - SCPS

A cabeça de poço é a terminação de superfície de um poço que incorpora conexões para ferramentas, buchas, suspensores de revestimentos e colunas, árvore de natal, linhas de fluxo para controle do poço durante a perfuração e a produção.

Durante a fase de perfuração de um poço *offshore* o Sistema de Cabeça de Poço Submarina - SCPS (Figura 2.17) é composto por um conjunto de equipamentos desenvolvidos para realizar as funções de assentamento e ancoragem dos alojadores e

revestimentos, controle de fluxo, isolamento dos anulares entre os revestimentos, confinamento das pressões do poço e serve de interface para conexão do BOP [11].



**Figura 2.17 – Sistema de cabeça de poço submarina. Adaptado de [12]**

Ainda observado a Figura 2.17 notamos que o Alojador de Baixa Pressão - ABP é soldado no topo do condutor, o mesmo dispõe de perfis internos para assentamento do Alojador de Alta Pressão - AAP, também internamente, o primeiro suspensor de revestimento é assentado no ombro de carga do AAP e os demais suspensores, sequencialmente são assentados no topo do suspensor anterior, enquanto que, no topo do AAP observamos um perfil interno para vedação e outro externo para travamento do BOP [12].

Em uma análise de *riser* o AAP é um elemento estrutural importante, a escolha do modelo utilizado no projeto de poço deve contemplar a capacidade de suportar o peso dos revestimentos assentados, além do BOP, que gera esforços e cargas axiais e fletoras sobre o SCPS [7].

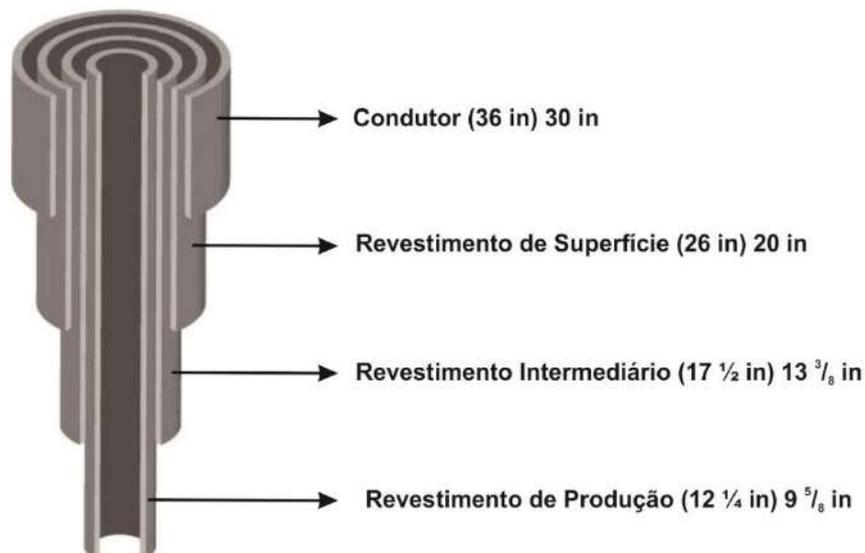
# 3 REVESTIMENTO

## 3.1 Introdução

Um poço é perfurado com o objetivo básico de comunicar hidráulicamente um reservatório com a superfície, possibilitando assim a produção de fluidos que compõem essa reserva, as operações básicas durante a construção de um poço são a perfuração, o revestimento e a cimentação [76].

O poço apresenta um perfil telescópico sendo a perfuração deste dividida em fases, cada uma delas é determinada pelo diâmetro da broca ou do alargador que está sendo utilizado na perfuração. A Figura 3.1 ilustra um esquema de um projeto de poço de quatro fases, composto pelas fases de 36 in, 26 in, 17 ½ in e 12 ¼ in [33].

Em geral, após a finalização de cada fase é descido um revestimento para proteger as formações e permitir que um peso adequado de fluido de perfuração seja utilizado na fase seguinte. As profundidades da fase e do revestimento descido são definidas no projeto de poço, para as fases citadas acima utiliza-se os revestimentos de diâmetros de 30 in condutor, 20 in revestimento de superfície, 13 ¾ in revestimento intermediário e 9 ⅝ in revestimento de produção [6, 11, 76].



**Figura 3.1 – Projeto de poço com quatro fases [33]**

Com exceção do condutor que pode ser jateado, cravado ou cimentado, após a finalização de cada fase seguinte e a descida do revestimento correspondente à mesma, o espaço anular entre o poço e o revestimento deve ser cimentado antes de se reiniciar a próxima fase.

## 3.2 Especificações de Tubos de Revestimentos

O revestimento de um poço de petróleo constitui uma das parcelas mais expressivas do custo do poço, variando de 15% a 20%. Para seus tubos, conexões e resistências a indústria adota padrões e especificações da *American Petroleum Institute* – API, embora alguns produtos e procedimentos não API também sejam adotados.

Entre as propriedades definidas pelos padrões API estão: a resistência, as dimensões físicas e os procedimentos para testes de controle e qualidade. A composição de cada coluna de revestimento é função das solicitações previstas durante sua descida no poço e ao longo de sua vida útil [6, 40, 76].

A norma API *Specification 5CT* [6] descreve as especificações de tubos de revestimentos para poços de petróleo, entre elas as principais são:

- Diâmetro externo: diâmetro nominal da tubulação;
- Peso nominal: peso por unidade de comprimento do tubo, levando-se em consideração o peso das conexões;
- Grau do aço: tubos fabricados com metalurgias diferentes, para atender às diversas situações como as solicitações mecânicas, presença de H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, salinidade, etc;
- Diâmetro interno e *Drift*: diâmetro de passagem de equipamentos e ferramentas;
- Resistência ao colapso, pressão interna, resistência a tração, tipo de conexão: encaixe ou por enroscamento.

São estabelecidos três faixas de comprimento para os tubos de revestimento, sendo que estas faixas são divididas em *range*: o *range 1* compreende tubos entre 16 e 25 ft, o *range 2* tubos entre 25 e 34 ft e o *range 3* para tubos acima de 34 ft [6, 21, 62].

### 3.3 Operação de Descida da Coluna de Revestimento

As operações de descida da coluna de revestimento são ditas operações especiais, pois embora normais na vida do poço, não são contínuas, mas executadas somente em determinados momentos da perfuração [11].

Existe um grande número de associações estrangeiras que emitem normas, relatórios, recomendações, especificações e boletins, voltados para a indústria do petróleo, os documentos técnicos emitidos por elas são, via de regra, claros, com informações que tem por objetivo melhorar a qualidade de produtos e serviços.

Embora para as operações de descida da coluna de revestimento ainda não existe disponível nenhuma norma ou procedimento API, geralmente, as operadoras, baseadas em sua experiência no mercado, elaboram seus próprios documentos com recomendações operacionais.

De forma geral a operação de descida da coluna de revestimento pode ser análoga a operação de descida da coluna de perfuração [21, 22].

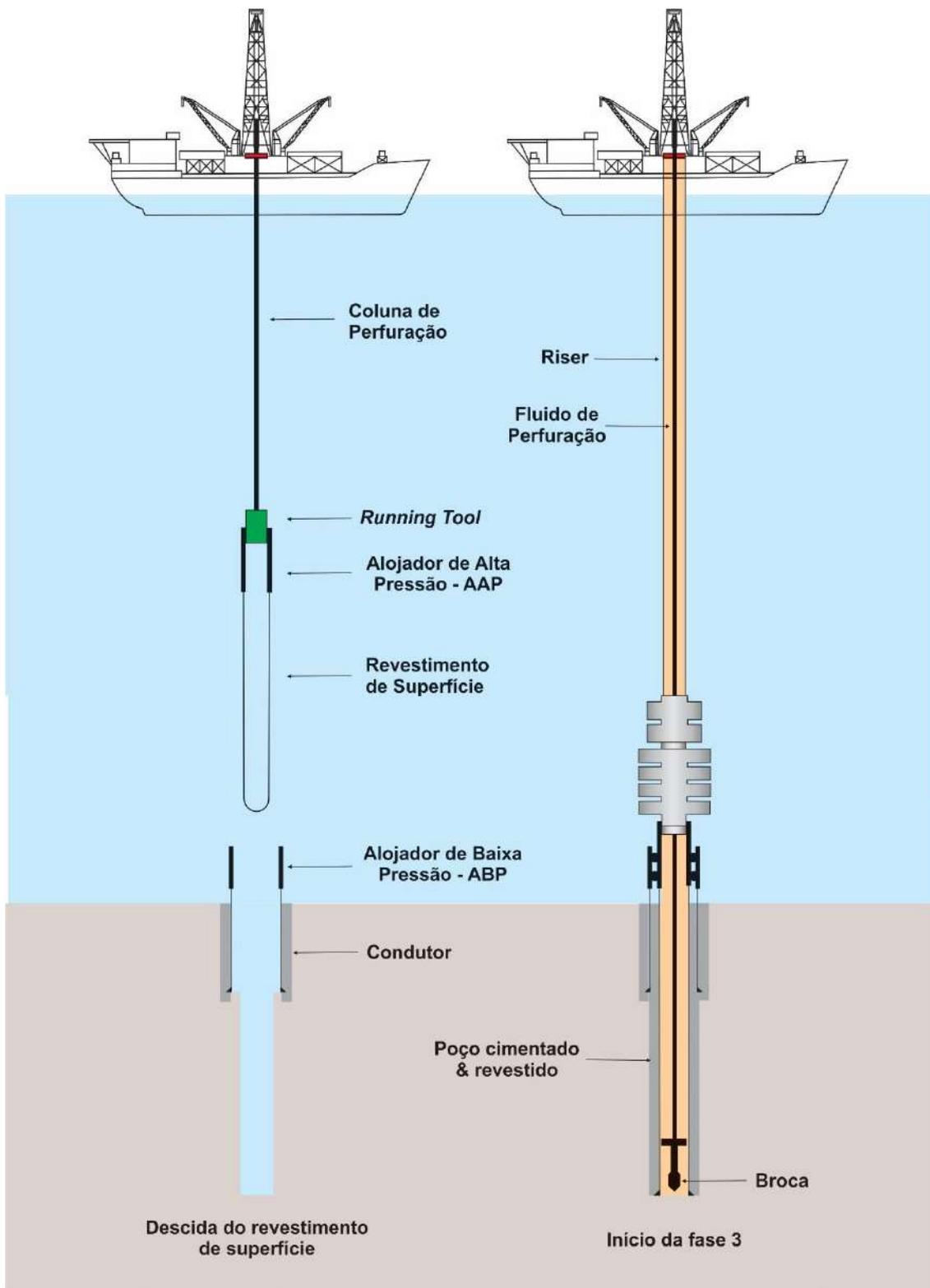
Sendo assim esta seção descreve de forma didática uma sequência operacional de descida da coluna de revestimento, importante ressaltar que alguns detalhes muito específicos desta operação não foram citados, visto que o objetivo é descrever uma visão geral do procedimento.

Conforme ilustra o esquema da Figura 3.2 o primeiro revestimento a ser assentado no poço é o condutor, dependendo da consistência do leito marinho, o processo de assentamento pode ser realizado de três maneiras distintas: jateado, cravado ou perfurado. Em todas estas operações o condutor é descido juntamente com o alojador de baixa pressão que é soldado ao topo do condutor [11, 51].

Sequencialmente o revestimento de superfície é instalado junto com o alojador de alta pressão.

Em caso de perfuração da primeira e segunda fase, para que os revestimentos possam alcançar o fundo do mar, em um primeiro momento, a coluna de revestimento é descida por uma coluna de trabalho ou pela coluna de perfuração [12].

No caso de uma coluna de perfuração o conjunto é descido com o auxílio de uma ferramenta de assentamento, *running tool* de revestimento, que acopla o revestimento à coluna de perfuração, permitindo que o mesmo seja assentado no poço [11].



**Figura 3.2 – Esquema da descida do revestimento de superfície e início da fase 3**

Ainda observando a Figura 3.2 a partir da terceira fase de perfuração, não é mais possível perfurar o poço sem retorno de fluido, sendo assim, a coluna de *riser* e seus equipamentos são instalados. A partir deste momento o acesso ao poço é realizado

através da coluna de *riser*, as operações de perfuração, descida de equipamentos ou revestimento e pescaria serão realizadas com passagem pelo interior da coluna de *riser* [12].

Após a perfuração da terceira fase o revestimento intermediário é instalado no ombro de carga do revestimento de superfície sequencialmente os demais revestimentos são instalados no suspensor do revestimento anterior, que é o elemento responsável pelo acoplamento no interior do sistema de cabeça de poço submarina, Item 2.3.8 [22, 76].

Após a finalização da perfuração e revestimento do poço uma coluna de produção é instalada para escoar os fluidos do reservatório para as etapas de processamento primário e produção na superfície.

De forma geral uma coluna de revestimento pode ser simplificada como uma coluna constituída de diversos tubos de aço unidos, sua montagem é realizada no piso da plataforma com o auxílio de um conjunto de equipamentos e ferramentas específicas (Figura 3.3) [84].



**Figura 3.3 – Montagem da coluna de revestimento [84]**

O *top drive* junto com o elevador de tubos (Figura 3.4a) é a ferramenta responsável pela movimentação e aplicação de rotação às juntas, sendo possível realizar a conexão de três juntas de tubo, de uma só vez, o que reduz o número de conexões a serem realizadas, já a chave flutuante (Figura 3.4b) é utilizada para prover torque no rosqueamento das juntas [85].



**Figura 3.4 – (a) Top drive (b) Chaves flutuantes [85]**

À medida que, as juntas de revestimento são descidas na coluna de *riser* há a necessidade de bombeamento de fluido de perfuração em seu interior para evitar o colapso devido ao excesso de pressão externa ocasionado pelo fluido de perfuração contido no interior do *riser* (Figura 3.5).

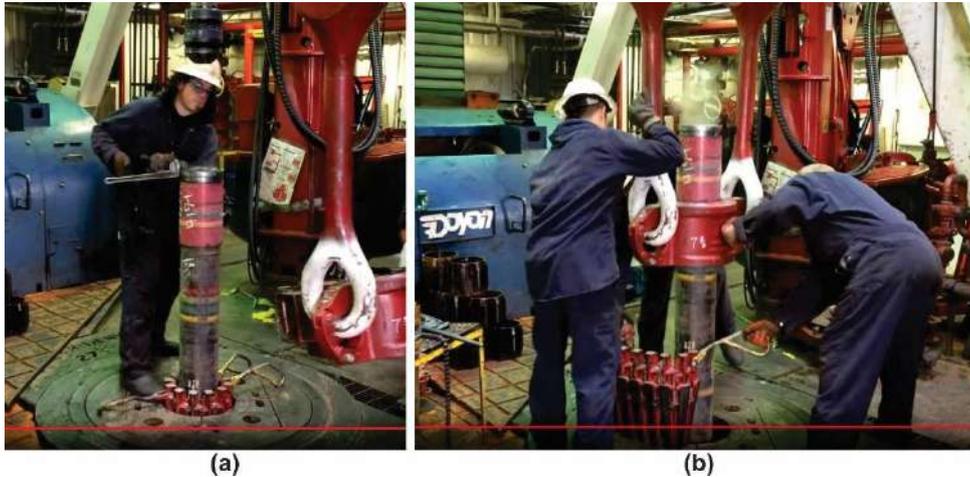


**Figura 3.5 – Bombeamento de fluido no interior da coluna de revestimento [84]**

Em determinados momentos da operação, geralmente no bombeamento de fluido para o interior da coluna ou na conexão de um determinado número de juntas, a coluna permanece apoiada na cunha da mesa rotativa (Figura 3.6a), sendo que neste momento todo o peso suspenso encontra-se concentrado neste equipamento [84].

Na sequência a cunha é retirada (Figura 3.6b) e agora o elevador de tubos conectado ao *top drive* sustenta o peso, permitindo que a coluna seja descida até pouco acima da

mesa rotativa, por fim, a cunha é novamente colocada no interior da mesa e toda a operação recomeça, até que se atinja a profundidade desejada [86].



**Figura 3.6 – (a) Coluna de revestimentos apoiada na cunha (b) Retirada da cunha para descida da coluna [86]**



**Figura 3.7 – Elevador de tubos, cunha e bucha da mesa rotativa. Adaptado de [25]**

Note que este é um ponto crítico na operação, pois à medida que são adicionadas novas juntas à coluna, proporcionalmente aumenta a concentração de esforços transmitidos para a cunha.

Alguns acidentes e falhas já foram registrados nesta etapa da operação como por exemplo escorregamentos da coluna junto a cunha ou em casos mais extremos o colapso do equipamento, neste caso os danos podem ser irreversíveis já que com o colapso há a real possibilidade de que a coluna de revestimento, outrora suspensa, agora em queda

livre se choque com a parede interna do *riser* de perfuração, com os equipamentos no leito marinho ou com o poço em construção.

Operações de pescaria para recuperar a coluna de revestimento no fundo do mar ou no interior do poço e tentativas de reparo dos equipamentos danificados podem se tornar muito caros inviabilizando assim a continuidade da perfuração restando como única solução o abandono do poço.

Em função do problema mencionado acima o intuito deste trabalho é estudar e analisar o comportamento da coluna de revestimentos apoiada na cunha da mesa rotativa e ao longo do *riser* de perfuração, onde por meio de simulações numéricas pretende-se identificar previamente as regiões de ocorrência de contato e os esforços envolvidos.

# 4 PROBLEMAS DE CONTATO

## 4.1 Introdução

A descrição física do problema de contato, ponto de partida para o modelo numérico, é baseada nos textos dos livros de Mecânica dos Sólidos, TIMOSHENKO [77, 78].

O termo problemas de contato é empregado para as situações gerais onde ocorrem interações entre um ou mais corpos. Os problemas de contato são frequentes em mecânica dos sólidos, visto que as ações de contato são o mecanismo mais comum para as transferências de forças entre estruturas ou sólidos em geral.

Problemas de contato são notadamente complexos quando não são conhecidos os pontos ou regiões de contato, principalmente em problemas dinâmicos definidos no espaço tridimensional. Para tal, deve-se conhecer a trajetória dos corpos no espaço e, por sua vez, a distância entre eles. Assim que o contato é identificado, deve-se solucionar a equação de movimento dos corpos considerando suas equações constitutivas, as condições de contorno e as condições iniciais que definem o contato.

Este tipo de problema é notadamente não linear por além de envolver não linearidades geométricas, envolvem não linearidades físicas devido a vários fatores, tais como: grandes deformações da seção dos corpos em contato, efeitos de atrito, etc.

Tradicionalmente, o problema de contato em modelos numéricos é baseado no uso de escalares generalizados ligados por dois nós, um de cada corpo, definidos por molas não lineares com patamar nulo para representar que os sólidos estão afastados e não nulos para representar forças elásticas durante o contato.

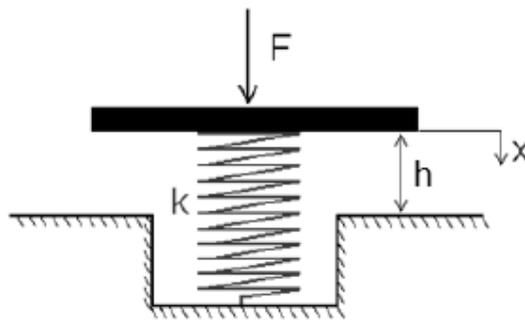
A grande maioria das aplicações estruturais envolve algum tipo de contato entre seus elementos. Essas são premissas presentes em toda e qualquer montagem de um sistema mecânico, desde algo pequeno, como as engrenagens de um relógio analógico de pulso, até algo em maior escala, como uma ponte, com suas partes estruturais apoiadas ou conectadas entre si, o inevitável é que frequentemente nos deparamos com situações que envolvem interações entre esses elementos.

Tipicamente existem dois tipos básicos de interações de contatos entre elementos estruturais. O primeiro tipo, contatos entre elementos “ligados”, por exemplo, peças

coladas em outras, soldadas, parafusadas, etc. Essas interações permanecem sempre da mesma forma, ou seja, não há alterações na sua condição de estar ou não em contato de acordo com os carregamentos sofridos pelo sistema.

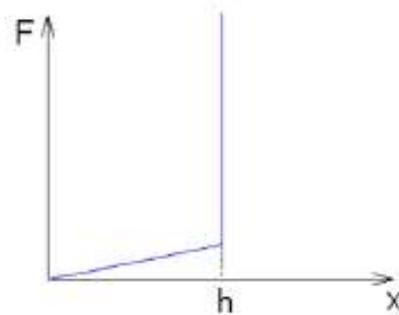
O segundo tipo de contato entre elementos envolve interações que possibilitem que um elemento se afaste e entre em contato com outro, essas situações ocorrem quando há impacto entre esses elementos.

Por exemplo a Figura 4.1 ilustra uma mola fixa a um ponto no solo rígido e na sua extremidade superior preso a um elemento também rígido, observe que após a aplicação de uma força  $F$ , a distância inicial que o elemento pode percorrer sem colidir com o solo  $h$ , caso o valor do deslocamento  $x$  ultrapasse esse limite, ocorrerá contato.



**Figura 4.1 – Contato, representação não linear**

A representação gráfica (Figura 4.2) da estrutura acima relaciona a força aplicada ao elemento com o deslocamento sofrido pelo mesmo, considerando a mola com rigidez  $k$  constante.



**Figura 4.2 – Força versus deslocamento**

Ainda observado a Figura 4.2 nota-se que até o valor de deslocamento que caracteriza o início do contato, a relação entre a força e o deslocamento é linear, entretanto, ao passar pelo deslocamento  $h$ , a força apresenta um grande salto, para nenhum acréscimo de deslocamento  $x$ , caracterizando o impacto sofrido pelo elemento, para tanto, do ponto de vista global da estrutura a relação entre a força e o deslocamento apresenta não linearidade.

Quando um jogador cabeceia uma bola, situação comum em uma partida de futebol, estamos observando uma interação entre a cabeça e a bola, ou seja, ocorre um tipo de impacto, durante essa interação a bola transmite e sofre esforços, podemos observar na Figura 4.3(a) que é perceptível a deformação da bola, por sua vez, na Figura 4.3(b) a mesma ação é observada mais intensamente na cabeça do jogador.



**Figura 4.3 – (a) e (b) Contato do tipo impacto [82]**

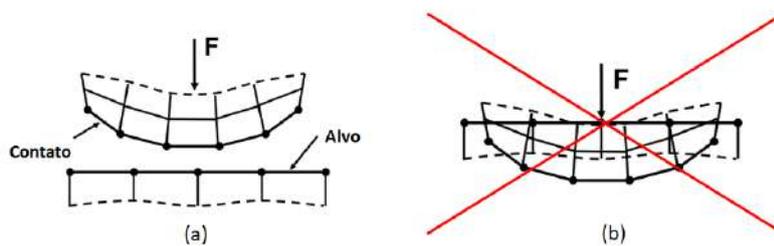
Após a ação e reação a bola se restaura e assume um movimento em determinada direção essa interação trata-se de um contato que permite a separação entre os elementos, a bola não permanece colada na cabeça do jogador [77, 78].

O *status* pode ser entendido como a condição de haver ou não contato, contatos do tipo de impacto são não lineares, uma vez que ocorre a mudança de *status* durante a solução do problema, caracterizando mudança na rigidez do sistema.

Essa não linearidade ocorre devido a uma alteração brusca no sistema, neste caso, a ocorrência de uma mudança brusca de rigidez quando um corpo entra em contato com outro ou se separa de outro [9, 10].

Conforme observado na Figura 4.4 quando duas superfícies se tocam de tal forma que passam a se tornar mutuamente tangentes, consideramos as mesmas em contato, o senso físico comum define que as superfícies em contato apresentam as seguintes características:

- Não há interpenetração;
- Há transmissão de esforços normais compressivos;
- Há transmissão de esforços tangenciais friccionais;
- Pode haver transmissão de esforços normais.



**Figura 4.4 – (a) e (b) Contato entre superfícies [10]**

Entender a cinemática do contato é fundamental para sua correta inserção no modelo numérico, para um sistema onde os elementos interagem entre si, é necessário que se introduza no modelo a informação da existência ou possibilidade de existência do contato, caso não se introduza essa informação, a interação de contato será ignorada e os elementos poderão interpenetrar-se (Figura 4.4b).

Fisicamente quando existe o contato, as superfícies trocam forças entre si e não ocorre a interpenetração na zona de contato, campos de tensões de valores mais elevados localizados nas regiões de contato ocorrem como reflexo dos esforços que surgem entre as superfícies.

Baseado na premissa de que não há interpenetração entre os corpos em uma condição física real, a fim de tratar esse problema, a modelagem numérica utilizada nos métodos de elementos finitos visa estabelecer alguma relação entre duas superfícies em contato para prevenir que penetrem uma na outra [13].

Para tanto, as ferramentas computacionais em uso atualmente lançam mão de diferentes formulações para modelar o contato entre tais superfícies. A seguir são descritos os tipos e as formulações de contatos.

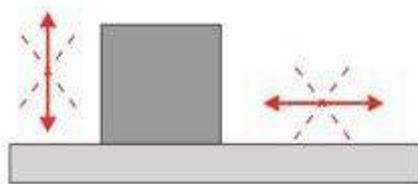
## 4.2 Tipos de Contato

Em geral a maioria dos *softwares* de elementos finitos que disponibiliza um pacote de ferramentas para simular os problemas de contato, por via de regra, adota nomes comerciais às funcionalidades destas ferramentas, por exemplo em casos onde o contato considera uma superfície ligada a outra, a ferramenta pode chamar a funcionalidade de *bonded*, que literalmente é a tradução do inglês para a palavra ligado.

Portanto, para um melhor entendimento, adotou-se nesta seção um nome genérico para exemplificar os tipos de contatos, por razões comerciais, talvez em outras referências os nomes destas funcionalidades podem sofrer mudanças em sua nomenclatura, entretanto, na essência estamos nos referindo ao mesmo tipo de contato.

Contatos do tipo ligado (Figura 4.5), não permitem a separação ou deslizamento entre as superfícies em contato, na prática é como se as superfícies estivessem coladas, esse tipo de contato é linear, visto que, não há alterações na extensão do comprimento ou da área de contato.

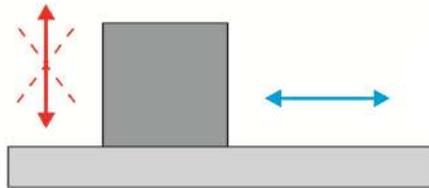
Este tipo de contato transfere de um corpo para o outro todos os tipos de esforços, a força normal trativa, a força normal compressiva e a força tangencial [8].



**Figura 4.5 – Contato ligado**

Por ser linear, requer apenas uma iteração para atingir a convergência, penetração ou *gaps* iniciais são ignorados, e as superfícies são consideradas como se estivessem perfeitamente em contato, podemos citar como exemplos desse tipo de contato toda e qualquer conexão soldada, parafusada, rebitada ou colada [1, 8].

O contato do tipo sem separação (Figura 4.6), como o nome sugere, não permite separação das superfícies em contato, entretanto, pequenos deslizamentos tangenciais são permitidos. O contato transfere de um corpo para o outro os esforços normais trativos e compressivos, porém não transmite esforços tangenciais.



**Figura 4.6 – Contato sem separação**

Assim como nos tipos ligados, o contato sem separação é linear, pois não há alteração na extensão do comprimento ou da área de contato. Por ser linear, também, necessita de apenas uma iteração para atingir a convergência, da mesma forma, penetração e *gaps* iniciais são ignorados, e as superfícies são consideradas como se estivessem perfeitamente em contato [13, 34].

O contato sem separação, pode ser usado em abordagens onde se deseja simplificar o problema impedindo a separação dos corpos, por exemplo, como em peças em rotação em torno de um pino ou um pistão em movimento dentro de um cilindro.

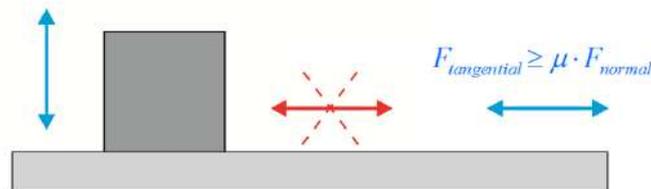
O contato do tipo sem atrito (Figura 4.7) permite a separação das superfícies em contato, bem como deslizamentos tangenciais sem qualquer impedimento, logo, o contato é não linear, pois a possibilidade de ocorrer separação faz com que a área de contato possa mudar durante a análise. O contato transfere de um corpo para o outro os esforços normais compressivos, porém não transmite esforços normais trativos nem tangenciais.



**Figura 4.7 – Contato sem atrito**

Este tipo de contato é empregado em modelagens onde se deseja simular, por exemplo, peças deslizando contra outras na presença de lubrificantes, o movimento de articulações em geral ou em situações onde o coeficiente de atrito pode ser considerado desprezível ou quando não pudermos estimar o coeficiente de atrito e for necessário utilizar um coeficiente nulo [10].

O contato do tipo com fricção (Figura 4.8) é semelhante ao sem atrito, pois permite separação e deslizamentos tangenciais das superfícies em contato, neste caso, entretanto, há um impedimento para o deslizamento entre as superfícies, pois há a presença do atrito, sendo o mesmo determinado por um valor de coeficiente, logo, este coeficiente atribui um valor para a tensão cisalhante admissível, onde, acima da qual, os corpos começarão a deslizar um em relação ao outro [77, 78].

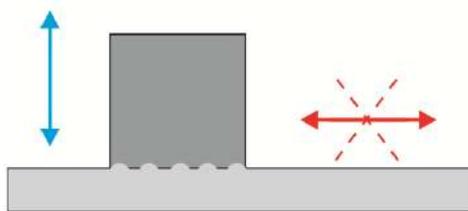


**Figura 4.8 – Contato com fricção**

O contato transfere de um corpo para o outro os esforços normais compressivos, não transmite esforços normais trativos e permite parcialmente a movimentação tangencial, esse tipo de contato também é não linear, pois a possibilidade de ocorrer separação faz com que a área de contato possa mudar durante a análise, uma particularidade deste contato é que o mesmo só é aplicável para regiões compostas inteiramente por faces [34, 73].

Além destes tipos de contatos, em algumas aplicações encontram-se os contatos do tipo rugoso (Figura 4.9), podemos fazer uma analogia com o contato do tipo com atrito, porém considera-se um coeficiente de atrito infinito. O contato rugoso funciona de forma que permite a separação das superfícies em contato, mas não permite deslizamentos tangenciais.

O contato transfere de um corpo para o outro os esforços normais compressivos e tangenciais em sua totalidade, entretanto, não transmite esforços normais trativos, o contato também é não linear, pois a possibilidade de ocorrer separação faz com que a área de contato possa mudar durante a análise [34].



**Figura 4.9 – Contato rugoso**

Modelagens empregando contatos do tipo rugoso na prática, são raros de serem vistos, há poucas referências disponíveis para consulta, mas, pode-se empregar este tipo de contato em algumas situações como: o contato entre polias e correias, embreagens em geral, contato envolvendo peças de borracha ou em qualquer outro tipo de contato em que se suponha coeficiente de atrito muito alto [73].

Quanto aos tipos de interação entre as geometrias, os contatos do tipo ligado e os contatos sem separação são lineares, tornando-se boas alternativas para quando se deseja acoplar pequenos movimentos entre elementos, com um custo computacional não muito elevado.

Por sua vez quando a modelagem do problema exigir o tratamento de interações entre elementos que permitam que os mesmos se separem, ou quando o deslizamento relativo entre eles for relevante, será necessário o uso de contatos do tipo sem atrito, ou contatos com fricção ou ainda contatos do tipo rugoso. Tais métodos envolvem não linearidades na solução do modelo elevando o custo computacional [9, 34, 73].

### 4.3 Formulações de Contato

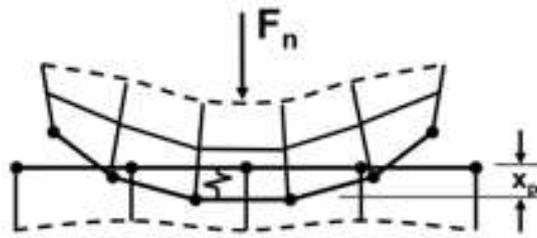
Conforme mencionado anteriormente, problemas de contato podem apresentar não linearidade, visto que não se conhece previamente a área de contato e as condições de contorno são determinadas como parte da solução.

Diversas formulações baseadas no método dos elementos finitos foram desenvolvidas para simular situações de contato e fatores tais como: grandes deformações, efeitos de atrito e não linearidades do material, apesar da complexidade matemática, são tratadas nas formulações [54].

Um dos fatores que complicam as análises de contato é a incorporação das restrições do contato, as principais formulações utilizadas pelos programas de elementos finitos

para o tratamento das restrições são os métodos das penalidades e os multiplicadores de Lagrange [72].

No método das penalidades aplicado à direção normal do contato (Figura 4.10) assume-se que para uma dada força normal é considerada uma rigidez de contato entre os corpos em contato, uma mola por exemplo, logo, quanto maior a rigidez de contato, menor a penetração e quanto menor a penetração maior a precisão obtida. Quando os corpos se separam a rigidez de contato é desativada.



**Figura 4.10 – Método das penalidades [10]**

A Equação (4.1) apresenta a formulação para o método das penalidades.

$$F_{normal} = k_{normal} \times x_{penetracion} \quad (4.1)$$

Note que este método permite certo grau de penetração, uma vez que sem a ocorrência de algum valor de penetração, a  $F_{normal}$  é nula. O quanto de penetração será permitido para uma dada  $F_{normal}$  é regulada através de um parâmetro numérico de rigidez de contato,  $k_{normal}$ . Quanto maior a rigidez mais próxima da penetração nula estaremos, quando a rigidez tende a infinito, a penetração é nula.

O método de Lagrange aplicado à direção normal baseia-se na utilização de equações vinculadas aos multiplicadores de Lagrange para a descrição do modelo, considerando a interação de certas superfícies com contato. Tal método, portanto, introduz novas equações no modelo a ser resolvido, no entanto, introduz também novas incógnitas, os multiplicadores de Lagrange.

A principal vantagem do método de Lagrange é que a penetração que surge é praticamente nula, qualquer penetração resultante, pode ser considerada como natureza de erro numérico. No entanto, este método apresenta maior dificuldade de convergência do que o método das penalidades.

A Figura 4.11 apresenta a comparação entre o comportamento dos métodos. Note que a transição entre o contato aberto e fechado é muito mais abrupta no método de Lagrange, fazendo com que a penetração admitida no caso de contato, seja nula. Já o método das penalidades possui uma moderação de tal condição, visto que a mudança de *status* do contato se dá de forma mais suave dada pela rigidez de contato.



**Figura 4.11 – Métodos de Lagrange e das penalidades [10]**

Nota-se também que quando nenhuma penetração entre corpos é permitida, Lagrange, o contato está sempre totalmente aberto ou totalmente fechado, uma função degrau. Essa condição pode dificultar a convergência, pois o contato fica oscilando entre aberto e fechado durante a análise, sem se estabilizar.

Um contratempo normalmente encontrado no método de Lagrange é conhecido como *chattering*, que pode ser interpretado como um ruído, devido ao fato de o contato está sempre totalmente aberto ou totalmente fechado [1].

Como alternativa frente as desvantagens dos métodos das penalidades e de Lagrange recomenda-se o método de Lagrange aumentado que combina as vantagens de ambos. A formulação para o tratamento do contato normal é dada pela Equação (4.2).

$$F_{normal} = k_{normal} \times x_{penetration} + \lambda \quad (4.2)$$

Observando a equação acima percebe-se que de forma geral trata-se de uma composição do método de Lagrange superposto ao método das penalidades a diferença é que a formulação de Lagrange aumentada adiciona um termo  $\lambda$  à direita na equação, graças a esse termo, a formulação é menos sensível à magnitude da rigidez de contato  $k_{normal}$  [14, 15].

Outra formulação disponível ao método normal de Lagrange inclui um grau de liberdade adicional para satisfazer a condição de contato, por exemplo, a pressão de contato na direção normal.

Assim, ao invés de conceber a força de contato como uma relação entre a rigidez de contato e a penetração, a formulação permite que seja calculada como um grau de liberdade qualquer do sistema, garantindo penetração nula ou quase nula sendo assim dispensa a adoção de uma rigidez de contato na direção normal [10].

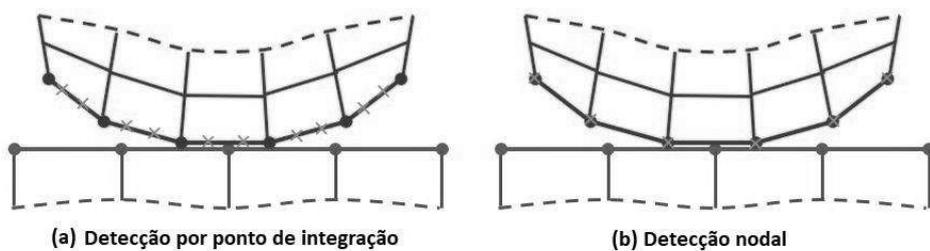
As formulações mencionadas anteriormente são referentes ao contato na direção normal. Se forem empregados contatos do tipo ligado, rugoso ou com fricção, uma situação similar passa a existir também na direção tangencial.

De modo análogo à condição de impenetrabilidade, dois corpos não devem deslizar livremente entre si se o tipo de contato adotado impuser qualquer restrição ao deslizamento [14, 15].

Conforme observado na Equação (4.3) a formulação utilizada na direção tangencial é baseada também no método da penalização em que  $x_{deslizante}$  deve ser igual ou próxima a zero.

$$F_{tangencial} = k_{tangencial} \times x_{deslizante} \quad (4.3)$$

Embora seja possível utilizarmos das formulações anteriores para o tratamento de contatos lineares os métodos de múltiplos pontos de contatos permitem que as interações possam ser tratadas de maneira mais simples. Os múltiplos pontos (Figura 4.12a) realizam acoplamentos entre graus de liberdade de nós próximos, essa utilização cria vínculos cinemáticos no modelo, tornando-se muito eficiente e recomendado no caso de contatos lineares.

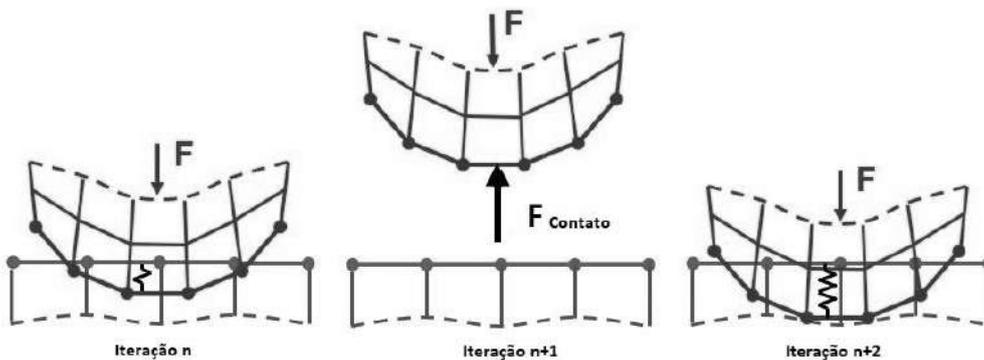


**Figura 4.12 – (a) Detecção por ponto de integração (b) Detecção nodal [10]**

As formulações de penalidades e multiplicador de Lagrange usam detecção por ponto de integração, resultando em mais pontos de detecção (Figura 4.12a), por sua vez, a formulação normal Lagrange usa detecção nodal, resultando em menos pontos de detecção (Figura 4.12b) [10, 13].

A detecção nodal lida melhor com o contato de uma maneira geral, mas uma malha mais refinada pode ajudar a obter excelentes resultados também com a detecção por ponto de integração.

A rigidez de contato  $k_{normal}$  e  $k_{tangencial}$ , é o parâmetro que mais influencia a precisão e a convergência do modelo. Um alto valor deste parâmetro permite maior precisão, entretanto, pode dificultar a convergência do problema, outro agravante pode ser observado na Figura 4.13 quando a rigidez é muito alta, o modelo tende a oscilar, com as superfícies de contato se repelindo [13, 14].



**Figura 4.13 – Efeito da rigidez no contato [10]**

Formulações baseadas na penalidade e Lagrange têm sido largamente utilizados na implementação dos códigos computacionais para tratamento de condições de restrição sendo estas encontradas na maioria dos *softwares* de elementos finitos.

# 5 METODOLOGIA DE ANÁLISE

## 5.1 Introdução

A metodologia de análise desta seção é baseada na norma ISO 13624-2 [42] que fornece requisitos para o projeto, seleção, operação e manutenção de um sistema de *riser* de perfuração. A norma está baseada em princípios básicos de engenharia e na experiência acumulada de operadoras *offshore*, empreiteiros, consultores e fabricantes.

Autores como CHAKRABARTI [27], SPARKS [74] e W. He *et al* [80] também foram fontes de referência para esta seção, visto que, suas publicações fornecem um conteúdo complementar para um melhor entendimento das metodologias de análise para *risers* verticais.

## 5.2 Metodologia de Análise da Unidade Flutuante

A metodologia desacoplada considera os movimentos do casco da unidade flutuante separadamente do comportamento estrutural dinâmico não linear da coluna de *riser*, tal metodologia é vantajosa quando utilizada para unidades de perfuração operando em cenários de lâminas d'águas rasas, a opção por esta metodologia, reduz os custos computacionais [80].

Entretanto, pelo fato da metodologia desacoplada, não considerar o casco da unidade de perfuração e o *riser* como um sistema integrado, a interação do comportamento dinâmico não linear destes componentes não é considerada de forma rigorosa, dessa maneira, simplificações relacionadas ao procedimento de análise podem comprometer a qualidade dos resultados quando a operação é realizada em lâminas d'água profundas e ultraprofundas [30, 42, 46].

A metodologia acoplada é realizada em apenas uma etapa que considera a interação dinâmica não linear do comportamento hidrodinâmico do casco da unidade flutuante com o comportamento estrutural/hidrodinâmico da coluna de *riser* [69].

Na metodologia acoplada, o casco e os *risers* compõem um sistema integrado, pois o programa associa um modelo hidrodinâmico, que calcula as cargas ambientais aplicadas no casco da unidade flutuante e determina seus movimentos, a modelos de

elementos finitos, que representam o comportamento estrutural e hidrodinâmico da coluna.

O equilíbrio do sistema é obtido em cada passo de tempo do procedimento de solução das equações de movimento, o que proporciona um tratamento consistente entre os movimentos da unidade flutuante e a resposta estrutural do *riser*, garantindo maior confiabilidade nos resultados [30, 46, 69].

### 5.3 Metodologia de Análise do *Riser* de Perfuração

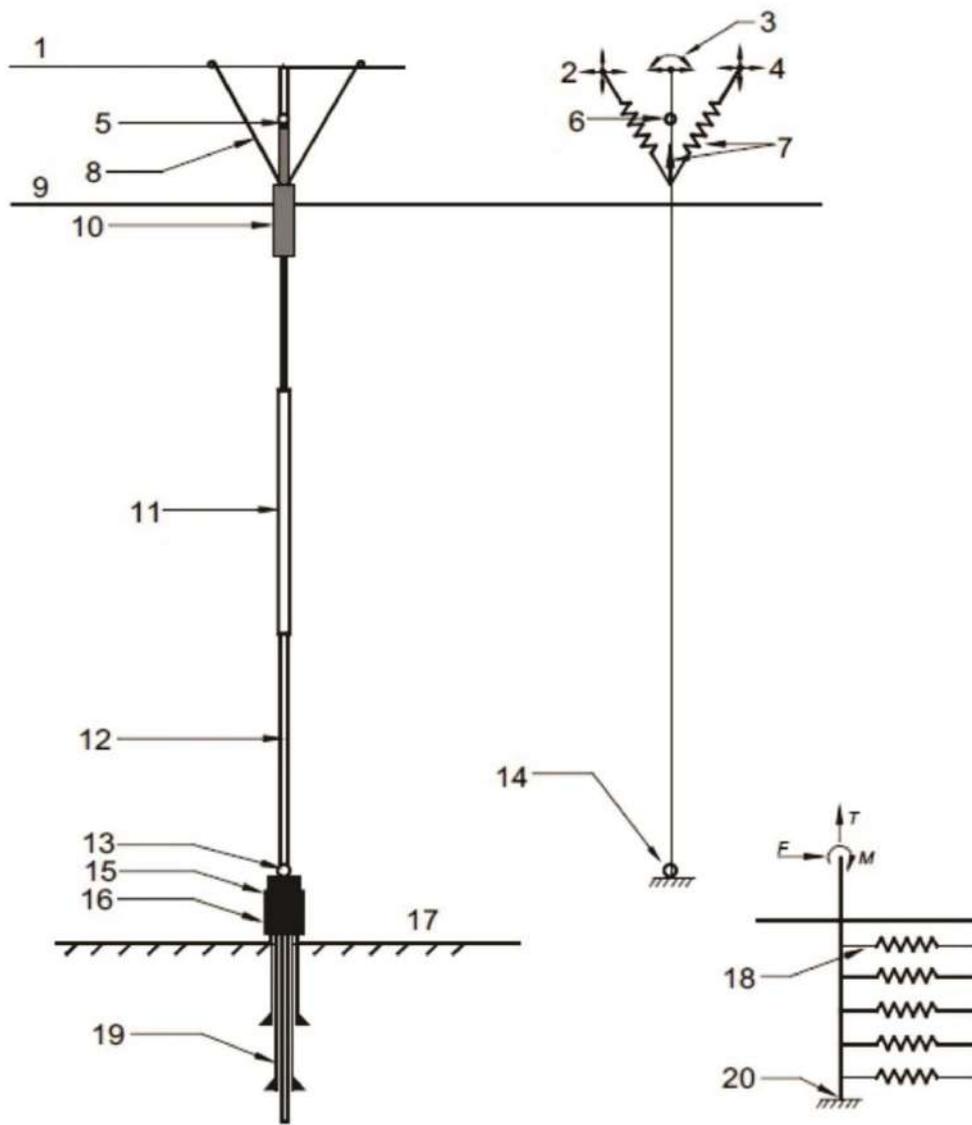
De acordo com a norma ISO 13624-2 [42] o *riser* de perfuração é melhor representado como um sistema onde também se considera a interação do solo/poço revestido com a coluna de *riser*.

A metodologia de análise do *riser* de perfuração divide-se em metodologia desacoplada e metodologia acoplada a escolha apropriada entre uma ou outra deve levar em consideração o cenário analisado, tipo de resposta, tempo de processamento, etc.

Por exemplo, uma análise acoplada é um método mais apropriado quando a resposta do condutor/revestimento é um fator determinante para o projeto. Outro exemplo é uma análise de deriva, onde no método acoplado, o BOP deflete com o *riser*, enquanto que no método desacoplado, a base do modelo do *riser* (LMRP/interface com a junta flexível) é restringida do movimento de translação.

A metodologia desacoplada é um procedimento de análise realizado em dois estágios, onde dois modelos separados são usados para prever o comportamento do *riser* de perfuração.

Conforme ilustra a Figura 5.1 o primeiro modelo estende-se a partir do topo do LMRP até a junta flexível superior, por sua vez, o segundo estende-se do condutor/revestimentos até o LMRP. As cargas resultantes na base do primeiro modelo são aplicadas ao topo do segundo modelo para avaliar o comportamento do *riser* de perfuração no solo.



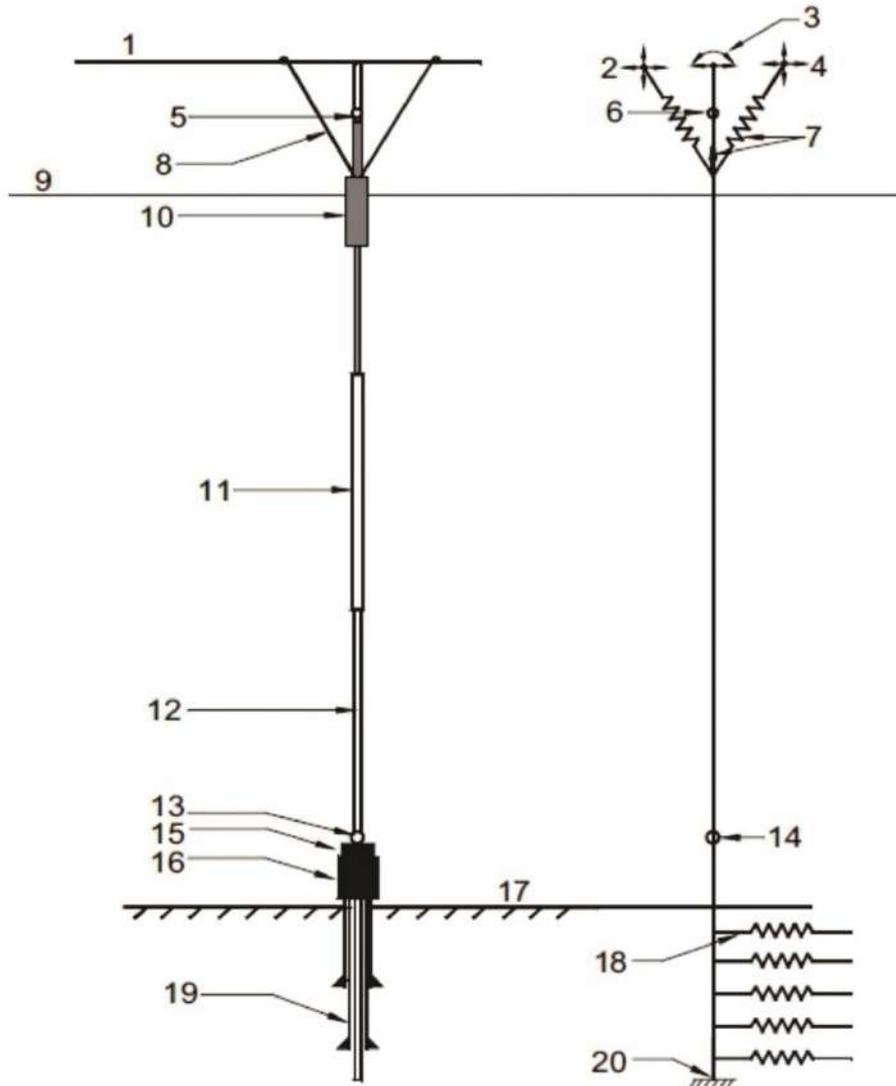
**Legenda:**

- |  |   |
|--|---|
| 1 sonda de perfuração  | 11 juntas de riser com flutuadores                          |
| 2 heave/surge/sway   | 12 juntas de riser  |
| 3 surge/sway/pitch/roll  | 13 junta flexível inferior                                  |
| 4 heave/surge/sway   | 14 elemento de articulação da junta flexível inferior       |
| 5 junta flexível superior  | 15 lower marine riser package - LMRP                        |
| 6 elemento de articulação da junta flexível superior   | 16 blowout preventer - BOP                                  |
| 7 sistema tracionador modelado com elementos de mola/viga ou com tração vertical equivalente | 17 leito marinho  |
| 8 tracionadores  | 18 elementos de mola que modelam a interação solo-estrutura |
| 9 lâmina d'água  | 19 condutor/revestimentos                                   |
| 10 slip joint  | 20 todos os graus de liberdade fixos.                       |

**Figura 5.1 – Metodologia de análise desacoplada [42]**

Por sua vez, a metodologia acoplada é um procedimento de análise realizado em um único estágio. Conforme ilustra a Figura 5.2, a modelagem do sistema de *riser* estende-se do condutor/revestimentos até a junta flexível superior.

Onde os movimentos da plataforma conjuntamente com os carregamentos de onda, vento e corrente são aplicados ao elemento articulado, sendo possível, em uma única etapa prever o comportamento do *riser* e a resposta de possíveis deslocamentos no condutor/revestimentos interagindo com o solo.



**Legenda:**

- |  |   |
|--|---|
| 1 sonda de perfuração  | 11 juntas de riser com flutuadores                          |
| 2 heave/surge/sway   | 12 juntas de riser  |
| 3 surge/sway/pitch/roll  | 13 junta flexível inferior                                  |
| 4 heave/surge/sway   | 14 elemento de articulação da junta flexível inferior       |
| 5 junta flexível superior  | 15 lower marine riser package - LMRP                        |
| 6 elemento de articulação da junta flexível superior   | 16 blowout preventer - BOP                                  |
| 7 sistema tracionador modelado com elementos de mola/viga ou com tração vertical equivalente | 17 leito marinho  |
| 8 tracionadores  | 18 elementos de mola que modelam a interação solo estrutura |
| 9 lâmina d'água  | 19 condutor/revestimentos                                   |
| 10 slip joint  | 20 todos os graus de liberdade fixos.                       |

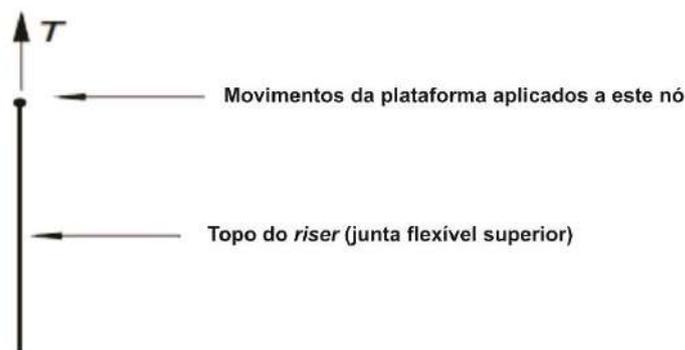
**Figura 5.2 – Metodologia de análise acoplada [42]**

### 5.3.1 Metodologia de Análise do Sistema de Tração

Um sistema de tração de um *riser* é composto tipicamente por quatro ou mais tracionadores, entretanto, a metodologia de modelagem apresentada pela norma ISO 13624-2 [42] permite que o sistema seja representado por um ou dois tracionadores.

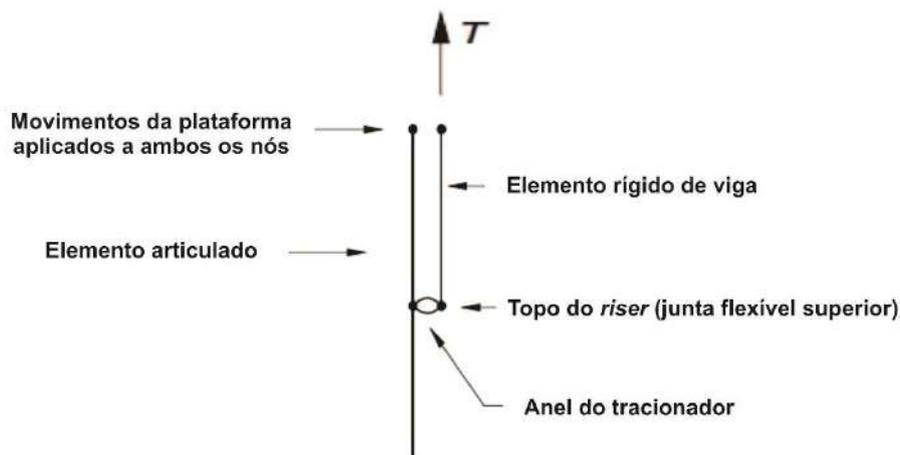
A norma certifica quatro modelos, dois simplificados, modelados implicitamente, onde o efeito do sistema de tração aplica uma tração constante, linear, a coluna de *riser* e outros dois modelos mais elaborados, modelados explicitamente, onde há não linearidade aplicada a coluna para representar o comportamento do sistema.

Conforme ilustrado na Figura 5.3 a primeira abordagem para modelar o sistema é aplicando uma tração vertical no topo do *riser*, este é o método mais básico, a desvantagem é que a tração sempre age na direção vertical, ao em vez do longo do eixo do *riser*.



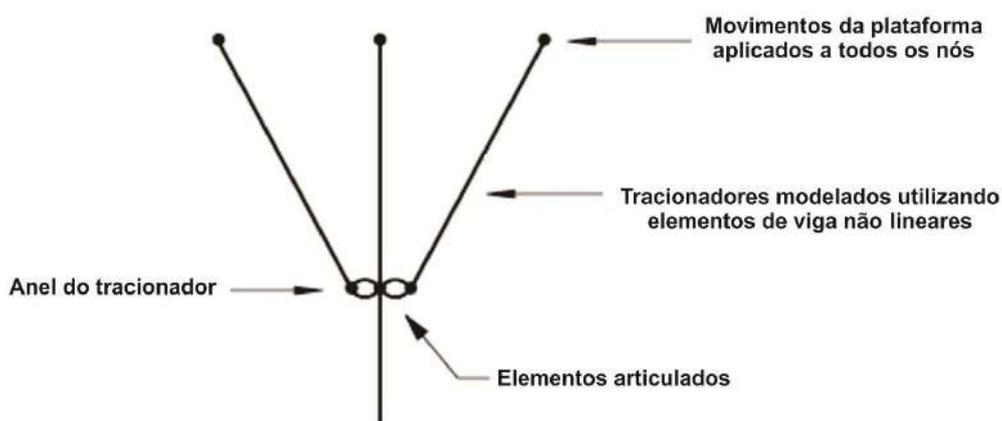
**Figura 5.3 – Primeiro modelo simplificado [42]**

A Figura 5.4 ilustra uma segunda abordagem para modelar o sistema, neste método, a tração é aplicada a coluna por um elemento rígido, sem massa e paralelo que está ligado ao anel tracionador por meio de um elemento de articulação. Deste modo o elemento rígido deflete junto com o *riser* de perfuração de maneira que a tração aplicada ao *riser* sempre atua ao longo do eixo longitudinal da coluna.



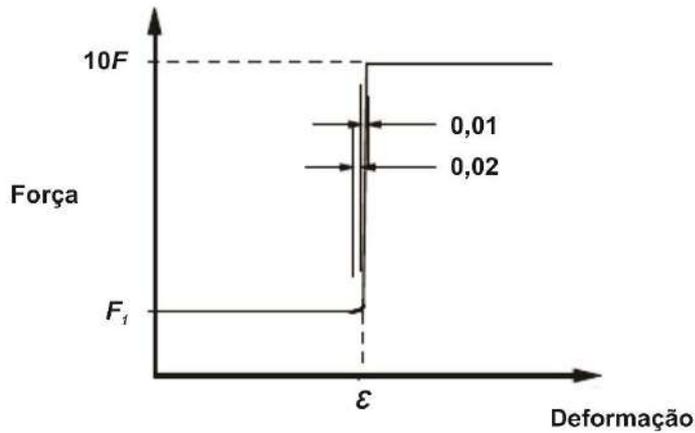
**Figura 5.4 – Segundo modelo simplificado [42]**

O primeiro modelo mais elaborado está ilustrado na Figura 5.5. Os tracionadores são modelados inclinados e o ângulo formado entre o sistema tracionador e o eixo do *riser* é denominado *fleet angle*. Tendo em vista um modelo não linear de viga, a tração é aplicada à coluna usando uma rigidez axial não linear.



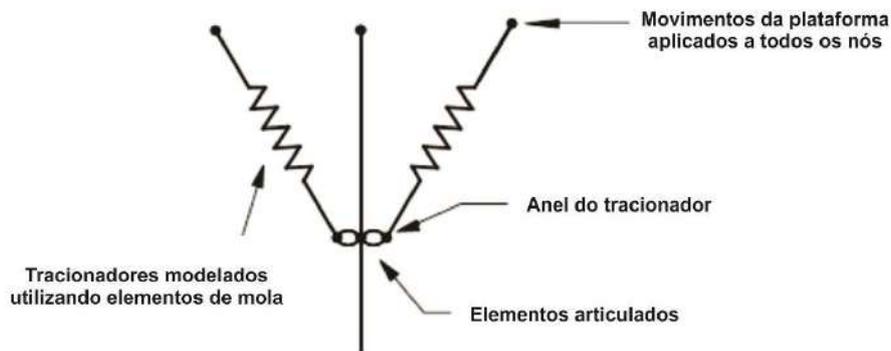
**Figura 5.5 – Modelo não linear de viga [42]**

A relação não linear de força *versus* deformação ou deflexão é apresentada na Figura 5.6, onde  $F$  é a força no elemento tracionador e  $\epsilon$  é a deformação do elemento tracionador.

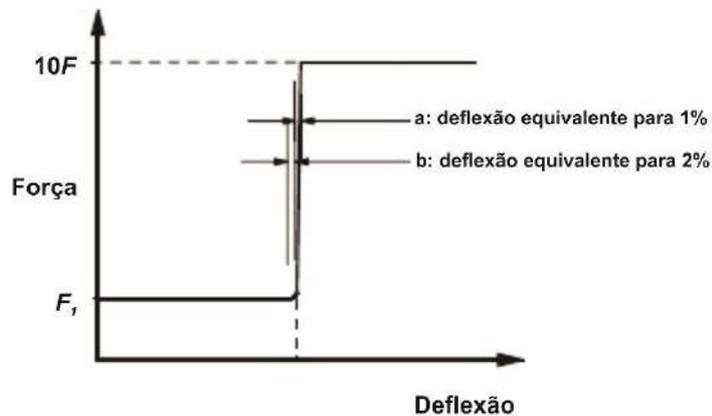


**Figura 5.6 – Relação não linear força *versus* deformação [42]**

O segundo modelo mais elaborado (Figura 5.7) utiliza elementos não lineares de mola, a tração é tipicamente aplicada ao *riser* usando uma força não linear *versus* curva de deflexão. A Figura 5.8 ilustra a curva força *versus* deflexão.



**Figura 5.7 – Modelo não linear de mola [42]**



**Figura 5.8 – Relação não linear força *versus* deflexão [42]**

Conforme mencionado anteriormente o ângulo formado entre o sistema tracionador e o eixo do *riser* é denominado *fleet angle*, logo a Equação (5.1) determina a tração total aplicada ao *riser* de perfuração por cada tracionador do sistema.

$$F_R = F_{tracionador} \times \cos \theta \quad (5.1)$$

Onde  $F_R$  é a força exercida na direção axial do *riser*,  $F_{tracionador}$  é a força do tracionador e  $\theta$  é o ângulo do tracionador em relação a vertical, *fleet angle*. Sendo assim o somatório de  $F_R$  determina a tração máxima que está sendo aplicada ao sistema.

Conforme ilustrado na Figura 5.6 e na Figura 5.8, o *stroke-out*, termo em inglês usado para referir-se ao batente do elemento, é modelado pela incorporação de uma rampa no sentido axial/rigidez da mola de cada elemento do tracionador na deformação/deflexão correspondente ao *stroke-out* do tracionador.

Ainda observando a Figura 5.6, percebemos, que a força no elemento pode ser gradualmente aumentada ao longo de uma deformação de 2% antes do *stroke-out*, por sua vez, a Figura 5.8, ilustra que no *stroke-out*, a força pode ser rapidamente aumentada ao longo de uma deformação de 1%.

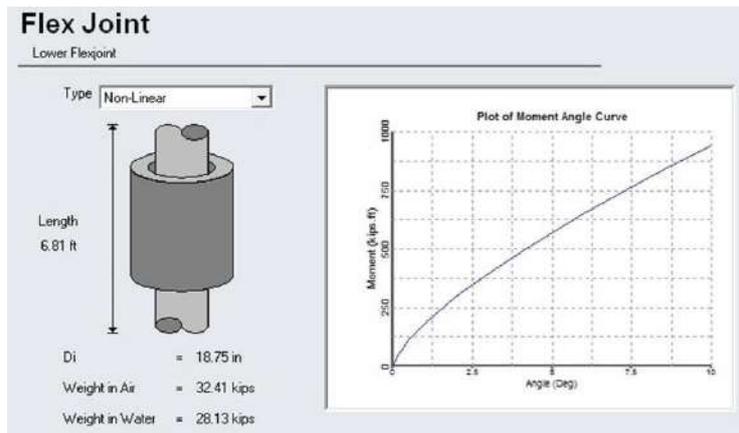
Este procedimento pode ser necessário para evitar qualquer instabilidade numérica na implementação da análise, devido à rápida mudança no sentido axial/rigidez da mola no *stroke-out*.

De acordo com a norma ISO 13624-1 [41] a tração mínima necessária para garantir a estabilidade do *riser* deve ser suficientemente alta para que a tração efetiva se mantenha sempre positiva ao longo da coluna, mesmo em caso de falha em algum tracionador.

### 5.3.2 Metodologia de Análise da Junta Flexível

Conforme mencionado na seção 2.3.3 as juntas flexíveis reagem a esforços de tração, compressão e deflexões angulares, permitem também rotação angular, sendo que a rigidez rotacional é uma função não linear do ângulo e apresenta uma grande variedade de rigidez disponível por grau de rotação.

Portanto, o uso de um elemento de articulação com rigidez rotacional não linear representa a maneira mais precisa de modelar uma junta flexível, normalmente, a curva é fornecida pelo fabricante que é usada como entrada de dados para o elemento de articulação não linear. A Figura 5.9 ilustra uma curva fornecida pelo fabricante.



**Figura 5.9 – Curva não linear da junta flexível [59]**

Como alternativa, em relação a dependência do fabricante para fornecimento dessas curvas, a norma possibilita modelar a junta flexível usando um elemento de articulação linear, a modelagem ocorre por uma aproximação da função não linear sendo a rigidez a flexão, a rigidez axial e a rigidez a torção representadas por uma função linear.

No sistema internacional de unidades a entrada do valor de rigidez rotacional das juntas flexíveis tem unidade de momento por ângulo, sendo kN.m/deg. Desta forma é realizada uma aproximação da rigidez a flexão  $EI$ , em kN.m<sup>2</sup>, do segmento do material que representa as juntas flexíveis, para representar a rigidez rotacional pontual destas estruturas.

Observando a Equação (5.2) note que o momento fletor total devido a contribuição dos dois elementos é dado por  $M$  e o momento fletor total na junta flexível,  $M_1$  e  $M_2$  é o momento fletor no elemento 1.

$$M = M_1 + M_2 \quad (5.2)$$

Substituindo na equação.

$$M_1 = M_2 = \left(\frac{4EI}{L}\right)\theta_A + \left(\frac{2EI}{L}\right)\theta_B \quad (5.3)$$

Onde,  $EI$  é a rigidez à flexão e  $L$  comprimento de cada elemento, por sua vez, os ângulos  $\theta_A$  e  $\theta_B$  são os ângulos do elemento, em relação ao elemento adjacente, a partir dos nós  $A$  e  $B$ .

Substituindo na equação.

$$M = \left(\frac{4EI}{L}\right)\theta_A + \left(\frac{2EI}{L}\right)\theta_B + \left(\frac{4EI}{L}\right)\theta_A + \left(\frac{2EI}{L}\right)\theta_B \quad (5.4)$$

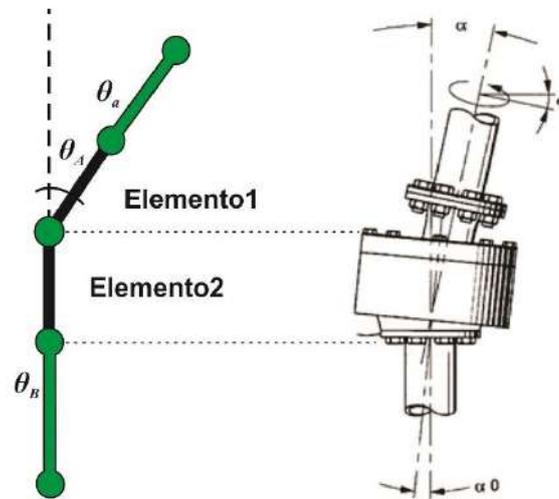


Figura 5.10 – Junta flexível. Adaptado de [83]

Considerando que o ângulo  $\theta_B$  é aproximadamente nulo,  $\theta_B \approx 0$ , a rigidez rotacional  $k_{rot}$  pode ser definida pela Equação (5.5).

$$M = \left(\frac{8EI}{L}\right)\theta_A \therefore k_{rot} = \frac{M}{\theta_A} = \frac{8EI}{L} \quad (5.5)$$

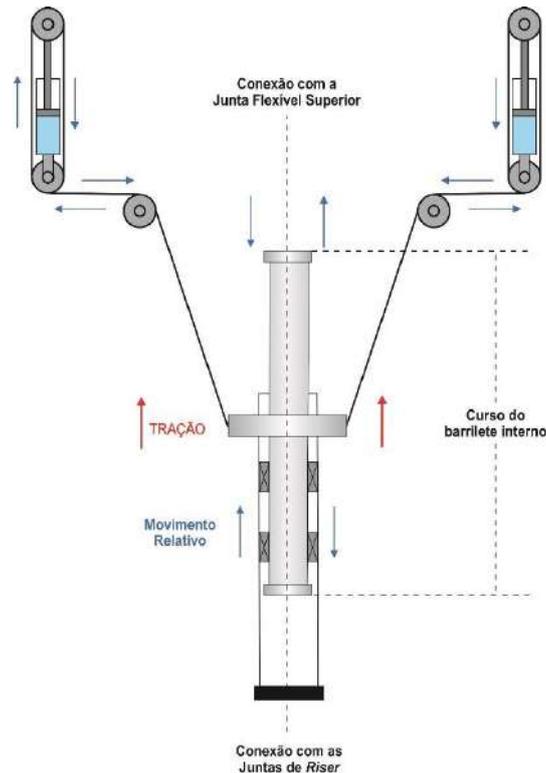
Como  $L$  é igual a metade do comprimento da junta flexível,  $L_{flex}$ , a rigidez à flexão equivalente  $EI$  é dada pela Equação (5.6).

$$k_{rot} = \frac{16EI}{L_{flex}} \therefore EI = \frac{k_{rot}L_{flex}}{16} \quad (5.6)$$

### 5.3.3 Metodologia de Análise da Junta Telescópica

A junta telescópica (Figura 5.11) geralmente é modelada ao comprimento do meio do curso do seu barrilete interno para aumentar a capacidade de compensar a ocorrência de grandes deslocamentos do sistema.

Quando a tração é aplicada ao modelo, a junta telescópica, inicialmente modelada a meio curso, sofre uma pequena alteração no seu comprimento, tal fato, se deve pela quantidade de movimento ascendente do *riser* devido à tração aplicada. Este efeito, embora pequeno, deve ser contabilizado na modelagem do sistema.

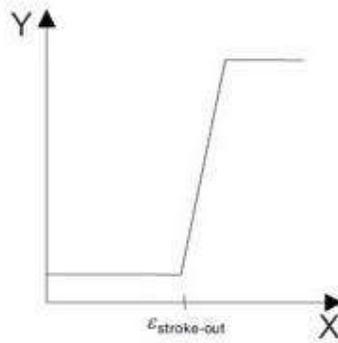


**Figura 5.11 – Barrilete interno da junta telescópica**

Para simular o movimento relativo entre o barrilete interno e externo da junta telescópica, o barrilete interno pode ser modelado como um elemento de viga sem massa com rigidez axial não linear.

Essa técnica, por exemplo, pode ser usada para determinar quando ocorre o *stroke-out* da junta telescópica em uma análise de deriva da sonda. O curso da junta telescópica pode ser modelado de maneira semelhante ao *stroke-out* do tracionador, descrito anteriormente em 5.3.1.

Conforme ilustra a Figura 5.12 para simular com precisão o movimento de acionamento da junta telescópica, o barrilete interno é modelado como um elemento de viga sem massa com rigidez axial não linear. A rigidez axial não linear é aplicada ao elemento usando uma curva de tensão *versus* deformação.



**Figura 5.12 – Curva tensão *versus* deformação [42]**

Enquanto a junta telescópica está dentro do seu limite de curso, o sistema não aplica tração ao *riser*, ainda observando a Figura 5.12, junto ao elemento de viga não linear usado para modelar o barrilete interno, incorpora-se uma grande rampa na rigidez axial no comprimento do elemento que corresponde ao deslocamento para fora.

Após a parada, este modelo induz uma grande força adicional no *riser* a partir da restrição vertical na mesa rotativa.

#### 5.3.4 Metodologia de Análise do Solo

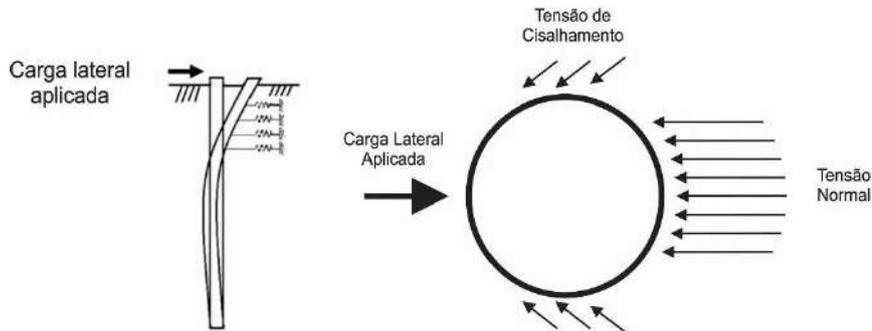
A norma API RP 2GEO [5] apresenta requisitos e recomendações para os aspectos de geociência e engenharia de fundações que são aplicáveis a uma ampla variedade de estruturas *offshore*, dentre os quais, aspectos da interação solo-estruturas de *risers*.

Um aspecto básico na modelagem é a reação do solo, ou seja, a resistência lateral do solo em função dos deslocamentos, carga lateral aplicada ao revestimento.

A Figura 5.13 ilustra os esforços gerados pela reação do solo na seção de um revestimento devido ao deslocamento gerado pelo carregamento lateral. A reação desenvolve-se principalmente, na direção do carregamento, através de tensões normais de compressão à seção do revestimento.

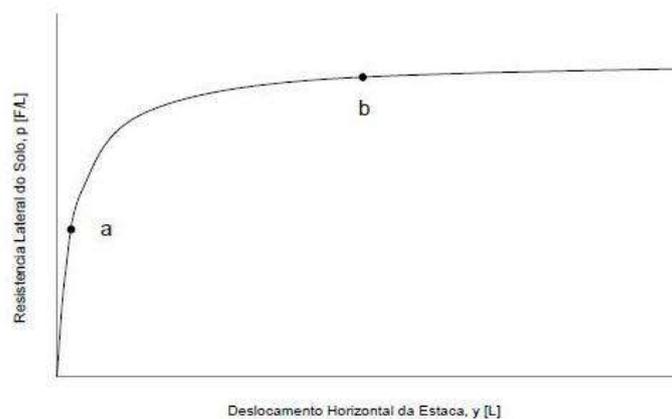
Ainda observando a Figura 5.13 na região lateral do revestimento, observa-se tensões cisalhantes que podem induzir deslizamentos na região de interface solo-revestimento, na parte de trás, o solo tende a ser tracionado.

Entretanto, em razão da magnitude das tensões de compressão em relação a tensão de cisalhamento e o fato de o solo resistir pouco à tração, podemos desprezar a resistência do solo nestas regiões [5, 38].



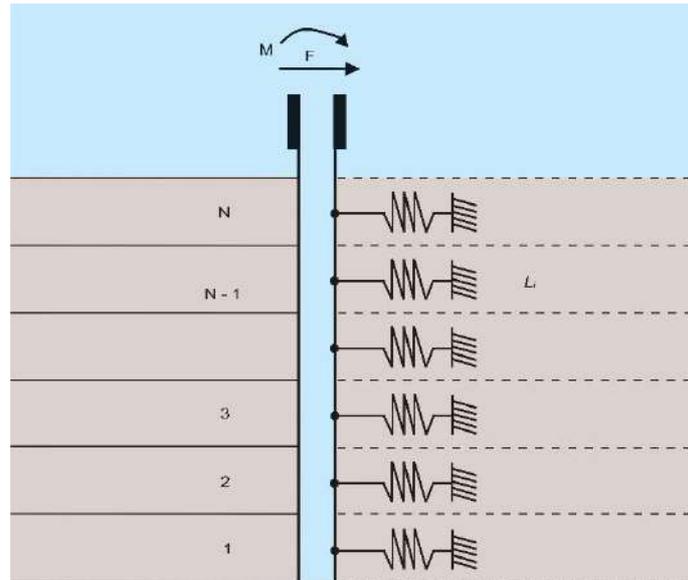
**Figura 5.13 – Reação do solo no revestimento [38]**

O solo é representado por meio de curvas P-y, que relacionam a reação lateral e a deflexão lateral onde P corresponde à pressão sofrida pelo revestimento devido a um deslocamento horizontal y. A Figura 5.14 ilustra uma curva P-y típica.



**Figura 5.14 – Curva p-y típica [38]**

Conforme ilustra a Figura 5.15, na modelagem, o solo é discretizado em camadas e o revestimento é dividido em segmentos conectados por nós e associado a cada nó há uma mola com rigidez não linear [6, 38].



**Figura 5.15 –Discretização do solo em camadas**

Fazendo uso da Equação (5.7) podemos determinar a rigidez da mola.

$$K = k_h \times d_p \times L_i \quad (5.7)$$

Onde  $k_h$  é o coeficiente de reação horizontal do solo que relaciona pressão de um ponto com o deslocamento do mesmo, e  $L_i$  é a distância entre as molas a parcela  $d_p$  funciona com multiplicador de  $L_i$  para determinar o volume.

Para os elementos de mola não lineares, usados neste caso, a rigidez da mola é especificada por uma curva P-y, de acordo com a Equação (5.8) para cada profundidade a mesma é convertida para uma curva força *versus* deslocamento [42].

$$F = P \times L_i \quad (5.8)$$

Onde  $F$  é a força axial na mola,  $P$  é a resistência do solo e  $L_i$  é o espaçamento das molas do solo.

## 5.4 Metodologia de Análise do Contato

Já existem muitas técnicas eficientes para a detecção de contato entre elementos sólidos e não deformáveis, porém, essas técnicas não apresentam o mesmo desempenho quando aplicadas em elementos deformáveis.

Quando se realiza uma análise estática linear, implicitamente considera-se como parte da solução que os deslocamentos e as deformações são pequenos e que não há impacto entre os elementos em contato.

Em análises dinâmicas a interação entre os elementos envolve um nível maior de complexidade, sobretudo quando o ponto de contato é desconhecido, a solução do problema passa a ser dividida em etapas onde: o movimento dos corpos deve ser avaliado, a distância estimada, o impacto identificado e as forças de ação e reação calculadas [18, 87].

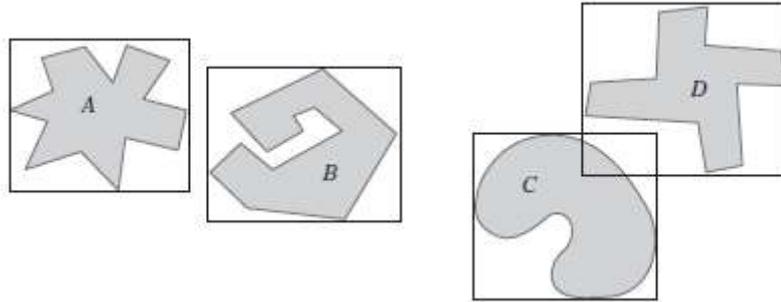
Em função dos altos custos computacionais otimizar o tempo de execução das análises que envolvem impacto tornou-se um grande desafio para os desenvolvedores, modelos mais detalhados, maior densidade da malha, menores intervalos de integração, implementação das restrições de contato necessitam de melhores processadores para garantir o desempenho computacional.

Implementações para algoritmos de busca para identificação dos pontos onde ocorre o contato são amplamente encontrados na literatura, normalmente estes algoritmos baseiam-se em testes de pertinência, onde geralmente, determina-se um ponto e caso este ponto passar a pertencer ao domínio de um elemento significa, que a superfície desse elemento em algum momento foi cruzada pelo ponto.

Testar diretamente a geometria de elementos candidatos ao impacto costuma ser muito caro, especialmente quando os elementos são modelados por centenas ou até milhares de polígonos, a fim de minimizar esse custo, os volumes envoltórios geralmente são testados quanto à sobreposição antes da execução do teste de interseção geométrica.

Um volume envoltório é um volume simples e único que encapsula um ou mais elementos de natureza mais complexa, os volumes mais simples, como caixas ou esferas, apresentam testes de sobreposição mais baratos que os elementos complexos que eles envolvem [17, 81].

Conforme observado na Figura 5.16 os volumes envoltórios de A e B não se sobrepõem, sendo assim A e B não podem se cruzar, por sua vez a interseção entre C e D não pode ser descartada visto que seus volumes envoltórios se sobrepõem.

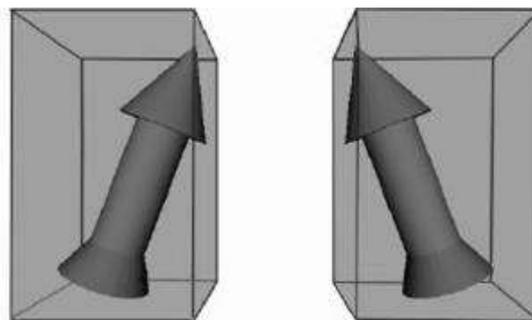


**Figura 5.16 – Volumes envoltórios [35]**

Para algumas aplicações, o próprio teste de interseção é suficiente para identificar o impacto, além do mais, os testes podem incluir consultas como inclusão de pontos, interseção de raios com o volume e interseção com planos e polígonos.

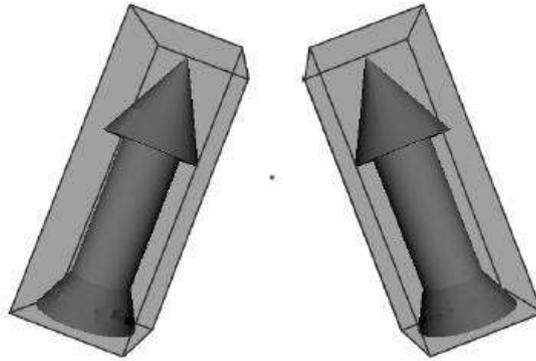
Muitas formas geométricas foram sugeridas como volumes envoltórios os algoritmos baseados em caixas delimitadoras como as caixas alinhadas aos eixos (*axis aligned bounding box*), caixas orientadas (*oriented bounding box*) provaram-se eficientes para a identificação de problemas de impacto.

No caso de caixas alinhadas aos eixos (Figura 5.17) os elementos passíveis de impacto são envolvidos por uma caixa na qual a normal de cada face é paralela aos eixos do sistema de coordenadas.



**Figura 5.17 – Caixas alinhadas aos eixos**

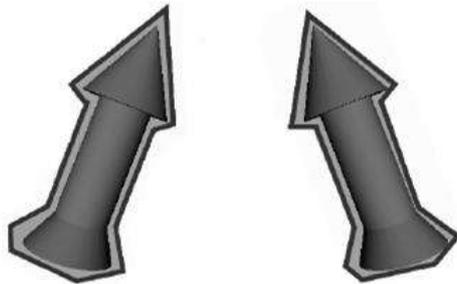
Na abordagem utilizando caixas orientadas (Figura 5.18) o volume envoltório apresenta orientação e inclinação em conformidade com o elemento que envolve, essa característica possibilita a melhorar na precisão e na identificação da intersecção do ponto de contato [17, 35].



**Figura 5.18 – Caixas orientadas**

Ainda assim durante a detecção do impacto pode ocorrer a intersecção das caixas sem que os elementos tenham realmente colidido, isto ocorre porque o volume envoltório não fica totalmente ajustado ao elemento.

Como alternativa a essa limitação os algoritmos de politopos com  $n$  orientações discretas (*discrete oriented polytope*) podem criar um volume envoltório mais justo ao elemento, conforme ilustrado pela Figura 5.19.



**Figura 5.19 - Polítopos com  $n$  orientações discretas**

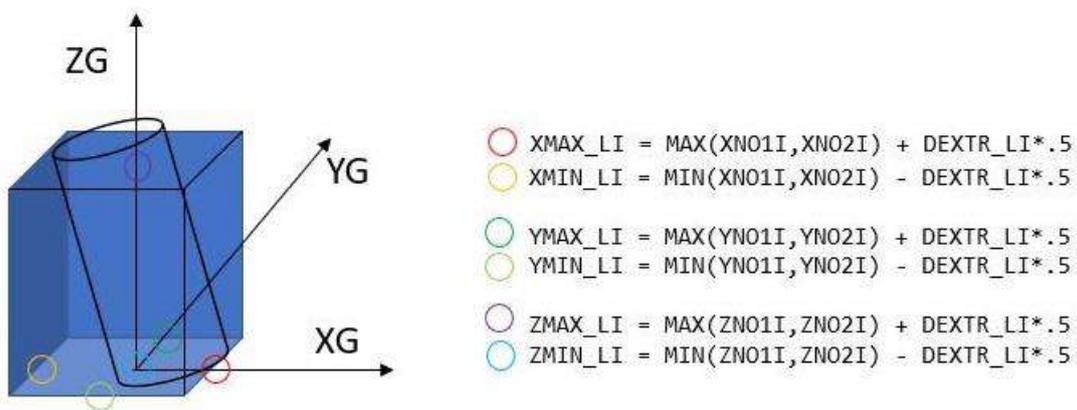
Normalmente os testes dos volumes envoltórios são calculados em uma etapa de pré-processamento e, conforme necessário, se um ajuste fino realmente for necessário recomenda-se a opção por politopos entretanto deve-se considerar que com aumento do tempo do teste de volume o custo computacional se torna mais caro e o requisito de armazenamento para o volume aumenta [35, 87].

Formas geométricas mais simples requerem menos espaço na memória, como muitas das propriedades desejadas são amplamente mutuamente exclusivas, nenhum volume específico é a melhor escolha para todas as situações, em vez disso, a melhor opção é testar alguns volumes diferentes para determinar o mais apropriado para uma

determinada aplicação. Segundo ERICSON [35] do ponto de vista do custo computacional os testes de volume *bounding box*, aplicados a grandes estruturas, apresentam resultados satisfatórios quando comparados aos outros.

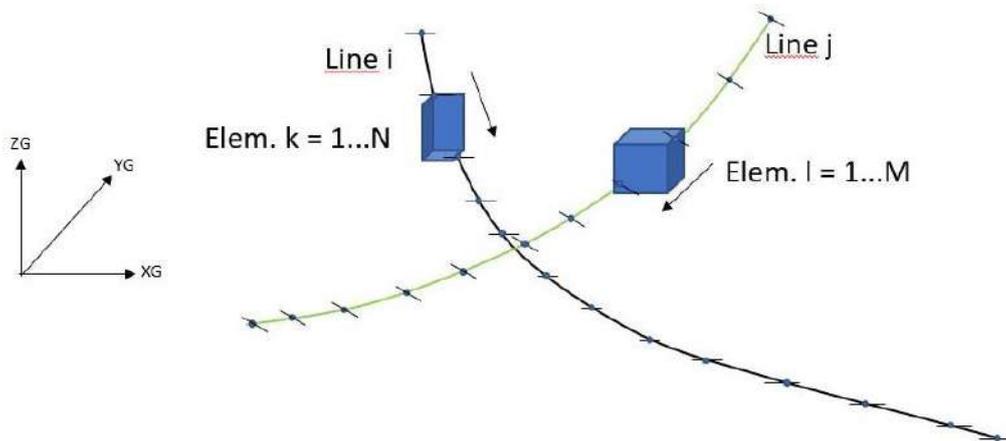
O SITUA/Prosim utiliza o procedimento iterativo de Newton-Raphson para avaliar o problema não linear em cada etapa do tempo, adicionalmente o algoritmo alfa-B Newmark adapta o passo de tempo para otimizar a solução do problema dinâmico. Os testes do *bounding box* são calculados em uma etapa de pré-processamento, na segunda etapa do processamento há a avaliação do ponto de contato ao longo dos elementos finitos.

O intuito do *bounding box* é otimizar a busca pelas regiões de contato eliminando nesta etapa os elementos distantes uns dos outros, a verificação se dá pelas máximas e mínimas coordenadas do volume, sendo a normal de cada face paralela aos eixos globais (Figura 5.2).



**Figura 5.20 – Bounding box**

A Figura 5.21 ilustra a verificação das regiões de contato, observe que para cada estrutura passível ao contato, há um volume *bounding box* associado realizando a verificação, em cada intervalo de integração, elemento por elemento ao longo da estrutura.



**Figura 5.21 – Bounding box (contato entre linha)**

A ferramenta de contato do SITUA/Prosim disponibiliza duas opções de contato, o contato com corpos e o contato com linhas, selecionando o contato com linhas o usuário deve informar qual linha estará interna a outra, caracterizando assim uma estrutura do tipo *pipe-in-pipe*.

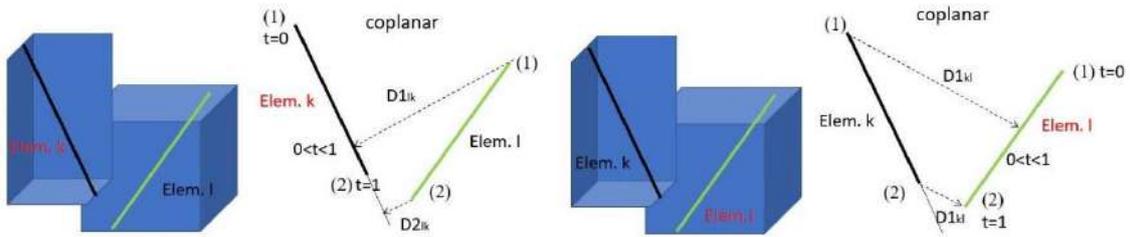
Definida a região de contato a segunda etapa do processamento avalia o ponto de contato ao longo dos elementos finitos.

A solução analítica dos cálculos de distância entre as formas geométricas primitivas, como linhas, segmentos de linha ou circunferências é encontrada na literatura tradicional de geometria analítica, publicações como as de BOWYER [23] e ERICSON [35] em acréscimo apresentam implementações das formulações clássicas.

A premissa para o cálculo da distância entre um ponto e uma linha reta, parte do princípio que o ponto tem que estar fora da reta, caso contrário a distância entre eles é zero.

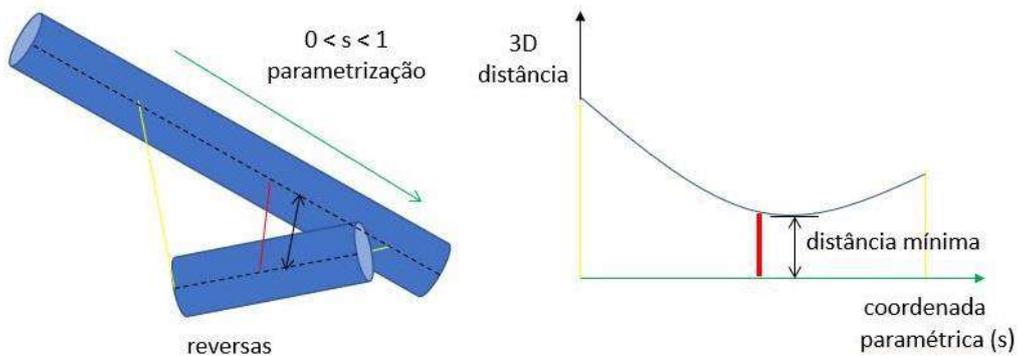
Quando está premissa é verdadeira verifica-se se as retas são coplanares, ou seja, se estão em um mesmo plano, estando elas podem ser concorrentes ou paralelas, quando não possuem ponto de interseção ou ponto em comum são paralelas, por outro lado, serão concorrentes se possuem apenas um ponto comum.

A Figura 5.22 ilustra a interseção entre dois *bounding box*, nesta condição o próximo passo é calcular a distância entre os elementos envolvidos, neste caso o elemento avaliado é uma linha.



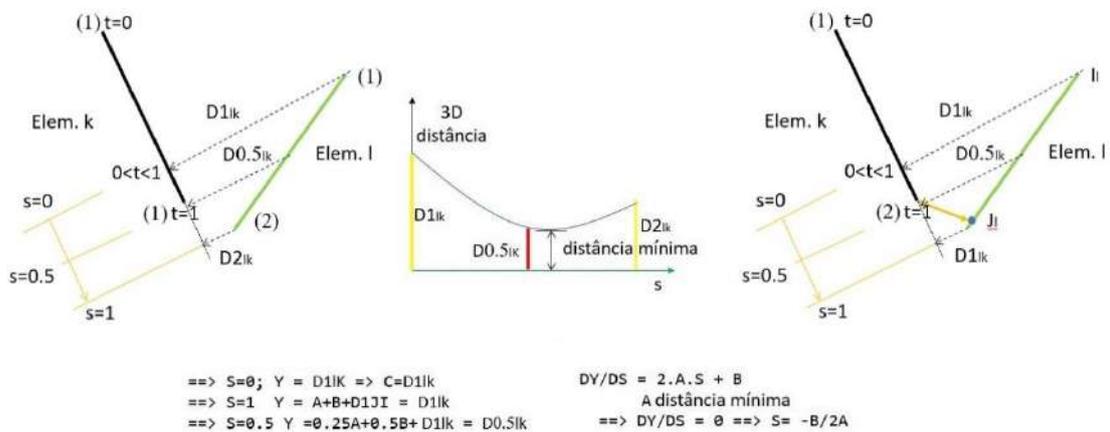
**Figura 5.22 – Distância ponto a reta**

Projetando o cálculo de distância do plano para uma geometria 3D, verifica-se se as retas são reversas, esses tipos de retas estão presentes em planos distintos, sendo assim a aproximação parabólica (Figura 5.23) possibilita uma estimativa da distância mínima entre as linhas.



**Figura 5.23 – Aproximação parabólica (plano 3D)**

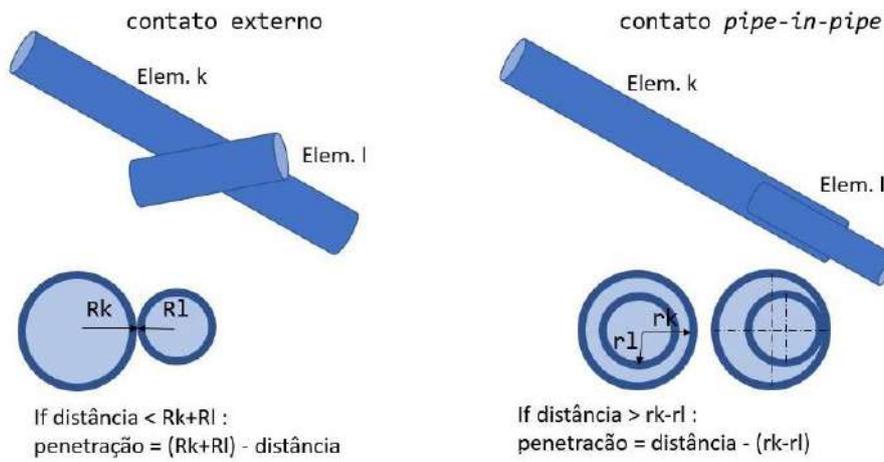
Interpretando a rotina ilustrada na Figura 5.24, chegamos a seguinte condição, se  $s$  estiver no elemento  $k$  significa que a distância mínima foi definida, caso contrário, calcula-se a distância  $D1kl$ .



**Figura 5.24 - Aproximação parabólica**

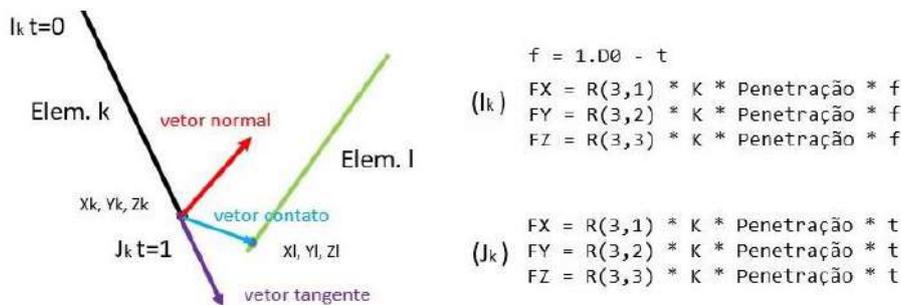
A etapa final de verificação ocorre pela posição relativa entre duas circunferências, para o contato externo, quando as circunferências estão tangentes externamente, ocorre o contato em um único ponto de intersecção, e a distância entre o centro é exatamente a soma entre os raios  $r_k + r_l$  (Figura 5.25).

Ainda observado a Figura 5.25 a verificação do contato *pipe-in-pipe* se dá quando uma circunferência se encontra interna a outra o ponto interno de tangência corresponde a distância entre os centros das circunferências sendo a mesma obtida da subtração dos raios  $r_k - r_l$ .



**Figura 5.25 – Posição relativa entre duas circunferências**

Por fim assumindo que na condição *pipe-in-pipe* há contato entre os elementos, observamos na Figura 5.26 uma rotina para demonstrar o cálculo dos esforços no ponto de contato. Aplicando uma força no vetor  $k$ , determina-se os vetores de contato, normal e tangente na sequência calcula-se a matriz de rotação e por meio de um processo iterativo obtêm-se o resultado da rigidez e dos esforços globais.



**Figura 5.26 – Cálculo dos esforços no ponto de contato**

# 6 AMORTECIMENTO

## 6.1 Introdução

O amortecimento, ou atrito interno, é uma das propriedades mais sensíveis de materiais e estruturas, sendo um fenômeno físico observado em sistemas mecânicos que atua na dissipação de energia sob a forma de calor, ruído, atrito ou por histerese, sendo que este fenômeno determina a amplitude de vibração na ressonância e o tempo de persistência da vibração depois de cessada a excitação [63, 73].

O amortecimento de um material ou de um sistema pode ser classificado como amortecimento interno, amortecimento estrutural ou amortecimento fluídico.

O amortecimento interno está associado aos defeitos na microestrutura, granularidade e impurezas do material e a efeitos termoelásticos causados por gradientes locais de temperatura. Existem dois tipos diferentes de modelos que são utilizados para representar o amortecimento interno, o modelo viscoelástico e o modelo histerético.

Por sua vez o amortecimento estrutural está associado a perdas de energia por atrito entre partes quando estas se movem uma em relação à outra, por exemplo, juntas, mancais, parafusos e articulações semi-rígidas [29, 31, 63].

Sendo assim, este amortecimento é resultado da dissipação de energia mecânica causada por atrito devido ao movimento relativo entre componentes e por impacto ou contato intermitente nas articulações de um sistema mecânico ou estrutura. O modelo de Coulomb normalmente é utilizado para representar a dissipação de energia para este tipo de amortecimento.

E por fim, o amortecimento fluídico ou viscoso ocorre por resistência ao arraste em meio fluídico, por exemplo, a conversão de energia cinética de um pêndulo em energia térmica para o ar ou ainda análogo ao amortecimento devido a viscosidade de um fluido durante seu escoamento.

A dissipação de energia depende em particular do sistema mecânico e, portanto, é extremamente difícil desenvolver um modelo analítico generalizado, sendo que a caracterização do sistema é importante para entender como a energia mecânica é dissipada e sua dependência com a velocidade e com a amplitude de vibração. Um

modelo de amortecimento deve ser escolhido para representar essa dissipação de energia mecânica e permitir o cálculo de parâmetros comparativos de amortecimento [29, 31, 63].

De maneira a descrever matematicamente os padrões de amortecimento, alguns modelos foram propostos, como por exemplo, o modelo viscoso de RAYLEIGH [19] proposto em 1877, o modelo viscoelástico de CHRISTENSEN [20] proposto em 1971, o modelo histerético de BERT [28] proposto em 1973, ou ainda o modelo de atrito de BERGER [64] mais atual de 2002, entre outros.

## 6.2 Amortecimento de Rayleigh

As matrizes de massa e rigidez são desenvolvidas tendo como base o conhecimento das propriedades físicas dos materiais, tais como módulo de elasticidade, razão de Poisson e densidade de massa, no entanto o mesmo não se aplica à montagem da matriz de amortecimento.

O modelo de combinação linear para amortecimento viscoso, apresentado por Rayleigh, é uma aproximação bastante utilizada na composição da matriz de amortecimento, sendo que o modelo considera que a distribuição de massa e rigidez também são medidas para a distribuição de amortecimento, através da seguinte relação:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (6.1)$$

A matriz simétrica  $n \times n$  do amortecimento  $[C]$  é formulada como a combinação linear das matrizes de massa  $[M]$  e de rigidez  $[K]$  onde  $\alpha$  é o coeficiente de massa proporcional e  $\beta$  o coeficiente de rigidez proporcional [31, 63, 73].

O termo  $\alpha[M]$  pode ser interpretado fisicamente como o amortecimento proporcionado pelo meio em volta do sistema, ou seja, similar ao amortecimento externo viscoso. Este amortecimento atua principalmente em baixas frequências, especialmente em movimentos de corpo rígido, portanto sendo mais influente em análises onde há movimentação de corpo livre.

O amortecimento interno ou do material, histerético, é definido pelo termo  $\beta[K]$ , que é fortemente influenciado pela deformação elástica ocorrida no sistema. Este amortecimento é mais influente em vibrações que ocorrem em frequências mais elevadas.

O tipo de amortecimento descrito acima pela Equação (6.1) é conhecido como Rayleigh ou amortecimento proporcional. Esta forma de  $[C]$  é ortogonal em relação aos autovetores do sistema. Aplicando a transformação de coordenadas modal, a matriz de amortecimento modal  $[c]$  se torna diagonal:

$$[\Phi]^T [C] [\Phi] = [c] = \alpha [1] + \beta [\omega^2] \quad (6.2)$$

Pode-se então definir o amortecimento de Rayleigh para estudos dinâmicos lineares e não lineares sendo que a relação entre os coeficientes de Rayleigh e razão de amortecimento modal se dá da seguinte forma:

A matriz de amortecimento modal  $[c]$  é dada por:

$$[c] = 2[\zeta\omega] \quad (6.3)$$

Onde coeficiente de amortecimento viscoso  $c_i$  para o  $i$ -ésimo modo é calculado por:

$$c_i = 2\zeta_i \omega_i = \alpha + \beta[\omega_i^2] \quad (6.4)$$

Sendo que a razão de amortecimento viscoso  $\zeta_i$  é expressa como:

$$\zeta_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad (6.5)$$

Se as razões de amortecimento para os modos  $i$ -ésimo e  $j$ -ésimo são  $\zeta_i$  e  $\zeta_j$ , então os coeficientes de Rayleigh  $\alpha$  e  $\beta$  são calculados a partir da solução das duas equações algébricas:

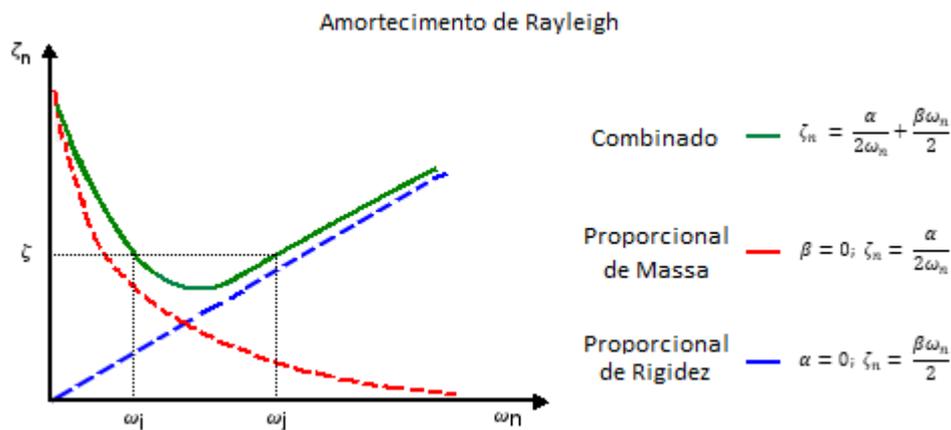
$$\frac{1}{2} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_i} & \omega_i \\ \frac{1}{\omega_j} & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \zeta_i \\ \zeta_j \end{Bmatrix} \quad (6.6)$$

Se ambos os modos têm a mesma razão de amortecimento ( $\zeta_i = \zeta_j = \zeta$ ), então os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  são dados pelas expressões abaixo:

$$\alpha = \zeta \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad \text{e} \quad \beta = \zeta \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (6.7)$$

Onde  $\omega_i$  e  $\omega_j$  são duas frequências naturais do sistema definidas pela análise modal, isto posto, somente dois valores de frequência e amortecimento são considerados, ainda assim o método pode ser aumentado para um sistema de n equações com n valores de  $\zeta$  e  $\omega$ .

Conforme ilustrado na Figura 6.1 a razão de amortecimento viscoso  $\zeta$  para qualquer outro modo varia com a frequência, percebe-se também que o amortecimento correspondente à matriz de massa, decresce hiperbolicamente com o aumento da frequência, por sua vez o amortecimento correspondente a matriz de rigidez cresce linearmente com a frequência [31, 63, 65, 73].



**Figura 6.1 – Amortecimento de Rayleigh [73]**

O amortecimento correspondente a rigidez se mostra bastante eficiente na atenuação de oscilações em altas frequências, pois elimina componentes de alta frequência sem perturbação nos componentes de baixa frequência.

Ainda observando a Figura 6.1 considerando  $\alpha = 0$  a equação do amortecimento correspondente a rigidez permanece como:

$$\beta = \frac{2\zeta}{\omega_n} \tag{6.8}$$

Neste caso o amortecimento é apenas proporcional, e não representa propriamente dito um amortecimento de Rayleigh, importante salientar que a mesma analogia pode ser utilizada na equação do amortecimento correspondente a massa para  $\beta = 0$ .

Na utilização do amortecimento proporcional, recomenda-se que  $\omega_i$  seja a frequência fundamental do sistema e  $\omega_j$  encontra-se entre esta e a frequência mais alta, do qual o modo colabora substancialmente em sua resposta dinâmica.

Percebemos também por meio da Figura 6.1 que para a combinação dos parâmetros de amortecimento de Rayleigh, a razão de amortecimento especificada somente é válida para duas frequências discretas.

Entre estas duas frequências, o amortecimento não apresenta significativa variação devido ao somatório dos efeitos da parcela dependente da massa e da parcela dependente da rigidez. Para proporcionar uma razão de amortecimento nas faixas de frequências de interesses pode-se determinar os coeficientes de amortecimento pelas equações.

$$\beta = \frac{2\zeta}{\omega_i + \omega_j} = \frac{\zeta}{\pi(f_i + f_j)} \quad (6.9)$$

$$\alpha = \omega_i \omega_j \beta = 4\pi^2 f_i f_j \beta \quad (6.10)$$

A razão de amortecimento depende de muitos fatores, entre os quais podemos citar como os mais importantes, o tipo de material, a amplitude das tensões, as forças internas, o número de ciclos, o tipo de geometria, a qualidade das superfícies e a temperatura.

A aquisição de dados proveniente de modelos experimentais ensaiados em laboratório ou validados em modelos computacionais também pode ser utilizada para levantamento dos parâmetros do amortecimento, entretanto a complexidade de grande parte das estruturas de engenharia e erros de medições presentes dos experimentos conferem ao amortecimento uma medida aproximada.

A compreensão do fenômeno de amortecimento ainda apresenta-se como um desafio para os pesquisadores, uma vez que não pode ser identificado e calculado com grande precisão quando por exemplo comparado com outros parâmetros, como as frequências naturais e os modos normais de vibração [39, 44, 45, 57, 65].

# 7 CRITÉRIOS OPERACIONAIS

## 7.1 Introdução

Nesta seção são descritos os principais critérios operacionais utilizados em análises de *riser* de perfuração que funcionam como parâmetros para que a perfuração de um poço submarino possa ser conduzida de forma segura evitando assim eventuais danos aos equipamentos que compõem o sistema.

## 7.2 Tração nos Tracionadores

A tração máxima está limitada pela capacidade total permitida pela embarcação, entretanto, por questões operacionais a tração alvo nas operações realizadas pelo *riser* de perfuração leva em consideração uma margem de segurança.

A tração de topo  $T_{top}$  é a tração aplicada pelo anel tracionador, sendo está calculada por meio da Equação (7.1).

$$T_{top} = W_{riser} + W_{LMRP} + W_{overpull} \quad (7.1)$$

Onde  $W_{riser}$  peso da coluna de *riser*, a partir do anel do tracionador até a junta flexível inferior, o  $W_{LMRP}$  é o peso do LMRP e  $W_{overpull}$  o valor do *overpull*.

O *overpull* é uma carga adicional que deve ser contabilizada ao peso total da coluna de *riser*, este valor de tração adicional é necessário para realizar o procedimento de desconexão de emergência, a tração do *overpull* deve ser suficiente para elevar o LMRP a uma altura segura durante a desconexão evitando assim impactos com o BOP e a cabeça de poço.

Em algumas embarcações, o sistema de tração é configurado para permitir que um tracionador ou um par do equipamento fique fora de operação para manutenção ou reparo sem comprometer a capacidade do sistema, desta forma os demais fornecem a tração necessária ao *riser* de perfuração [27 ,74].

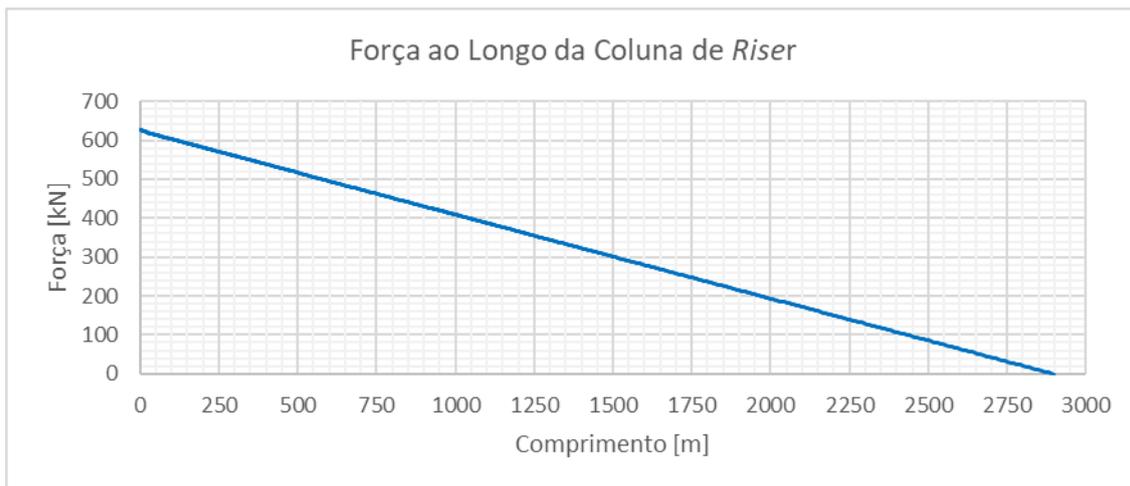
A Equação (7.2) fornece a expressão para o cálculo em cada tracionador, assim é possível estimar o número de tracionadores necessário para compor o sistema.

$$T = \frac{T_{top}}{n \cdot \cos \theta} \quad (7.2)$$

Onde  $T_{top}$  é a tração de topo, fornecida pela Equação (7.1),  $n$  o número de tracionadores do modelo e  $\theta$  o *fleet angle*, o ângulo do tracionador em relação a vertical.

Assim que seja definida a tração de topo, o outro critério que deve ser verificado é a ocorrência de esforços de compressão, a verificação de compressão da coluna pode ser obtida calculando os esforços mínimos atuantes na parte mais inferior do *riser*, mais especificamente na conexão do *riser* com o LMRP, e verificar se os esforços aplicados são de tração ou compressão [42, 74].

A Figura 7.1 ilustra um perfil de força ao longo da coluna de *riser*, observe que o maior valor de tração é no topo da coluna e na parte inferior o valor é próximo de zero, caso os valores de força sejam negativos significa que a coluna está comprimida.



**Figura 7.1 – Força ao longo da coluna de *riser***

### 7.3 Tensão Máxima Atuante no *Riser*

O comportamento estrutural do *riser* de perfuração pode ser descrito como o de uma viga esbelta com carregamentos laterais, longitudinais e deslocamentos impostos em seu topo, devido a sua proporção muitas vezes a coluna é vista como uma estrutura delgada [58].

Conforme mencionado, devido ao fato de tratar-se de uma estrutura esbelta, o *riser* de perfuração não possui a capacidade de responder aos carregamentos impostos sem

sofrer flambagem, o que pode ser considerado uma falha estrutural, tal problema é mitigado com a aplicação de tração ao topo da estrutura, conferindo à mesma rigidez lateral geométrica [4].

Sendo assim sua estrutura apresenta propriedades físicas de rigidez à flexão, rigidez à torção e rigidez axial, a verificação dos carregamentos ao longo de seu comprimento leva em consideração esforços de tração e de momento.

O *riser* de perfuração é uma estrutura tubular que externamente encontra-se imersa em água do mar, por sua vez, em seu interior pode haver água do mar ou fluido de perfuração, ambos com densidade e pressão diferentes.

Deste modo a tração efetiva  $T_{ef}$  atuando na coluna de *riser* pode ser calculada pela Equação (7.3).

$$T_{ef} = T_r - p_i A_i + p_e A_e \quad (7.3)$$

Onde  $T_r$  é a tração real, e  $p_e$  é a pressão externa,  $p_i$  é a pressão interna,  $A_e$  é a área externa e  $A_i$  é a área interna do *riser*, ou seja, as duas últimas parcelas à direita na equação é o diferencial de pressão atuando nas paredes interna e externa do *riser* [74].

Para fins de verificação estrutural da coluna por meio do critério de falha de von Mises, Equação (7.4), os cálculos de tensão devem levar em consideração a tração real.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{T_r}{A} + \frac{M D_e}{I 2} \quad (7.4)$$

Onde  $M$  é o momento fletor,  $A$  é a área da seção transversal do *riser*,  $I$  é o momento de inércia e  $D_e$  é o diâmetro externo [7, 74].

O valor máximo de tensão, é obtido por meio da Equação (7.4) podendo o mesmo ser aplicado em todos os intervalos de tempo da análise dinâmica, possibilitando assim obter o cenário mais crítico da combinação de tração e momento atuando no *riser*.

De acordo com a norma API 16Q [4] a tensão máxima admissível em qualquer tipo de operação com o *riser* é equivalente a 67% da tensão de escoamento do material, sendo este valor estabelecido como o fator de segurança.

A tensão de escoamento do aço utilizado em colunas de *riser* de perfuração é de 448000 kN/m<sup>2</sup>, portanto o limite de tensão na coluna de *riser* deve respeitar as condições das Equações (7.6) e (7.7).

$$\sigma_y = 448000 \text{ kN/m}^2 \quad (7.5)$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} \leq 0.67\sigma_y \quad (7.6)$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} \leq 300160 \text{ kN/m}^2 \quad (7.7)$$

Outros critérios como resistência ao colapso, arranjo e classificação de fluabilidade das juntas de *riser*, peso próprio da estrutura, curso dos tracionadores, curso da junta telescópica, ângulo das juntas flexíveis, sobrecargas na cabeça do poço e tensões no condutor, foram admitidos como dentro dos limites operacionais estabelecidos pelas normas API RP 16Q [4] e ISO 13264-2 [42].

# 8 ESTUDOS DE CASO

## 8.1 Introdução

Nesta seção são apresentados os cenários, a modelagem, os resultados e os custos computacionais que compõem os quatro estudos de caso contemplados pela pesquisa.

O caso 1 apresenta dois modelos cada um composto por duas vigas cilíndricas horizontais posicionadas lado a lado, ambas com peso próprio e sob ação de uma carga pontual em cada uma das suas extremidades. O modelo 1 simula o carregamento em uma estrutura de geometria simples enquanto o modelo 2 simula o mesmo carregamento em uma estrutura de geometria *pipe-in-pipe*.

O caso 2 apresenta dois modelos simplificados, o primeiro simula uma estrutura de geometria *pipe-in-pipe* com a opção do contato ligado, o segundo simula a mesma estrutura com o contato desligado.

O caso 3 apresenta um modelo completo de um sistema de perfuração interagindo com o solo, neste cenário simula-se a manobra de descida da coluna do revestimento intermediário, onde busca-se avaliar o contato *pipe-in-pipe* e reportar os esforços.

Por fim simula-se no caso 4 um cenário onde a sonda de perfuração deriva com a coluna de trabalho/revestimento de superfície conectada, neste caso não há *riser* de perfuração e o contato *pipe-in-pipe* ocorre somente no trecho onde a coluna encontra-se dentro do poço.

A princípio para que não haja violação de nenhum dos parâmetros especificados pelas normas API RP 16Q [4] e ISO 13624-2 [42] os dados utilizados nos modelos dos estudos de caso 2, 3 e 4 foram definidos de acordo com valores usualmente utilizados em operações de perfuração.

Os estudos de caso foram simulados pela ferramenta numérica SITUA-Prosim, desenvolvida pelo Laboratório de Métodos Computacionais e Sistemas *Offshore* (LAMCSO), em parceria com o CENPES-Petrobras. O programa é capaz de simular o comportamento de unidades flutuantes ancoradas e em operações de instalação de dutos e equipamentos além de realizar análises de *riser* de perfuração.

O SITUA integra a interface gráfica de pré e pós processamento, através da qual os dados de entrada da simulação são inseridos e os resultados obtidos podem ser visualizados, ainda é possível visualizar em 3D o modelo executado, além de recursos como apresentação dos resultados em forma de animação.

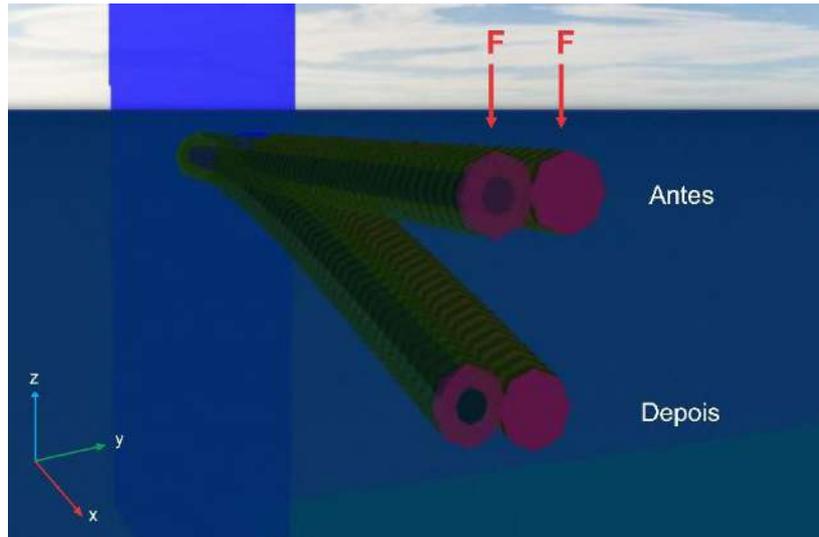
O *solver* de simulação é incorporado pelo Prosim, o programa utiliza modelos hidrodinâmicos para simular o comportamento dos cascos das unidades flutuantes e modelos de elementos finitos para o cálculo do comportamento estrutural dos *risers* e linhas de ancoragem, podendo estes serem elementos de treliça ou de pórtico. O programa também é capaz de simular o acoplamento destes dois elementos, considerando sua interação [43, 70, 71].

Informações sobre as características, físicas, geométricas e hidrodinâmicas dos componentes dos modelos dos estudos de caso foram obtidas das normas, catálogos dos equipamentos e da literatura consultada como referência para a pesquisa. Os dados são apresentados nas tabelas deste capítulo e informações complementares aos modelos encontram-se nos apêndices.

## 8.2 Estudo de Caso 1

O estudo de caso 1 apresenta dois modelos simplificados, cada um composto por duas vigas cilíndricas horizontais, posicionadas uma ao lado da outra, com peso próprio e uma carga pontual atuando na extremidade livre de cada viga.

A Figura 8.1 ilustra o comportamento estrutural de um dos modelos antes e depois da aplicação do carregamento.

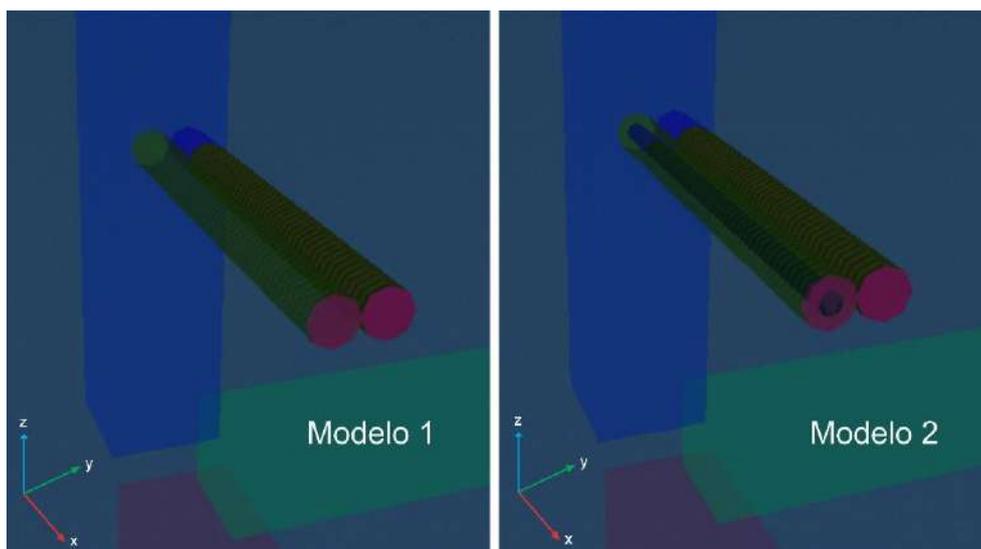


**Figura 8.1 – Comportamento estrutural (SITUA/Prosim)**

Ainda observando a Figura 8.1, note que em função da carga aplicada a estrutura sofrerá flexão, assim por meio da comparação dos resultados das análises estáticas, configuração equilibrada, propõe-se demonstrar neste estudo de caso a validação da implementação da ferramenta de contato *pipe-in-pipe* do SITUA/Prosim.

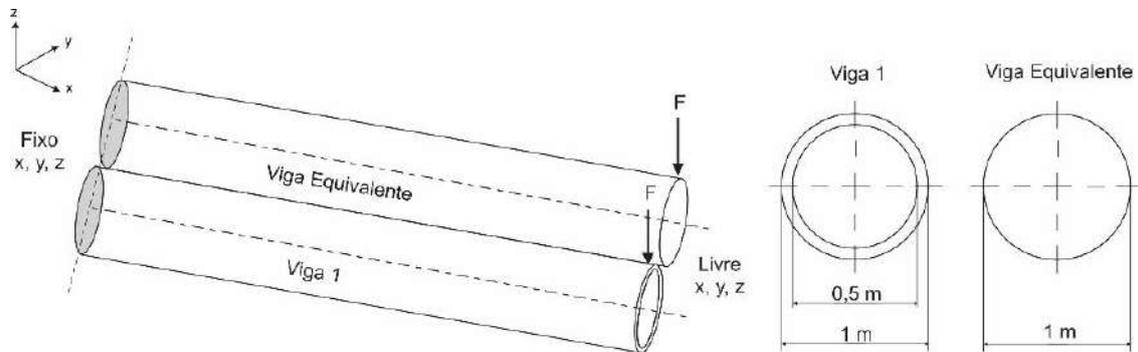
### 8.2.1 Modelagem do Estudo de Caso 1

A Figura 8.2 por meio da interface gráfica do software SITUA/Prosim, apresenta os modelos 1 e 2 do estudo de caso 1.



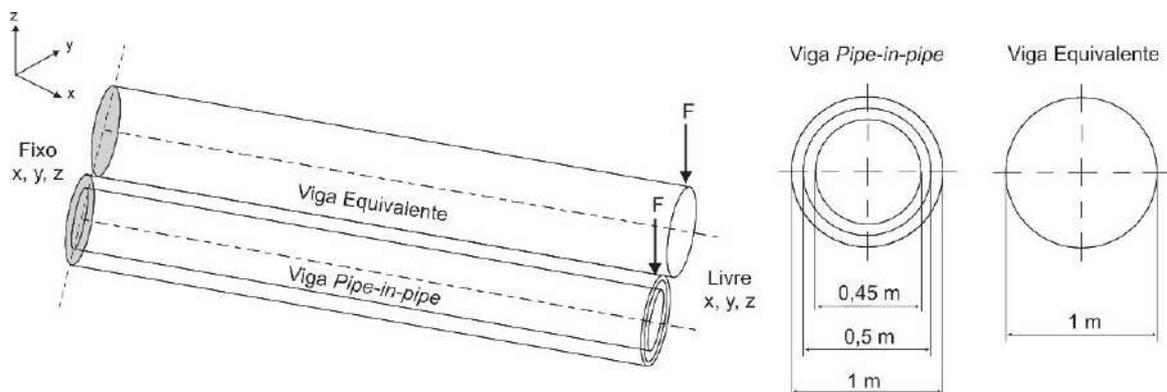
**Figura 8.2 – Estudo de caso 1 - modelos 1 e 2 (SITUA/Prosim)**

Conforme detalhado na Figura 8.3 o modelo 1 é composto por uma viga cilíndrica de geometria simples, chamada de viga 1 e uma outra viga cilíndrica chamada de viga equivalente, sendo que esta apresenta o dobro dos valores das propriedades físicas da viga 1.



**Figura 8.3 – Estudo de caso 1 - modelo 1**

Por sua vez o modelo 2 é composto por uma viga cilíndrica de geometria *pipe-in-pipe* e uma outra viga cilíndrica equivalente que apresenta as mesmas propriedades da utilizada no modelo 1 (Figura 8.4).



**Figura 8.4 – Estudo de caso 1 - modelo 2**

A Tabela 8.1 apresenta as propriedades físicas e geométricas da viga 1.

**Tabela 8.1 – Propriedades físicas e geométricas da viga 1**

<b>Dados da Viga 1</b>		
Peso no Ar (kN/m)		1
Rigidez à Flexão-EI (kNm <sup>2</sup> )		1000
Rigidez à Torção-GJ (kNm <sup>2</sup> )		100
Rigidez Axial-EA (kN)		10000
Dimensões	Comprimento da Viga (m)	10,1
	Diâmetro Externo (m)	0,5
	Diâmetro Interno (m)	1
	Espessura	0,25

A Tabela 8.2 apresenta as propriedades físicas e geométricas da viga equivalente.

**Tabela 8.2 – Propriedades físicas e geométricas da viga equivalente**

<b>Dados da Viga Equivalente</b>		
Peso no Ar (kN/m)		2
Rigidez à Flexão-EI (kNm <sup>2</sup> )		2000
Rigidez à Torção-GJ (kNm <sup>2</sup> )		200
Rigidez Axial-EA (kN)		20000
Dimensões	Comprimento da Viga (m)	10,1
	Diâmetro Externo (m)	1
	Diâmetro Interno (m)	0
	Espessura	0,5

A Tabela 8.3 apresenta Propriedades físicas e geométricas da viga *pipe-in-pipe*.

**Tabela 8.3 – Propriedades físicas e geométricas da viga *pipe-in-pipe***

<b>Dados da Viga <i>Pipe-in-pipe</i></b>		
Viga Externa e Interna	Peso no Ar (kN/m)	1
	Rigidez à Flexão-EI (kNm <sup>2</sup> )	1000
	Rigidez à Torção-GJ (kNm <sup>2</sup> )	100
	Rigidez Axial-EA (kN)	10000
Dimensões da Viga Externa	Comprimento da Viga (m)	10,1
	Diâmetro Externo (m)	1
	Diâmetro Interno (m)	0,5
	Espessura	0,25
Dimensões da Viga Interna	Comprimento da Viga (m)	10,1
	Diâmetro Externo (m)	0,45
	Diâmetro Interno (m)	0
	Espessura	0,225

Voltando a observar as Figuras 8.3 e 8.4, note que para os dois modelos, as vigas cilíndricas apresentam um das extremidades com as condições de contorno engastadas e a outra extremidade de cada viga está livre, complementar a essa informação as Tabelas 8.4 e 8.5 apresentam as coordenadas globais dos modelos.

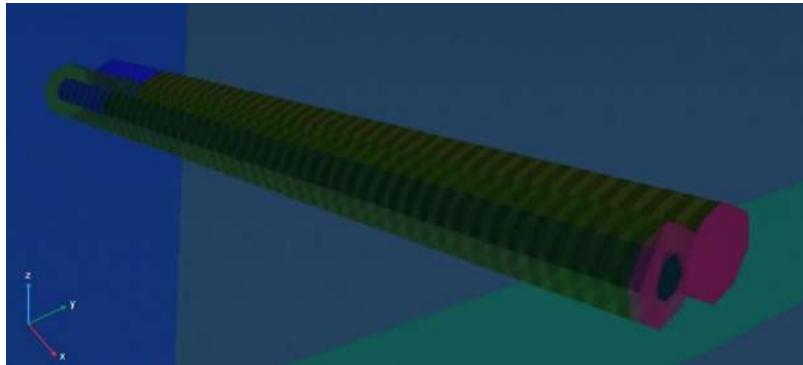
**Tabela 8.4 – Coordenadas dos modelos 1**

<b>Localização da Viga 1</b>			
Extremidade Fixa	Coordenadas Locais (m)	x	0,0
		y	0,0
		z	10
	Condição de contorno		Engastada
Extremidade Livre	Coordenadas Locais (m)	x	10,1
		y	0,0
		z	10
	Condição de contorno		Livre
<b>Localização da Viga Equivalente</b>			
Extremidade Fixa	Coordenadas Locais (m)	x	0,0
		y	1,0
		z	10
	Condição de contorno		Engastada
Extremidade Livre	Coordenadas Locais (m)	x	10,1
		y	1,0
		z	10
	Condição de contorno		Livre

**Tabela 8.5 – Coordenadas dos modelos 2**

<b>Localização da Viga <i>Pipe-in-pipe</i></b>			
Extremidade Fixa	Coordenadas Locais (m)	x	0,0
		y	0,0
		z	10
	Condição de contorno		Engastada
Extremidade Livre	Coordenadas Locais (m)	x	10,1
		y	0,0
		z	10
	Condição de contorno		Livre
<b>Localização da Viga Equivalente</b>			
Extremidade Fixa	Coordenadas Locais (m)	x	0,0
		y	1,0
		z	10
	Condição de contorno		Engastada
Extremidade Livre	Coordenadas Locais (m)	x	10,1
		y	1,0
		z	10
	Condição de contorno		Livre

A Figura 8.5 apresenta a discretização das vigas do modelo 2, sendo a mesma também aplicada ao modelo 1. Observe que as vigas foram modeladas como segmentos de linhas de 10,1 m e discretizadas em elementos de 0,1 m.



**Figura 8.5 – Discretização do modelo 2 (SITUA/Prosim)**

Complementando a informação descrita no parágrafo anterior, a Tabela 8.6 apresenta os dados das malhas empregadas nas vigas cilíndricas dos modelos 1 e 2.

**Tabela 8.6 – Características da malha das vigas cilíndricas**

Dados da Malha		
Número de nós	102	
Tipo de elemento	pórtico	
Vigas	Intervalo do Comprimento	Tamanho do Elemento (m)
Viga 1, Viga <i>pipe-in-pipe</i> e Viga equivalente	0 m – 10,1 m	0,1

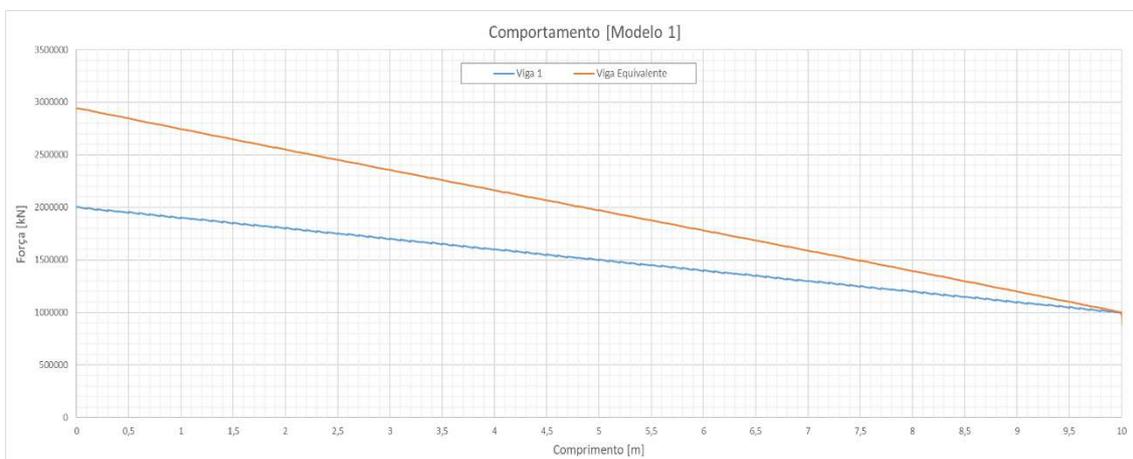
A Tabela 8.7 apresenta os dados do amortecimento de Rayleigh, parâmetro imprescindível para atuar na dissipação de energia da estrutura, neste caso, possui relevância fundamental na convergência do modelo 2, sobretudo em função da interação de contato da viga que apresenta uma geometria *pipe-in-pipe*.

**Tabela 8.7 – Dados do amortecimento de Rayleigh**

Dados do Amortecimento	
Amortecimento Rayleigh de Massa	0,2
Amortecimento Rayleigh de Rigidez	0,001

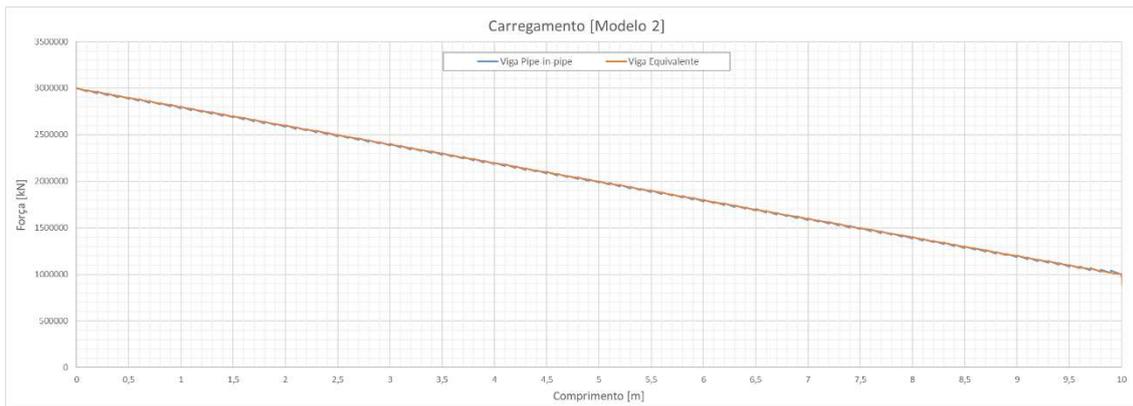
## 8.2.2 Resultados do Estudo de Caso 1

A Figura 8.6, comportamento estrutural do modelo1, apresenta para uma análise estática, configuração equilibrada, o resultado do carregamento aplicado a estrutura. Observe que a viga cilíndrica 1 apresenta comportamento diferente no carregamento quando comparada com a viga equivalente. Esse resultado é esperado, visto que, apesar da semelhança geométrica, as vigas possuem propriedades físicas distintas, assim sendo as estruturas vão apresentar comportamento estrutural diferentes. A viga 1 apresenta uma flexão maior que a viga equivalente devido ao fato de sua rigidez estrutural ser menor que a rigidez da viga equivalente.



**Figura 8.6 – Comportamento estrutural do modelo 1**

Análoga a análise estática aplicada ao modelo 1, a Figura 8.7, apresenta o resultado do mesmo carregamento aplicado ao modelo 2. Observe que agora as vigas cilíndricas *pipe-in-pipe* e a viga equivalente apresentam comportamento idênticos, tal fato se deve pela seguinte razão: a viga interna e externa da geometria *pipe-in-pipe* contribuem de maneira significativa para a rigidez da estrutura, sendo que, quando somadas as parcelas da rigidez da viga interna e da viga externa, a mesma torna-se idêntica à rigidez da viga equivalente.



**Figura 8.7 – Comportamento estrutural do modelo 2**

Recapitulando, quando comparados os modelos, as vigas da Figura 8.6 apresentam resultados diferentes sendo que a viga 1 irá fletir mais devido à ausência de uma viga interna, por sua vez, a Figura 8.7 mostra que o resultado das duas vigas são iguais, sendo assim, as análises estáticas realizadas, comprovam o propósito deste estudo de caso que é validar a implementação da ferramenta de contato *pipe-in-pipe* disponibilizada pelo software SITUA/Prosim.

### 8.2.3 Custo Computacional

O custo computacional pode ser avaliado com base nas comparações das informações dos dados de tempo total e uso de memória utilizados na execução das análises estáticas. Observe que foram gastos 2 minutos e 24 segundos para a execução da análise do modelo 1 (Figura 8.8).

***** EXECUTION SUMMARY AND STATISTICS *****		Caso 1 - Modelo 1 - Vigas Sem <i>pipe-in-pipe</i> x Equivalente	
END OF DATA INPUT	: 15/04/20 12:18:20 ;	0.80	SECONDS ELAPSED
END OF NEUTRAL EQUILIBRIUM:	15/04/20 12:20:44 ;	143.66	SECONDS ELAPSED
TOTAL RUN TIME	: 15/04/20 12:20:44 ;	144.47	SECONDS ELAPSED
		2 MINUTES, 24	SECONDS
USED MEMORY	: 691499	4-byte	words

**Figura 8.8 – Custo computacional (estudo de caso 1 - modelo 1)**

Observando a Figura 8.9 note que foram gastos 18:00 minutos no tempo total de execução do modelo 2, este acréscimo se deve ao fato de que este modelo apresenta uma geometria *pipe-in-pipe* sendo assim o *solver* dispense maiores recursos de memória para avaliar os pontos de contato.

***** EXECUTION SUMMARY AND STATISTICS *****		Caso 1 - Modelo 2 - Vigas Com <i>pipe-in-pipe</i> x Equivalente	
END OF DATA INPUT	: 15/04/20 12:18:42 ;	0.22 SECONDS ELAPSED	
END OF NEUTRAL EQUILIBRIUM:	15/04/20 12:37:06 ;	1103.43 SECONDS ELAPSED	
TOTAL RUN TIME	: 15/04/20 12:37:06 ;	1103.65 SECONDS ELAPSED	
		18 MINUTES, 23 SECONDS	
USED MEMORY	: 1029329	4-byte words	

**Figura 8.9 – Custo computacional (estudo de caso 1 – modelo 2)**

As vigas cilíndricas modeladas neste estudo de caso apresentam uma geometria simples de fácil modelagem e carregamento pontual, deste modo as análises estáticas equilibradas provaram-se muito eficiente para fins de validação da implementação de contato, nos estudos de caso a seguir notaremos a influência de modelos mais complexos, densidade da malha, carregamentos dinâmicos na solução dos problemas de contato.

### 8.3 Dados Comuns aos Estudos de Caso 2, 3 e 4

Os dados apresentados a seguir, de lâmina d'água, fluido de perfuração, sonda, RAOs de movimento, carregamentos ambientais, e amortecimento estrutural, são comuns na modelagem dos estudos de caso.

#### 8.3.1 Lâmina D'água e Fluido de Perfuração

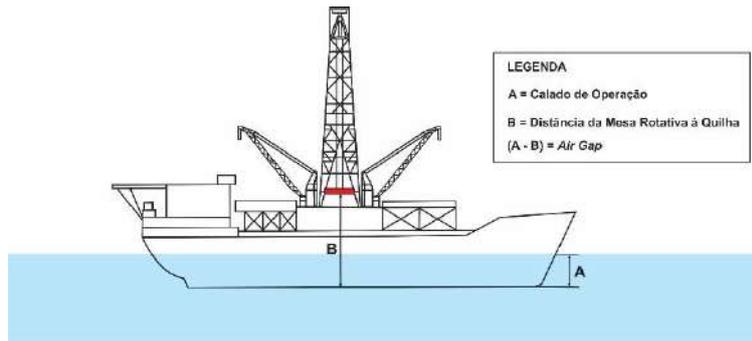
A profundidade da lâmina d'água é de 1000 m sendo o peso específico da água do mar igual a 10,0389 kN/m<sup>3</sup>.

O fluido de perfuração a base de água apresenta peso específico de 15,2763 kN/m<sup>3</sup> e a superfície livre de fluido é considerada como sendo na mesa rotativa e a pressão interna no *riser* deve-se apenas à coluna hidrostática do fluido.

#### 8.3.2 Sonda de Perfuração

A unidade de perfuração utilizada é um navio-sonda, optou-se por esta unidade flutuante devido à sua capacidade de operar em lâminas d'água ultraprofundas, apesar de sua desvantagem frente as semissubmersíveis e as monocolunas no quesito estabilidade.

A distância da mesa rotativa até a linha d'água é usualmente chamado de *air gap* e conforme podemos observa na Figura 8.10 essa característica da sonda se dá pela diferença da distância da quilha a mesa rotativa menos o calado de operação.



**Figura 8.10 – Características da sonda**

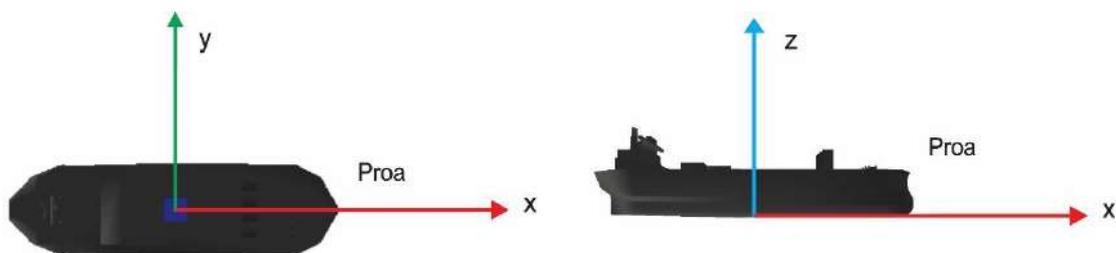
A Tabela 8.8 apresenta as características da sonda de perfuração importante salientar que o calado terá numa mesma embarcação variações sendo este em função do afundamento da embarcação. O calado de operação contabiliza a carga do navio.

**Tabela 8.8 – Características da sonda**

Dados da Sonda de Perfuração	
Volume (m <sup>3</sup> )	88453,7
Calado de Operação (m)	12
Distância da Quilha a Mesa Rotativa (m)	37
<i>Air Gap</i>	25

Os dados fornecidos pela Tabela 8.9 apresenta as coordenadas locais da sonda de perfuração, observa-se também na Figura 8.11 o sistema de coordenadas, estando a origem no centro de gravidade da sonda.

Ainda observando a Figura 8.11 o eixo estrutural z da plataforma é vertical, com sentido positivo para cima. Os eixos estruturais x e y formam o plano horizontal, o eixo x tem sentido positivo da popa para a proa. No sistema de eixos globais considerado, o eixo x está alinhado com a direção leste, e o eixo y com a direção norte.

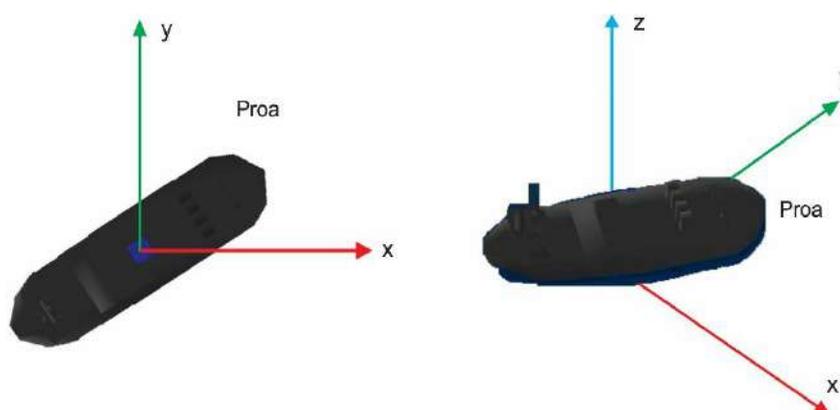


**Figura 8.11 - Sistema de coordenadas utilizado como referência**

**Tabela 8.9 – Coordenadas da sonda de perfuração**

Dados da Sonda de Perfuração		
Coordenadas do centro de gravidade (m)	x	-3,05
	y	0
	z	16,03
Coordenadas do centro de empuxo (m)	x	-6,1
	y	0
	z	6,0

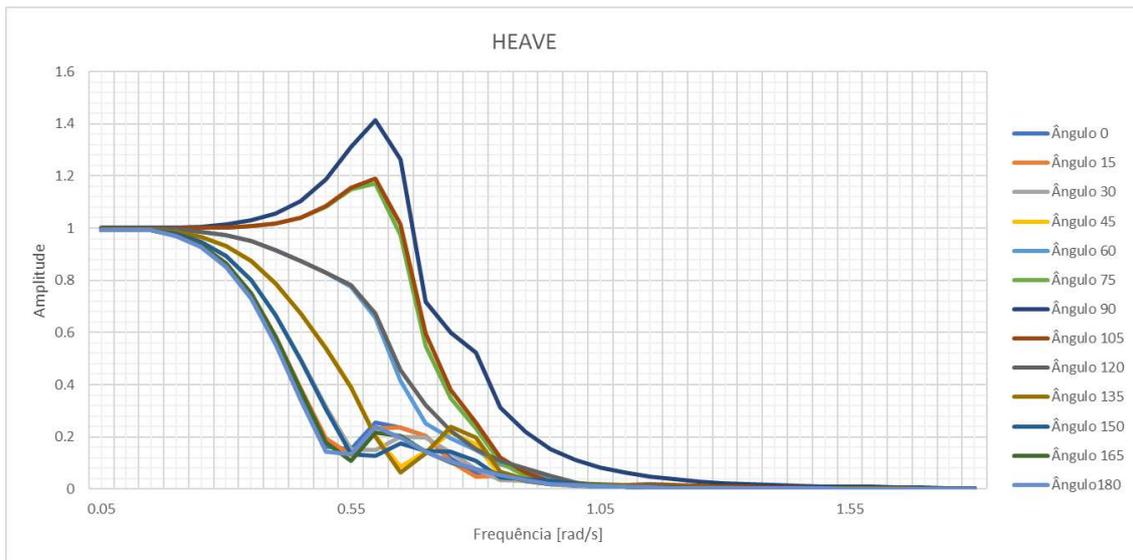
Conforme ilustra a Figura 8.12 para todos os estudos de caso considera-se a sonda aproada em  $60^\circ$  em relação ao azimute geográfico, ou seja, incidência de  $60^\circ$  da onda com a proa da embarcação.



**Figura 8.12 – Aproamento da sonda**

### 8.3.3 RAO de Movimentos

A movimentação da unidade flutuante em resposta aos carregamentos ambientais de onda que atuam sobre seu casco pode ser verificada por meio de gráficos de RAO de movimento. A Figura 8.13 apresenta o gráfico de *heave*.



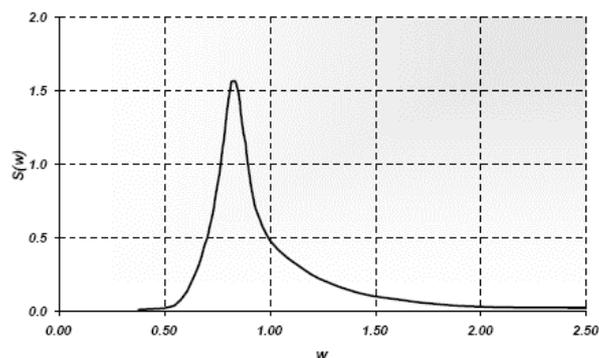
**Figura 8.13 – RAO de *heave***

Os gráficos de RAO presentes no apêndice A apresentam a amplitude de movimento da unidade flutuante para cada um dos seis graus de liberdade, *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* e *yaw*, sob carregamento de onda com amplitude unitária, referenciado em um ponto específico da unidade flutuante.

#### 8.3.4 Carregamentos Ambientais

Os carregamentos ambientais são representados por espectros de ondas e perfis de vento e correnteza. Os carregamentos de onda vêm da direção sul,  $180^\circ$  em relação ao azimute geográfico, utilizou-se estado de mar irregular com altura de onda de 3 m e períodos de 14 s, os carregamentos são representados pelo espectro de JONSWAP (Figura 8.14).

Este espectro teve origem em um projeto executado em conjunto no Mar do Norte, seu nome deriva das letras iniciais do projeto, *JOint North Sea WAve Project*, apesar de desenvolvido para uso no Mar do Norte o espectro pode ter alguns parâmetros ajustados para representar o estado de mar de outras localidades.



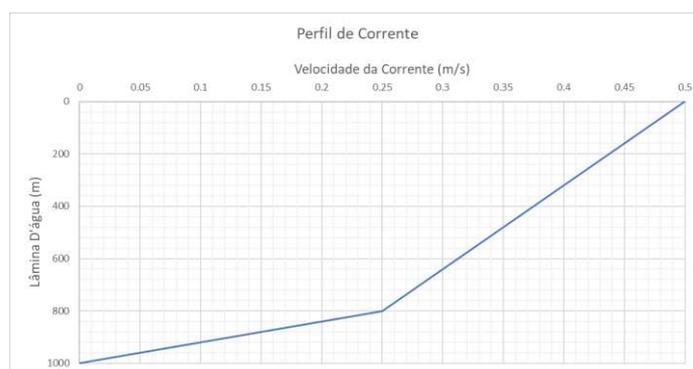
**Figura 8.14 – Espectro de JONSWAP**

A Tabela 8.10 apresenta os dados de vento aplicado. Em relação a direção o perfil apresenta o azimute geográfico na direção norte e ângulo de ataque de 270°.

**Tabela 8.10 – Dados de vento**

Dados de Vento		
Velocidade Média (m/s)	1 minuto	1977,05
	10 minutos	1776
	1 hora	1675,47

A Figura 8.15 apresenta o perfil de correnteza aplicado a uma lâmina d'água de 1000 m. Em relação a direção o perfil apresenta o azimute geográfico na direção norte e ângulo de ataque de 90°.



**Figura 8.15 – Perfil de corrente utilizado no estudo**

### 8.3.5 Amortecimento de Rayleigh

As forças elásticas de ação e reação são calculadas pela aplicação de uma rigidez de contato, enquanto que a dissipação de energia do contato é definida pelo amortecimento

de Rayleigh sendo este parâmetro imprescindível para representar a dissipação das vibrações de alta frequência nas regiões onde ocorre o contato *pipe-in-pipe*.

Por exemplo no trecho submerso da coluna de *riser* o amortecimento hidrodinâmico prepondera como fator de perda de energia, no entanto, acima da linha d'água uma parte relevante da coluna de *riser* encontra-se fora da água devido à distância entre a mesa rotativa e a linha d'água, portanto, sem efeito de dissipação decorrente do arrasto hidrodinâmico.

Outra situação semelhante pode ser observada em operações de perfuração e descida de revestimento onde o fluido no interior do *riser* desempenha função análoga a descrita acima, entretanto, caso haja perda de circulação um trecho interno do *riser* pode ficar sem o fluido dificultando assim a dissipação das vibrações de alta frequência.

A Tabela 8.11 apresenta os dados do amortecimento de Rayleigh utilizados como parâmetros nas análises realizadas.

**Tabela 8.11 – Dados do amortecimento de Rayleigh**

Dados do Amortecimento	
Amortecimento Rayleigh de Massa	0,1
Amortecimento Rayleigh de Rigidez	0,005

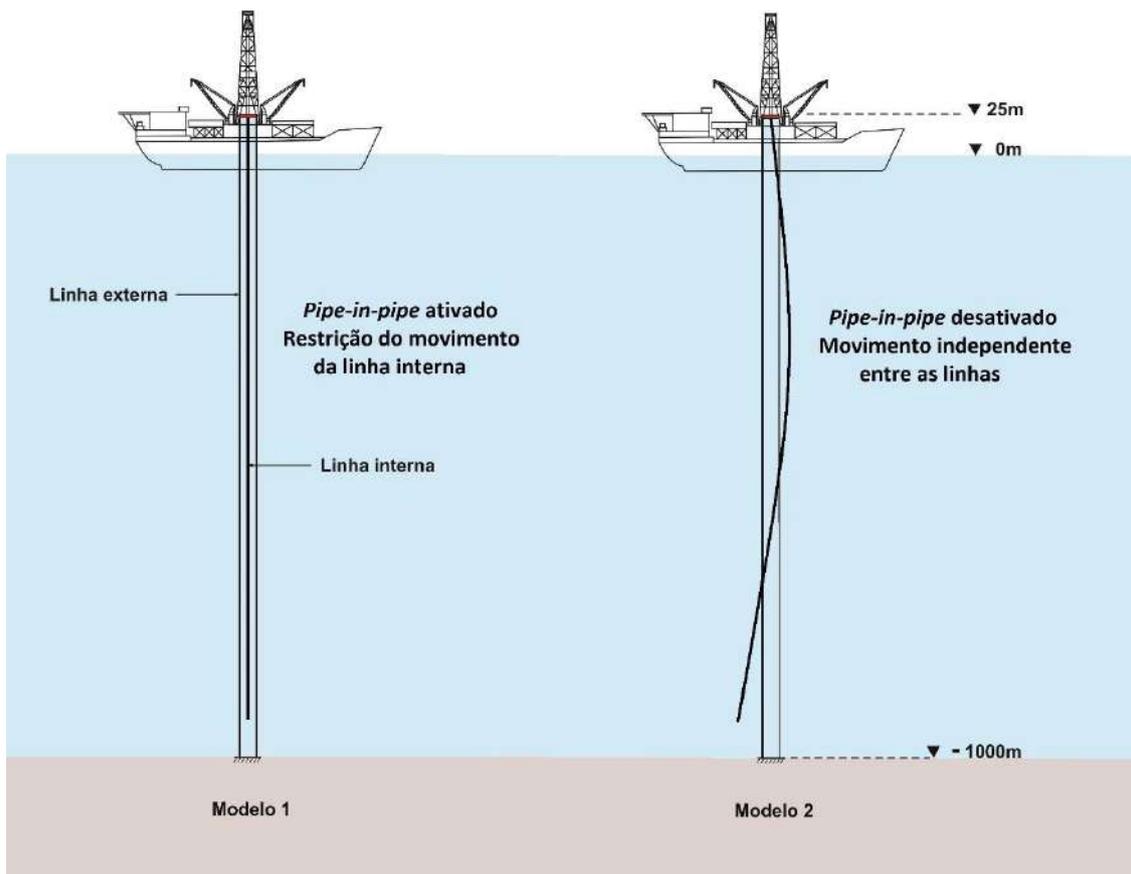
A ausência de amortecimento nestes modelos numéricos permite a propagação e reflexão das deformações estruturais dificultando assim a convergência e superestimando os resultados.

## 8.4 Estudo de Caso 2

O estudo de caso 2 apresenta dois modelos simplificados de geometria *pipe-in-pipe*, sendo que o propósito principal deste estudo de caso é demonstrar por meio de análises globais o funcionamento da ferramenta de contato *pipe-in-pipe* do SITUA/Prosim.

### 8.4.1 Modelagem do Estudo de Caso 2

Conforme observado no esquema da Figura 8.16 o modelo 1 é composto por duas linhas uma interna à outra, onde simula-se o contato *pipe-in-pipe*, enquanto que o modelo 2 é composto também por duas linhas que apresenta as mesmas características e propriedades do modelo 1, sendo que não há contato *pipe-in-pipe* entre as linhas.



**Figura 8.16 – Estudo de caso 2**

A lâmina d'água é de 1000 m e a linha externa do modelo 1 encontra-se preenchida com água do mar, sendo o peso específico deste fluido igual a  $10,0389 \text{ kN/m}^3$ .

Os dados da sonda estão descritos na seção 8.3.2 assim como os RAOs de movimento seção 8.3.3, os carregamentos ambientais de onda, vento e corrente, respectivamente na seção 8.3.4 e o amortecimento estrutural das linhas seção 8.3.5.

A Tabela 8.12 apresenta as propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas da linha externa, sendo esta modelada com elementos flexíveis, optou-se por utilizar as propriedades equivalentes as de uma junta de riser.

**Tabela 8.12 – Propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas da linha externa**

<b>Dados da Linha Externa</b>		
Peso no Ar (kN/m)		8,8782
Peso na Água (kN/m)		0,2396
Rigidez à Flexão-EI (kNm <sup>2</sup> )		229451,41
Rigidez à Torção-GJ (kNm <sup>2</sup> )		176501,08
Rigidez Axial-EA (kN)		6969223,69
Dimensões	Comprimento da seção (m)	1025
	Diâmetro Externo (m)	0,5334
	Diâmetro Interno (m)	0,4922
Propriedades Hidrodinâmicas	Coefficiente de Arrasto Normal (CDN)	0,6
	Coefficiente de Arrasto Longitudinal (CDL)	0,008
	Coefficiente de Inércia (CM)	2,0
	Coefficiente de Massa Adicionada (CA)	1,0
	Diâmetro Hidrodinâmico (HD)	1,308

A Tabela 8.13 apresenta as propriedades físicas e geométricas da linha interna, optou-se por modelar o segmento com elementos rígidos sendo as propriedades equivalentes as de um tubo de revestimento.

**Tabela 8.13 – Propriedades físicas e geométricas da linha interna**

<b>Dados da Linha Interna</b>		
Densidade (kN/m <sup>3</sup> )		77
Módulo de Elasticidade (kN/m <sup>2</sup> )		210x10 <sup>6</sup>
Tensão de Escoamento (kN/m <sup>2</sup> )		551580,5824
Dimensões (m)	Comprimento da seção Modelo 1 (m)	1030
	Comprimento da seção Modelo 3 (m)	800
	Diâmetro Externo (m)	0,3229
	Diâmetro Interno (m)	0,3397
	Espessura (m)	0,0084

Conforme apresentado na Tabela 8.14 as linhas externas foram modeladas como um único segmento de reta de 1025 m sendo a malha discretizada em elementos de 1 metros, totalizando 1026 nós. As linhas internas também formam um único segmento de reta discretizado em elementos de 1 metros, possuindo comprimento de 1020 m totalizando 1021 nós.

**Tabela 8.14 – Características das malhas do estudo de caso 1**

Dados da Malha		
Linha Externa Modelos 1 e 2		1026 nós
Linha Interna Modelos 1 e 2		1021 nós
Tipo de elemento		pórtico
Modelo 1	Intervalo do Comprimento	Tamanho do Elemento (m)
Linha Externa	0 m – 1025 m	1
Linha Interna	0 m – 1020 m	1
Modelo 2	Intervalo do Comprimento	Tamanho do Elemento (m)
Linha Externa	0 m – 1025 m	1
Linha Interna	0 m – 1020 m	1

As Tabelas 8.15 e 8.16 apresentam as condições de contorno, observe que no topo as linhas internas e externas estão solidárias aos movimentos da sonda, por sua vez, no fundo as linhas externas estão engastadas no leito marinho, enquanto que as linhas internas na sua extremidade inferior têm as condições de contorno livres.

**Tabela 8.15 – Coordenadas da linha externa**

Localização da Linha Externa			
TOPO Modelos 1 e 2	Coordenadas Locais (m)	x	0,0
		y	0,0
		z	37
	Condição de contorno		Solidária a sonda
FUNDO Modelos 1 e 2	Coordenadas Locais (m)	x	0,0
		y	0,0
		z	-1000
	Condição de contorno		Engastada

**Tabela 8.16 – Coordenadas da linha interna**

Localização da Linha Interna			
TOPO Modelos 1 e 2	Coordenadas Locais (m)	x	0,0
		y	0,0
		z	37
	Condição de contorno		Solidária a sonda
FUNDO Modelos 1 e 2	Coordenadas Locais (m)	x	0,0
		y	0,0
		z	-995
	Condição de contorno		Livre

A Tabela 8.17 apresenta os parâmetros de análise para todos os modelos.

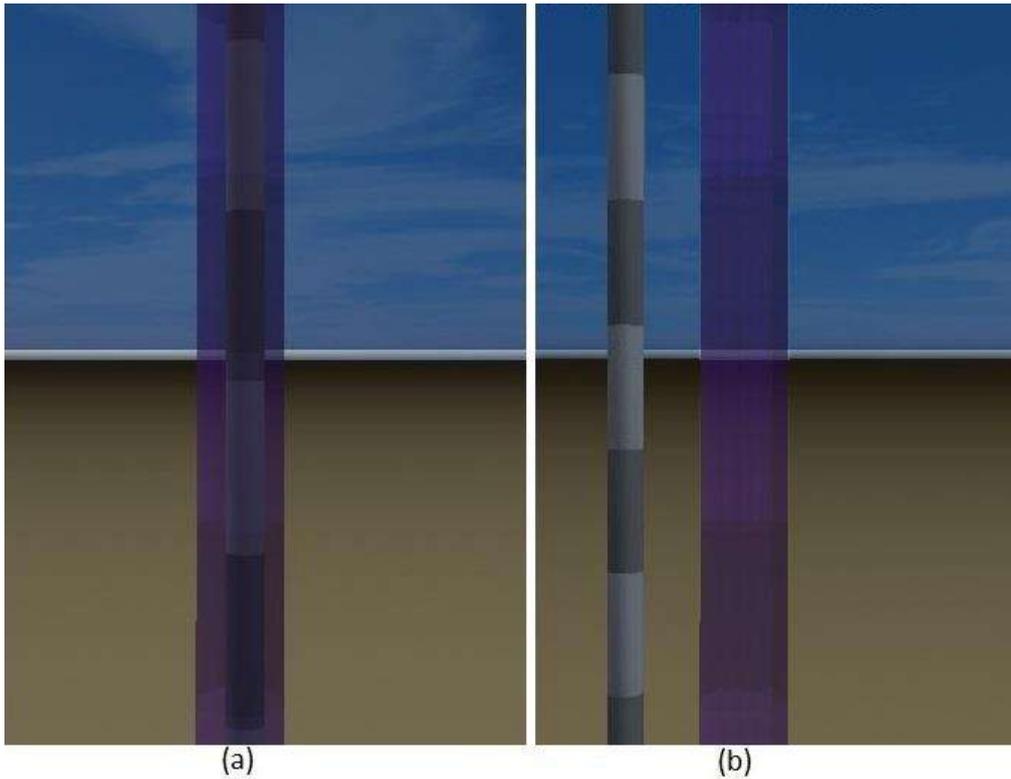
**Tabela 8.17 – Parâmetros de análise**

Dados da Análise	
Tempo total (s)	360
Rampa (s)	36
Intervalo de Integração (s)	0,01

#### 8.4.2 Resultados do Estudo de Caso 2

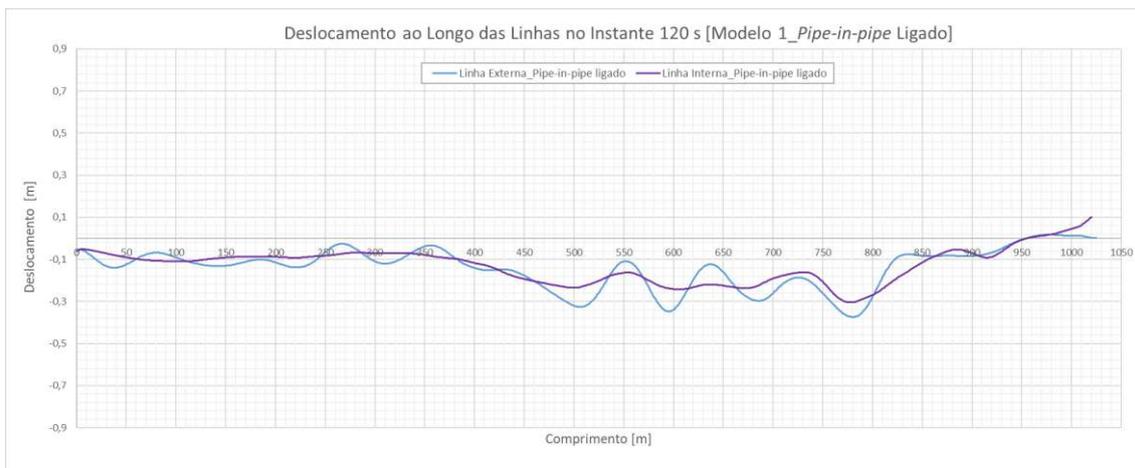
Com base no deslocamento das linhas quando a opção do contato *pipe-in-pipe* encontra-se ligada ou desligada, optou-se por meio de uma abordagem mais ilustrativa, comparar o comportamento das análises para demonstrar o funcionamento do algoritmo de contato implementado no SITUA/Prosim.

Os modelos analisados são semelhantes, compartilham as mesmas propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas. A princípio os deslocamentos de um trecho das linhas pode ser observado a seguir nas figuras 8.17a e 8.17b que ilustram o recurso de visualização da análise em animação 3D.



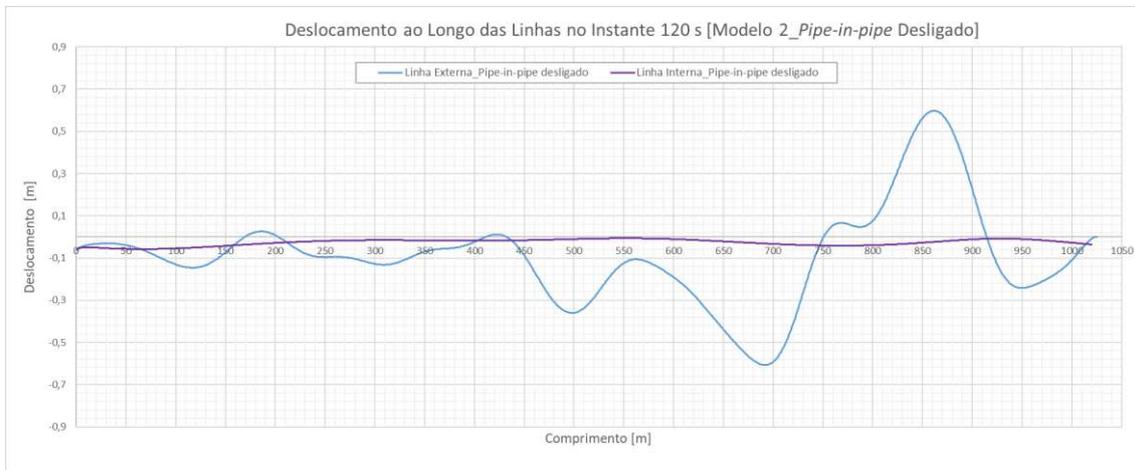
**Figura 8.17 – Contato *pipe-in-pipe*: (a) ligado (b) desligado (SITUA/Prosim)**

Os deslocamentos ao longo das linhas foram reportados no tempo de análise de 120 s, valor bem acima da rampa. Observando a Figura 8.18, percebe-se que quando a opção do contato *pipe-in-pipe* está ligado há uma interação entre os dutos, sendo que o externo restringe o movimento do duto interno ao limite do seu diâmetro interno, observe que as curvaturas não apresentam grandes distanciamentos.



**Figura 8.18 – Deslocamento ao longo das linhas (caso 2 - modelo 1\_Pipe-in-pipe ligado)**

Por sua vez a Figura 8.19 apresenta o deslocamento ao longo das linhas quando a opção do contato *pipe-in-pipe* está desligado, percebe-se que em determinados trechos há um distanciamento maior entre as curvaturas, tal comportamento, conforme ilustrado anteriormente na figura 8.17b, indica que não contato *pipe-in-pipe* entre as linhas.



**Figura 8.19 – Deslocamento ao longo das linhas (caso 2 - modelo 2\_Pipe-in-pipe desligado)**

Comparando as curvaturas das linhas das figuras acima nota-se a influência do contato *pipe-in-pipe* no comportamento global do sistema, na prática quando desligamos a funcionalidade as linhas se comportam de forma independente, movimentando-se livremente, a linha externa não envolve a linha de menor diâmetro, havendo pouca interferência nos modos de vibração.

Por sua vez, quando ligamos a funcionalidade a estrutura assume comportamento diferente, a linha interna tem seu movimento limitado, agora o resultado da análise passa a contabilizar os efeitos de ação e reação das interações a longo da parede externa da linha interna e a parede interna da linha externa, influenciando assim os modos de vibração.

### 8.4.3 Custo Computacional

Conforme mencionado anteriormente, visto que os modelos utilizados neste estudo de caso são semelhantes e compartilham as mesmas propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas, o custo computacional pode ser avaliado com base na comparação entre as análises realizadas.

A Figura 8.20 apresenta informações dos dados de tempo total e uso de memória utilizados na execução da análise dos modelos 1. Nota-se que o tempo total de análise gasto para solucionar o problema de contato *pipe-in-pipe* foi de 5 horas e 57 minutos.

***** EXECUTION SUMMARY AND STATISTICS *****		Caso 2 - Modelo 1 Contato <i>pipe-in-pipe</i> ligado	
END OF DATA INPUT	: 19/02/20 16:42:10 ;	0.42	SECONDS ELAPSED
END OF DYNAMIC SIMULATION	: 19/02/20 22:39:14 ;	21423.61	SECONDS ELAPSED
TOTAL RUN TIME	: 19/02/20 22:39:14 ;	21424.03	SECONDS ELAPSED
			357 MINUTES, 4 SECONDS
		5 HOURS	57 MINUTES, 4 SECONDS
USED MEMORY	:	6821877	4-byte words

**Figura 8.20 – Custo computacional (estudo de caso 2 - modelo 1 – contato ligado)**

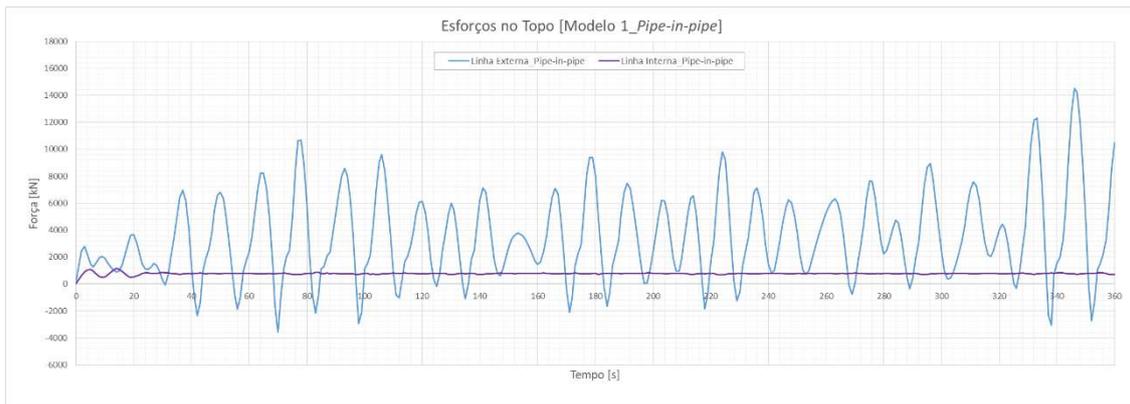
Desligando a opção do contato *pipe-in-pipe* do modelo 2, as linhas tornam-se independentes, observe que com a ausência do contato *pipe-in-pipe*, o *solver* não realiza a etapa de verificação das possíveis regiões de contato, logo justifica-se o substancial decréscimo no tempo total de análise em relação ao tempo do modelo 1 (Figura 8.21).

***** EXECUTION SUMMARY AND STATISTICS *****		Caso 2 - Modelo 2 Contato <i>pipe-in-pipe</i> desligado	
END OF DATA INPUT	: 19/02/20 16:42:49 ;	0.34	SECONDS ELAPSED
END OF DYNAMIC SIMULATION	: 19/02/20 17:17:39 ;	2090.33	SECONDS ELAPSED
TOTAL RUN TIME	: 19/02/20 17:17:39 ;	2090.67	SECONDS ELAPSED
			34 MINUTES, 50 SECONDS
USED MEMORY	:	6821877	4-byte words

**Figura 8.21 – Custo computacional (estudo de caso 2 - modelo 2 – contato *pipe-in-pipe* desligado)**

Demonstrou-se nesta seção, por meio de modelos simplificados, a influência do contato *pipe-in-pipe* no comportamento estrutural de uma análise global e seu impacto no custo computacional.

Adicionalmente, neste estudo de caso, observa-se na Figura 8.22, que em alguns instantes a estrutura sofre esforços de compressão, tal fato é atribuído as condições de contorno da linha externa, que se encontra engastada no topo e na base, sendo assim em alguns momentos a linha absorve as cargas da sonda devido principalmente ao efeito do movimento de *heave*.



**Figura 8.22 – Esforços no topo (estudo de caso 2 - modelo 1)**

A seguir o estudo de caso 3 apresenta uma modelagem para o *riser* de perfuração onde os esforços de compressão da linha são controlados por uma aplicação de tração ao topo da estrutura, evitando assim possíveis danos ao *riser*.

## 8.5 Estudo de Caso 3

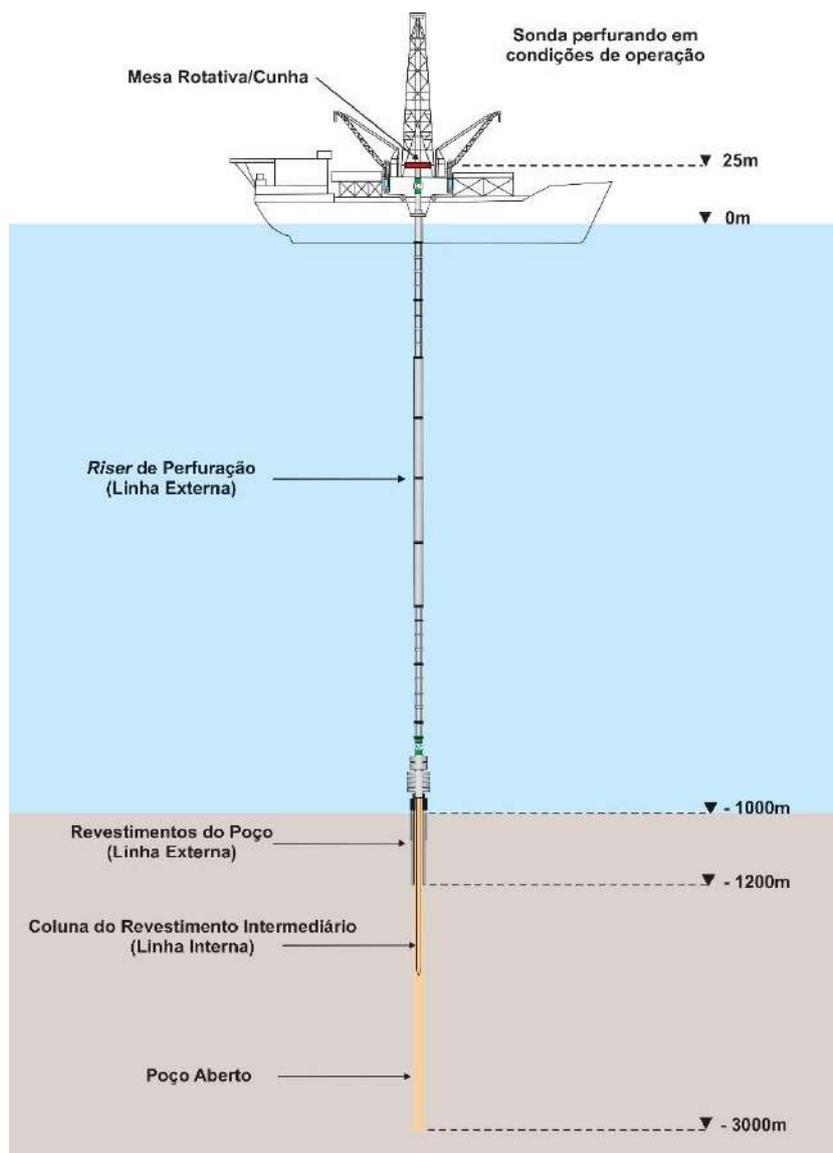
O estudo de caso 3 reproduz um cenário onde durante a perfuração de um poço *offshore*, simula-se a manobra de descida da coluna do revestimento intermediário pelo interior do *riser* de perfuração, especificamente o intervalo de tempo em que o revestimento se encontra apoiado na cunha da mesa rotativa.

O propósito deste estudo de caso é identificar as regiões de ocorrência de contato *pipe-in-pipe* e reportar a magnitude dos esforços ao longo do *riser* de perfuração e da coluna do revestimento intermediário.

### 8.5.1 Modelagem do Estudo de Caso 3

A modelagem do sistema de perfuração (Figura 8.23) inclui uma sonda conectada a duas linhas, uma linha composta externa, modelada como *riser* de perfuração e revestimentos do poço e outra linha simples interna modelada como coluna do revestimento intermediário.

De acordo com o procedimento mencionado na seção 3.3, um dos pontos críticos da operação é o momento em que as juntas permanecem apoiadas na cunha, concentrando ali todo o peso suspenso da coluna além do que os esforços também são transferidos para este equipamento.



**Figura 8.23 – Estudo de caso 3**

Durante o tempo total de simulação o *riser* está operando de forma conectada a sonda com circulação de fluido de perfuração, considera-se que o sistema de posicionamento dinâmico mantém a sonda em sua locação e a janela operacional está dentro dos limites e das condições ambientais que favorecem, de forma segura, a continuidade dos procedimentos normais de perfuração.

A Tabela 8.18 apresenta os parâmetros de análise, optou-se por um tempo total de simulação de 6 minutos visto que este intervalo representa de forma mais realista uma estimativa do tempo necessário para que os platformistas realizem as conexões entre as juntas, recordando que durante este procedimento a coluna do revestimento encontra-se apoiada unicamente na cunha da mesa rotativa.

**Tabela 8.18 – Parâmetros de análise**

Dados da Análise	
Tempo total (s)	360
Rampa (s)	36
Intervalo de Integração (s)	0,01

Os carregamentos ambientais, movimentos da embarcação e a resposta dinâmica estrutural do *riser* de perfuração pode influenciar na janela operacional impossibilitando assim a continuidade do procedimento de descida.

Os dados da sonda estão descritos na seção 8.3.2 assim como os RAOs de movimento seção 8.3.3, os carregamentos ambientais de onda, vento e corrente, respectivamente na seção 8.3.4 e o amortecimento estrutural das linhas seção 8.3.5.

#### **8.5.1.1 Riser de Perfuração**

Baseado nas orientações da norma ISO 13264-2 [42] o *riser* de perfuração foi configurado de forma que, durante a operação de descida da coluna do revestimento intermediário, os valores de tração de topo e os critérios operacionais listados abaixo, sejam mantidos nos limites recomendados:

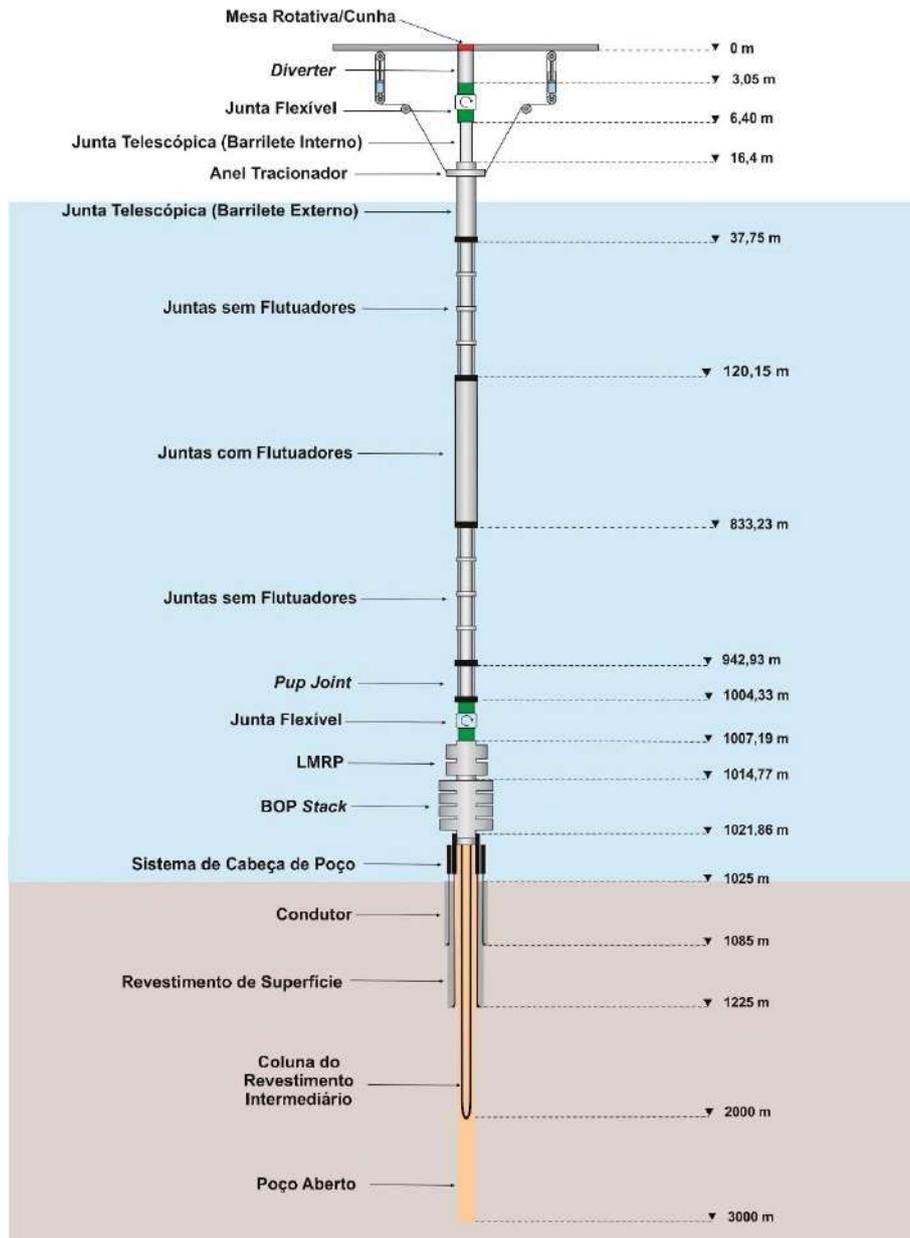
- Valores dos ângulos das juntas flexíveis;
- Resistência à flexão e ao colapso das juntas de *riser*;
- Esforços transmitidos pela coluna ao sistema de cabeça de poço submarina.

Conforme observado no esquema da Figura 8.24 este estudo de caso apresenta um modelo completo de um *riser* de perfuração, os componentes modelados são: as juntas flexíveis, a junta telescópica, o sistema de tração, as juntas de *riser*, os equipamentos de segurança, a cabeça de poço submarina, o poço com o trecho revestido e o trecho perfurado e o solo.

As cotas à direita na Figura 8.24, representam o topo e a base dos equipamentos, essa representação é conhecida como empilhamento da coluna, usualmente referida na literatura como *tally* do *riser*.

Os revestimentos são modelados de duas formas distintas uma simulando o poço revestido, condutor e revestimento de superfície, interagindo com o solo, e outra, simulando a coluna do revestimento intermediário apoiada na cunha sendo essa uma linha interna ao *riser*.

Ainda observando o esquema da Figura 8.24 nota-se que o trecho do poço perfurado, também chamado de poço aberto, será revestido pelo revestimento intermediário, logo, a perfuração da terceira fase foi realizada com retorno de fluido, sendo assim, considera-se que o interior do *riser* de perfuração e do poço encontra-se preenchido e amortecido com fluido de perfuração com peso específico de 15,2763 kN/m<sup>3</sup>.



**Figura 8.24 – Tally do riser de perfuração**

A Tabela 8.19 apresenta o *tally* em função do comprimento de cada equipamento. Seguindo a recomendação da norma ISO 13264-2 [42], o barrilete interno da junta telescópica deve trabalhar a meio curso, sendo assim é comum em análises de *riser*

configurar o *tally* da coluna deixando o barrilete interno por último, visto que o mesmo é ajustado ao espaço que falta para completar a coluna, uma boa prática recomendada é não exceder o limite de 1,542 m além da posição de meio curso.

**Tabela 8.19 – Dados do *tally* da coluna de riser**

<b>Tally da Coluna de Riser</b>		
<b>Equipamentos</b>	<b>Comprimento (m)</b>	
<i>Diverter</i>	3,05	
Junta Flexível Superior	3,35	
Junta Telescópica - Barrilete Interno (meio curso)	10	
Junta Telescópica (Barrilete Externo com Anel Tractionador)	21,35	
Juntas sem Flutuadores	82,30	
Juntas com Flutuadores (914 m)	603,5	
Juntas com Flutuadores (1219 m)	109,7	
Juntas sem Flutuadores	109,7	
<i>Pup Joints</i>	61,4	
Junta Flexível Inferior	2,86	
LMRP	7,58	
BOP Stack	7,10	
Cabeça de Poço	3,05	
Solo	Condutor	60
	Revestimento de Superfície	140

Devido ao seu arranjo espacial o sistema de tração não influencia no comprimento do *tally* do *riser*, no entanto, os tracionadores desempenham uma função indispensável de elementos de ligação entre a sonda e o anel tracionador.

A Tabela 8.20 apresenta as características da malha do *riser* de perfuração, sendo o mesmo modelado como uma linha composta por seguimentos flexíveis que representam as propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas dos materiais que compõem os equipamentos modelados.

O SITUA/Prosim disponibiliza uma funcionalidade de edição dos pontos da malha, sendo assim é possível discretizar determinados trechos de uma linha tomando como referência as coordenadas absolutas. O intervalo de 0 m a 1025 m observado na Tabela 8.20 representa o trecho entre o *diverter* e a cabeça do poço.

**Tabela 8.20 – Características da malha do riser de perfuração**

Dados da Malha		
Número de nós	1026	
Tipo de elemento	pórtico	
<b>Riser</b>	<b>Intervalo do Comprimento</b>	<b>Tamanho do Elemento (m)</b>
<i>Diverter</i> - Cabeça de poço	0 m – 1025 m	1

A modelagem do solo e a discretização da malha no trecho entre o condutor e o revestimento de superfície assim como a coluna do revestimento intermediário são apresentadas mais adiante. A seguir são descritos todos os equipamentos que compõem a modelagem do riser de perfuração.

#### 8.5.1.1.1 Mesa Rotativa/Cunha

A linha composta externa é o segmento que representa o riser de perfuração e as condições de contorno no ponto de conexão do topo da linha externa com a sonda é a condição que melhor representa fisicamente a conexão do *diverter* com a mesa rotativa.

A Tabela 8.21 apresenta as coordenadas deste ponto. A extremidade inferior da linha externa, trecho modelado como revestimento de superfície, apresenta as condições de contorno fixas nos eixos x, y e z sendo permitido a rotação em torno destes eixos.

**Tabela 8.21 – Coordenadas da mesa rotativa**

Localização da Mesa Rotativa				
TOPO Linha Externa	Coordenadas Locais (m)	x	0,0	
		y	0,0	
		z	37	
	Condição de contorno		Solidária a sonda	
FUNDO Linha Externa	Coordenadas Locais (m)	x	0,0	
		y	0,0	
		z	-1200	
	Condição de contorno (x, y, z)		Fixo	
	Condição de contorno (Rx, Ry, Rz)		Livre	

Da mesma forma, as condições de contorno no ponto de conexão do topo da linha interna com a sonda é a condição que melhor representa fisicamente o momento em que a coluna do revestimento está apoiada na cunha da mesa rotativa, recordando que em determinados momentos do procedimento, a coluna permanece apoiada na cunha em outros ela é movimentada pelo *top drive*.

A Tabela 8.22 apresenta as coordenadas deste ponto. A extremidade inferior da coluna do revestimento, fundo, apresenta as condições de contorno livre.

**Tabela 8.22 – Coordenadas da cunha**

Localização da Cunha			
TOPO Linha Interna	Coordenadas Locais (m)	x	0,0
		y	0,0
		z	37
	Condição de contorno		Solidária a sonda
FUNDO Linha Interna	Coordenadas Locais (m)	x	0,0
		y	0,0
		z	-2000
	Condição de contorno		Livre

#### 8.5.1.1.2 Diverter

Em algumas análises de *riser* o *diverter* pode ser incorporado a estrutura da plataforma, pois sua dimensão não causa diferenças significativas no resultado global da análise, optou-se, conforme observado na Tabela 8.23, por representar o equipamento como um seguimento de material flexível.

**Tabela 8.23 – Propriedades físicas e geométricas do *diverter***

Dados do <i>Diverter</i>		
Peso no Ar (kN/m)		11,8648
Peso na Água (kN/m)		8,4393
Rigidez à Flexão-EI (kNm <sup>2</sup> )		259827,5305
Rigidez à Torção-GJ (kNm <sup>2</sup> )		199867,3311
Rigidez Axial-EA (kN)		7985229,0051
Dimensões	Comprimento (m)	3,05
	Diâmetro Externo (m)	0,4859
	Diâmetro Interno (m)	0,5334

#### 8.5.1.1.3 Junta Flexível

O modelo é composto por duas juntas flexíveis, uma superior e outra inferior, ambas modeladas com elementos de articulação com rigidez rotacional constante.

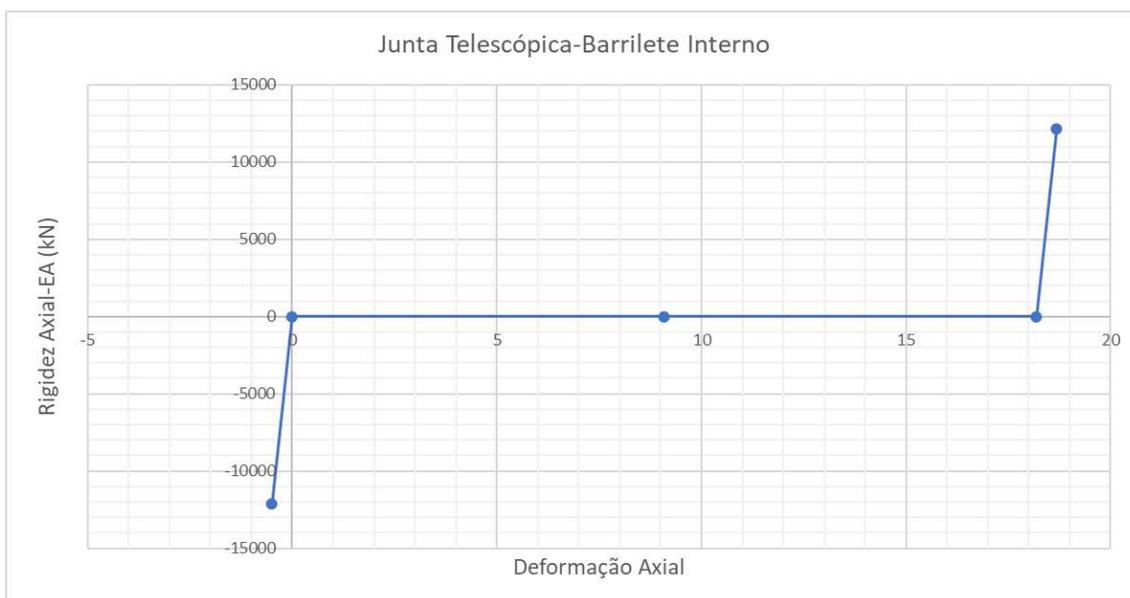
A Tabela 8.24 apresenta as propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas das juntas flexíveis.

**Tabela 8.24 - Propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas das juntas flexíveis**

<b>Dados da Junta Flexível Superior</b>		
	Peso no Ar (kN/m)	16,2523
	Peso na Água (kN/m)	12,2060
	Rigidez à Flexão-EI (kNm <sup>2</sup> )	924,6126
	Rigidez à Torção-GJ (kNm <sup>2</sup> )	368663,3733
	Rigidez Axial-EA (kN)	13407479,8969
Dimensões	Comprimento (m)	3,3528
	Diâmetro Externo (m)	0,5715
	Diâmetro Interno (m)	0,4953
<b>Dados da Junta Flexível Inferior</b>		
	Peso no Ar (kN)	38,8135
	Peso na Água (kN)	33,2657
	Rigidez à Flexão-EI (kNm <sup>2</sup> )	3783,6901
	Rigidez à Torção-GJ (kNm <sup>2</sup> )	36942248,374
	Rigidez Axial-EA (kN)	320549168,4283
Dimensões	Comprimento (m)	2,8651
	Diâmetro Externo (m)	1,4732
	Diâmetro Interno (m)	0,4762
Propriedades Hidrodinâmicas	Coeficiente de Arrasto Normal (CDN)	1,2
	Coeficiente de Arrasto Longitudinal (CDL)	0,008
	Coeficiente de Inércia (CM)	2,0
	Coeficiente de Massa Adicionada (CA)	1,0

#### 8.5.1.1.4 Junta Telescópica

De acordo com a Figura 8.25 o barrilete interno da junta telescópica apresenta uma rigidez axial não linear, de forma a apresentar deformações axiais significativas durante a análise dinâmica. Este componente foi modelado utilizando um único elemento de pórtico, para não haver influência de cargas de flexão nos resultados.



**Figura 8.25 – Curva de rigidez axial do barrilete interno da junta telescópica**

A Tabela 8.25 apresenta as propriedades do barrilete interno da junta telescópica.

**Tabela 8.25 – Propriedades geométricas e físicas do barrilete interno**

Dados do Barrilete Interno		
Peso no Ar (kN/m)		64,1247
Peso na Água (kN/m)		53,7354
Dimensões	Comprimento Total (m)	19,812

O anel tracionador é modelado como um elemento flexível com alta rigidez (Tabela 8.26), optou-se por posicioná-lo entre dois segmentos do barrilete externo da junta telescópica.

**Tabela 8.26 – Propriedades geométricas e físicas do anel tracionador**

Dados do Anel Tracionador		
Peso no Ar (kN)		184,5163
Peso na Água (kN)		135,9035
Rígidez à Flexão-EI (kNm <sup>2</sup> )		260428,05
Rígidez à Torção-GJ (kNm <sup>2</sup> )		200329,27
Rígidez Axial-EA (kN)		8005582,3
Dimensões	Comprimento (m)	0,5
	Diâmetro Externo (m)	1,46685

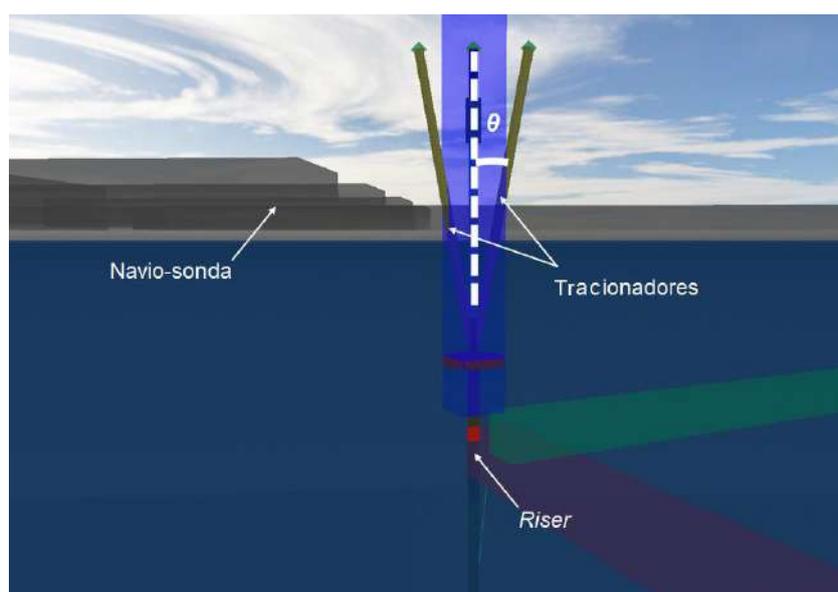
A Tabela 8.27 apresenta as propriedades dos dois segmentos do barrilete externo da junta telescópica.

**Tabela 8.27 – Propriedades geométricas, físicas e hidrodinâmicas do barrilete externo**

Dados do Barrilete Externo		
Peso no Ar (kN/m)		10,9912
Peso na Água (kN/m)		6,8721
Rigidez à Flexão-EI (kNm <sup>2</sup> )		475336,4318
Rigidez à Torção-GJ (kNm <sup>2</sup> )		365643,4091
Rigidez Axial-EA (kN)		10215222,7786
Dimensões	Comprimento do Seguimento Superior (m)	4,4501
	Comprimento do Seguimento Inferior (m)	16,9042
	Diâmetro Externo (m)	0,6604
	Diâmetro Interno (m)	0,5842
Propriedades Hidrodinâmicas	Coefficiente de Arrasto Normal (CDN)	1,2
	Coefficiente de Arrasto Longitudinal (CDL)	0,008
	Coefficiente de Inércia (CM)	2,0
	Coefficiente de Massa Adicionada (CA)	1,0

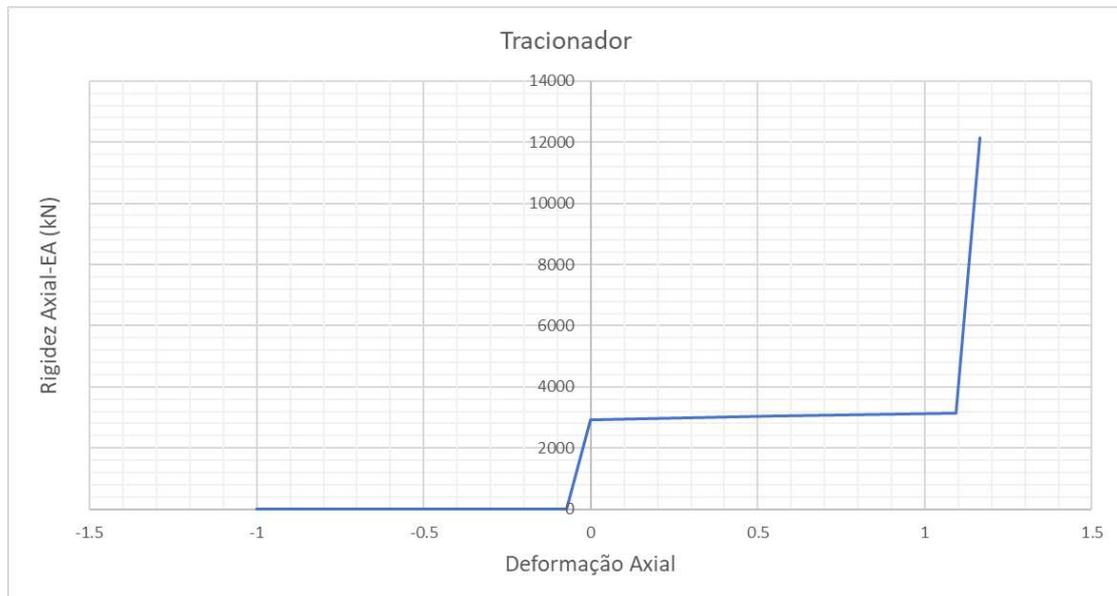
#### 8.5.1.1.5 Tracionadores

Observando a Figura 7.6 nota-se que os tracionadores são modelados como dois elementos de linha com propriedades idênticas, sendo os elementos de linha conectados ao anel tracionador.



**Figura 8.26 – Representação dos tracionadores pelo SITUA**

Conforme mencionado em 5.3.1 a tração é mantida próxima de um valor constante durante a análise, fato atribuído à rigidez axial não linear dos elementos (Figura 8.27).



**Figura 8.27 – Curva do tracionador**

A Tabela 8.28 apresenta as propriedades utilizadas na modelagem dos tracionadores.

**Tabela 8.28 – Propriedades geométricas e físicas do tracionador**

Dados do Tracionador	
Quantidade de Tracionadores	2
Ângulo dos cabos dos tracionadores ( $\theta^\circ$ )	10
Curso máximo (m)	15,24

#### 8.5.1.1.6 Juntas de *Riser*

De acordo com W. He *et al* [80] tornou-se prática operacional as configurações da coluna de *riser* no trecho próximo a lâmina d'água serem compostas por juntas sem flutuadores a prática é utilizada para atenuar as contribuições das Vibrações Induzidas por Vórtice -VIV aos danos causados por fadiga, visto que, os movimentos induzidos por ondas provocam estresses que contribuem com a fadiga.

Para cada componente do *riser*, é possível estimar o dano de fadiga acumulado e conseqüentemente determinar um fator de segurança para a vida útil do equipamento, entretanto, esta abordagem não é o objetivo deste trabalho.

Por sua vez, a seção intermediária é configurada por juntas com flutuadores, recordando que os flutuadores são compostos por espuma sintética e possuem o objetivo de adicionar empuxo à linha, reduzindo assim o peso próprio da coluna e conseqüentemente a tração de topo. Existem tipos de flutuadores específicos para atuarem em determinada faixa de profundidade [42].

Por fim a seção próxima ao leito marinho é configurada por juntas sem flutuadores e por *pup joints*, neste trecho as juntas sem flutuadores são mais adequadas pois reduzem a concentração de tensões na junta flexível inferior e no BOP, outro fato levado em consideração, é a viabilidade econômica, já que a densidade e os custos da espuma sintética aumentam com a pressão de projeto requerida e, portanto, com a profundidade [2, 80].

A Tabela 8.29 apresenta as propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas das juntas com flutuadores, aptas para serem instaladas até 940 m de lâmina d'água de acordo com a classificação de profundidade dos módulos de flutuação.

**Tabela 8.29 – Propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas das juntas com flutuadores**

<b>Dados da Junta com Flutuador (940 m)</b>		
Peso no Ar (kN/m)		8,4836
Peso na Água (kN/m)		0,1263
Rigidez à Flexão-EI (kNm <sup>2</sup> )		229451,41
Rigidez à Torção-GJ (kNm <sup>2</sup> )		176501,08
Rigidez Axial-EA (kN)		6969223,69
Dimensões	Comprimento da seção (m)	300
	Diâmetro Externo (m)	0,5334
	Diâmetro Interno (m)	0,4922
Propriedades Hidrodinâmicas	Coeficiente de Arrasto Normal (CDN)	0,6
	Coeficiente de Arrasto Longitudinal (CDL)	0,008
	Coeficiente de Inércia (CM)	2,0
	Coeficiente de Massa Adicionada (CA)	1,0
	Diâmetro Hidrodinâmico (HD)	1,2827

A Tabela 8.30 apresenta as propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas das juntas com flutuadores, aptas para serem instaladas até 1219 m de lâmina d'água de acordo com a classificação de profundidade dos módulos de flutuação.

**Tabela 8.30 – Propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas das juntas com flutuadores**

<b>Dados da Junta com Flutuador (1219 m)</b>		
Peso no Ar (kN/m)		8,8782
Peso na Água (kN/m)		0,2396
Rigidez à Flexão-EI (kNm <sup>2</sup> )		229451,41
Rigidez à Torção-GJ (kNm <sup>2</sup> )		176501,08
Rigidez Axial-EA (kN)		6969223,69
Dimensões	Comprimento da seção (m)	300
	Diâmetro Externo (m)	0,5334
	Diâmetro Interno (m)	0,4922
Propriedades Hidrodinâmicas	Coefficiente de Arrasto Normal (CDN)	0,6
	Coefficiente de Arrasto Longitudinal (CDL)	0,008
	Coefficiente de Inércia (CM)	2,0
	Coefficiente de Massa Adicionada (CA)	1,0
	Diâmetro Hidrodinâmico (HD)	1,308

A Tabela 8.31 apresenta as propriedades das juntas sem flutuadores.

**Tabela 8.31 – Propriedades físicas, geométricas das juntas sem flutuadores**

<b>Dados da Junta sem Flutuador</b>		
Peso no Ar (kN/m)		6,3649
Peso na Água (kN/m)		3,6012
Rigidez à Flexão-EI (kNm <sup>2</sup> )		254516,0439
Rigidez à Torção-GJ (kNm <sup>2</sup> )		195781,5722
Rigidez Axial-EA (kN)		7588261,1917
Dimensões	Comprimento da seção (m)	315
	Diâmetro Externo (m)	0,5398
	Diâmetro Interno (m)	0,4953

A Tabela 8.32 apresenta as propriedades dos *pup joint*.

**Tabela 8.32 – Propriedades físicas, geométricas dos *pup joints***

<b>Dados do <i>Pup Joint</i></b>		
Peso no Ar (kN/m)		6,3649
Peso na Água (kN/m)		3,6012
Rigidez à Flexão-EI (kNm <sup>2</sup> )		254516,0439
Rigidez à Torção-GJ (kNm <sup>2</sup> )		195781,5722
Rigidez Axial-EA (kN)		7588261,19166
Dimensões	Comprimento (m)	12,192
	Diâmetro Externo (m)	0,56515
	Diâmetro Interno (m)	0,4953

#### 8.5.1.1.7 BOP

O peso do LMRP e do BOP *Stack*, geralmente são obtidos junto ao fabricante, alternativamente, para análises de *riser* uma seção transversal de tubo equivalente que simule a rigidez à flexão pode ser estimada, sendo as propriedades da seção transversal equivalente usadas no modelo de análise.

A Tabela 8.33 apresenta as propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas do LMRP.

**Tabela 8.33 – Propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas do LMRP**

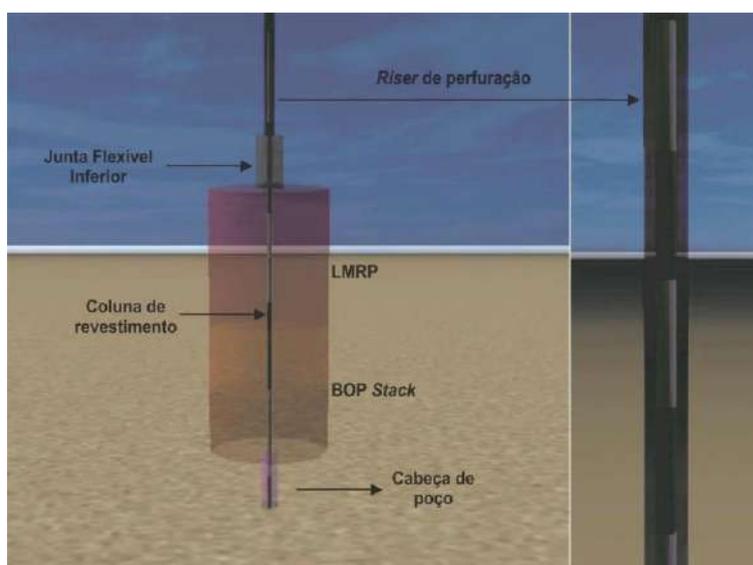
<b>Dados do LMRP</b>		
Peso no Ar (kN/m)		183,4495
Peso na Água (kN/m)		157,8104
Rigidez à Flexão-EI (kNm <sup>2</sup> )		4444x10 <sup>5</sup>
Rigidez à Torção-GJ (kNm <sup>2</sup> )		4444x10 <sup>5</sup>
Rigidez Axial-EA (kN)		56x10 <sup>7</sup>
Dimensões	Comprimento (m)	7,5895
	Diâmetro Externo (m)	6,6548
	Diâmetro Interno (m)	0,4762
Propriedades Hidrodinâmicas	Coeficiente de Arrasto Normal (CDN)	5,1143
	Coeficiente de Arrasto Longitudinal (CDN)	45,7077
	Coeficiente de Inércia (CDN)	85,0817
	Coeficiente de Massa Adicionada (CDN)	42,5409
	Diâmetro Hidrodinâmico	1,0

A Tabela 8.34 apresenta as propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas do BOP *Stack*.

**Tabela 8.34 – Propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas do BOP *Stack***

Dados do BOP <i>Stack</i>		
Peso no Ar (kN/m)		278,0984
Peso na Água (kN/m)		240,1549
Rigidez à Flexão-EI (kNm <sup>2</sup> )		4444x10 <sup>5</sup>
Rigidez à Torção-GJ (kNm <sup>2</sup> )		4444x10 <sup>5</sup>
Rigidez Axial-EA (kN)		56x10 <sup>7</sup>
Dimensões	Comprimento (m)	7,1018
	Diâmetro Externo (m)	6,6548
	Diâmetro Interno (m)	0,4762
Propriedades Hidrodinâmicas	Coefficiente de Arrasto Normal (CDN)	5,9979
	Coefficiente de Arrasto Longitudinal (CDN)	48,8504
	Coefficiente de Inércia (CDN)	49,8941
	Coefficiente de Massa Adicionada (CDN)	99,7882
	Diâmetro Hidrodinâmico	1,0

A Figura 8.28 ilustra a interface gráfica do software SITUA/Prosim, observa-se que com o recurso de opacidade é possível aplicar uma transparência ao BOP e a coluna de *riser* possibilitando assim visualizar o revestimento em seu interior.



**Figura 8.28 – BOP (SITUA/Prosim)**

### 8.5.1.1.8 Sistema de Cabeça de Poço Submarina - SCPC

A cabeça de poço foi modelada como um segmento flexível, com alto valor de rigidez, visto que este equipamento deve ser projetado para suportar todas as cargas transferidas pela coluna de *riser*. A geometria da cabeça do poço e sua configuração são fundamentais para a compreensão do momento fletor na região próxima ao leito marinho. A Tabela 8.35 apresenta os detalhes da cabeça de poço.

**Tabela 8.35 – Propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas do sistema de cabeça de poço submarina**

Dados da Cabeça de Poço Submarina		
	Peso no Ar (kN/m)	26,2114
	Peso na Água (kN/m)	17,5884
	Rigidez à Flexão-EI (kNm <sup>2</sup> )	111x10 <sup>5</sup>
	Rigidez à Torção-GJ (kNm <sup>2</sup> )	111x10 <sup>5</sup>
	Rigidez Axial-EA (kN)	14x10 <sup>8</sup>
Dimensões	Comprimento (m)	3,05
	Diâmetro Externo (m)	0,9144
	Diâmetro Interno (m)	0,8128
Propriedades Hidrodinâmicas	Coefficiente de Arrasto Normal (CDN)	1,2
	Coefficiente de Arrasto Longitudinal (CDL)	0,008
	Coefficiente de Inércia (CM)	2,0
	Coefficiente de Massa Adicionada (CA)	1,0
	Coefficiente de Arrasto Normal (CDN)	1,2

### 8.5.1.1.9 Condutor e Revestimento de Superfície

O condutor normalmente estende-se entre 60 e 100 m abaixo do leito marinho já o revestimento de superfície pode alcançar até 800 m de profundidade.

Dependendo dos programas de revestimento propostos e das condições do solo, deflexões horizontais significativas podem ocorrer na parte superior do condutor, resultando em movimentos do mesmo abaixo do leito marinho.

O condutor e o revestimento de superfície são modelados como elementos flexíveis com altos valores de rigidez, no trecho de 60 metros, onde o revestimento de superfície está interno ao condutor, o trecho é modelado em camadas sendo que a Rigidez Equivalente à Flexão -EI e a Rigidez Equivalente Axial - EA é a soma da parcela da rigidez de cada elemento.

A cimentação do espaço anular pode ser ignorada, uma vez que sua contribuição para a rigidez é pequena.

**Tabela 8.36 – Propriedades físicas e geométricas do condutor e do revestimento de superfície**

<b>Dados do Condutor</b>		
Peso no Ar (kN/m)		2,9626
Peso na Água (kN/m)		0,9239
Rigidez à Flexão-EI (kNm <sup>2</sup> )		236089,2532
Rigidez à Torção-GJ (kNm <sup>2</sup> )		181607,1178
Rigidez Axial-EA (kN)		8087051,366
Dimensões	Comprimento da Seção (m)	60
	Diâmetro Externo (m)	0,508
	Diâmetro Interno (m)	0,4572
<b>Dados do Revestimento de Superfície</b>		
Peso no Ar (kN/m)		2,9625
Peso na Água (kN/m)		0,9239
Rigidez à Flexão-EI (kNm <sup>2</sup> )		236089,2532
Rigidez à Torção-GJ (kNm <sup>2</sup> )		181607,1178
Rigidez Axial-EA (kN)		8087051,3664
Dimensões	Comprimento da Seção (m)	140
	Diâmetro Externo (m)	0,508
	Diâmetro Interno (m)	0,4572

Um nível adequado de discretização da malha de elementos finitos do poço revestido (Tabela 8.37) deve ser usado para representar o trecho do condutor, particularmente próximo ao leito marinho, visto que nessa região encontra-se a maior concentração de cargas fletoras resultantes do peso da coluna de *riser*.

**Tabela 8.37 – Características da malha dos revestimentos do poço**

<b>Dados da Malha</b>		
Número de nós		210
Tipo de elemento		pórtico
Trecho	Intervalo do Comprimento	Tamanho do Elemento (m)
Condutor	0 m – 10 m	0,5
	10 m – 60 m	1
Revestimento de Superfície	60 m – 140 m	1

### 8.5.1.2 Curva P-y do Solo

Na região do solo por meio de uma curva P-y de argila, simula-se o efeito da deformação lateral da formação atuando no revestimento. Considera-se o poço amortecido com fluido de perfuração ao longo de todo seu comprimento enquanto a curva age somente sobre a parede externa do revestimento.

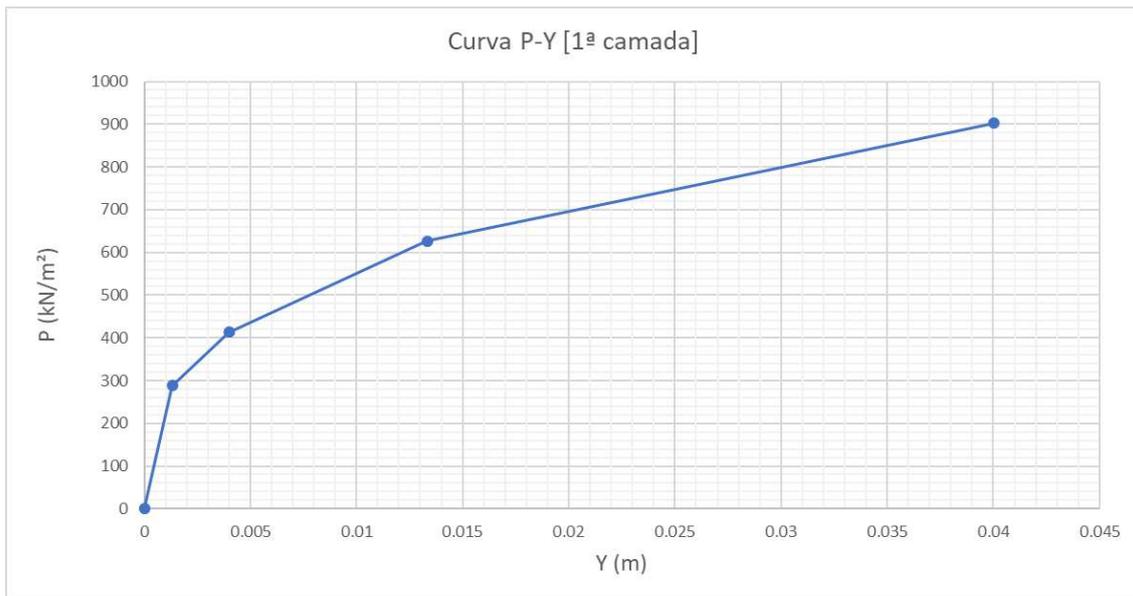
A seguir, na Tabela 8.38, são apresentadas as propriedades do solo, necessárias para a geração da curva P-y, adotou-se uma espessura de 2000 m de argila, subdividida em 20 camadas iguais, cada uma com sua respectiva curva.

**Tabela 8.38 – Propriedades do solo para geração da curva P-y.**

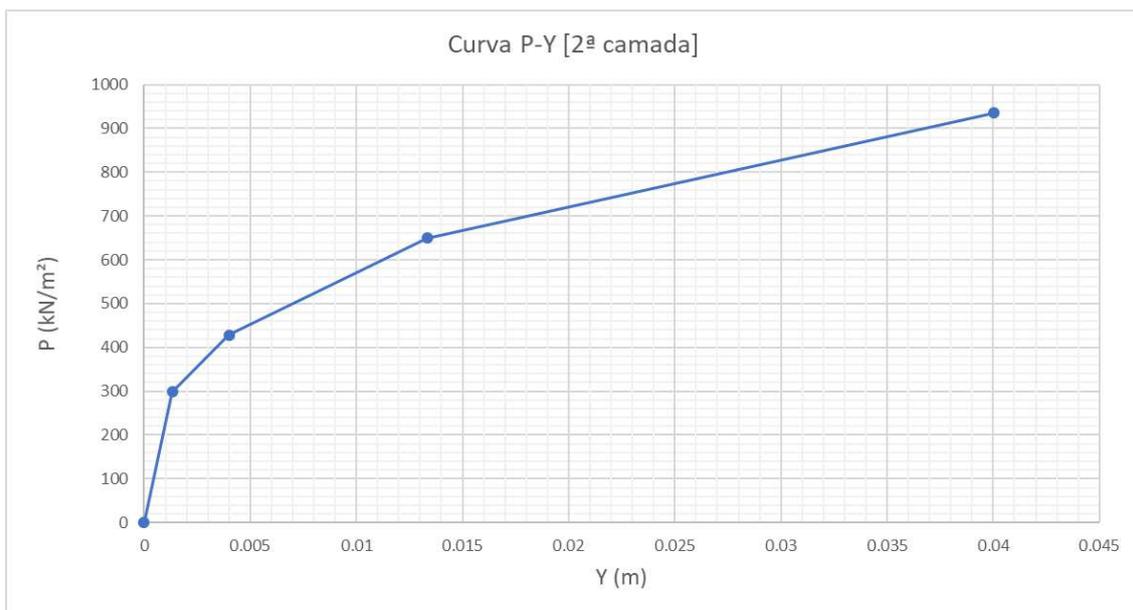
Dados do Solo	
Espessura (m)	2000
Tipo	Argila
Peso Específico Submerso (kN/m <sup>3</sup> )	5
Constante J empírica para cálculo da curva P-y	0,25
Su (kN/m <sup>2</sup> ) em 2000 m	270
$\epsilon_{50}$	0,01

Onde Su é a resistência não-drenada ao cisalhamento do solo, sendo essa uma função da profundidade abaixo do leito marinho, o peso específico submerso é constante e igual a 5 kN/m<sup>3</sup> e J é uma constante empírica adimensional, experimentalmente para argila os valores variam de 0,25 a 0,5. O parâmetro  $\epsilon_{50}$ , deformação, corresponde à metade da diferença máxima entre as tensões principais no ensaio tri axial das amostras de solo.

As Figura 8.29 e 8.30 ilustram a curva P-y para a primeira e a segunda camada do poço revestido.

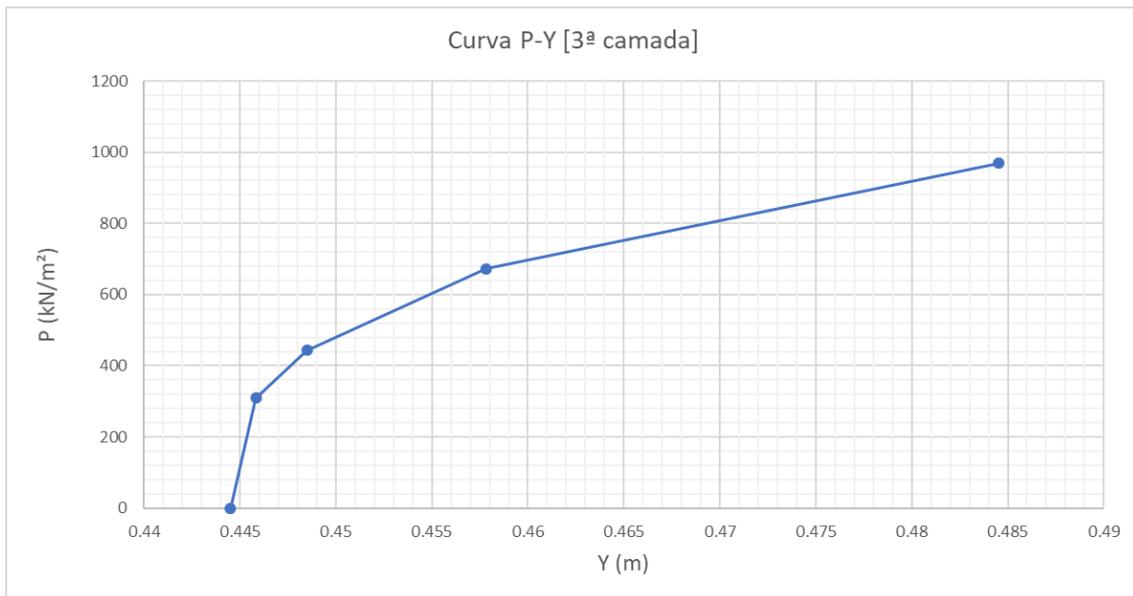


**Figura 8.29 – Curva P-y no intervalo de 0-100 m de profundidade**

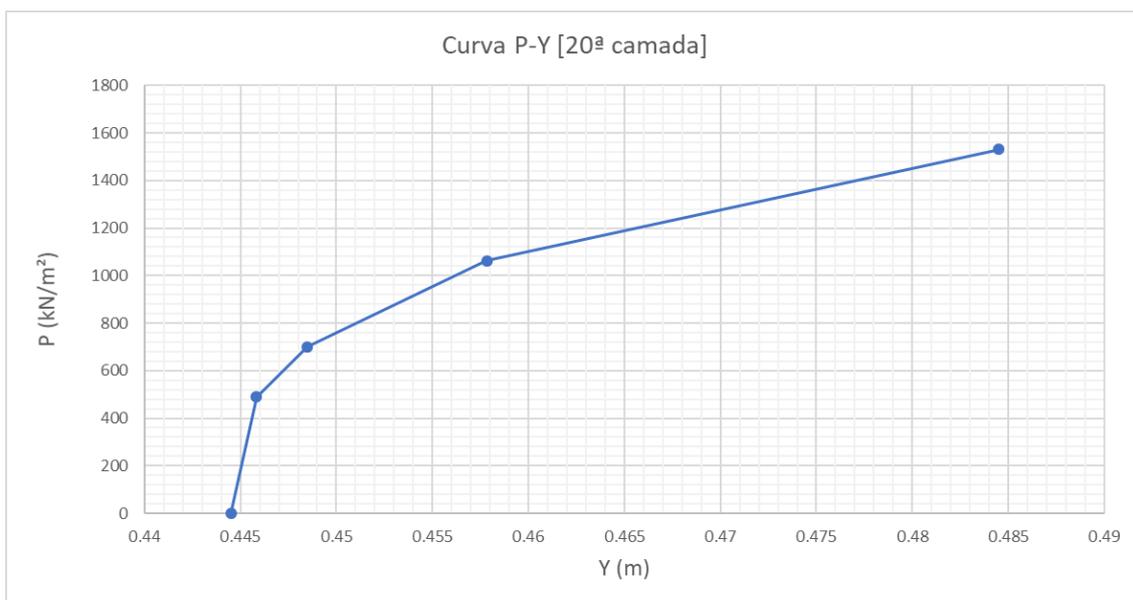


**Figura 8.30 – Curva P-y no intervalo de 100-200 m de profundidade**

As Figura 8.31 e 8.32 ilustram a curva P-y para a terceira e a vigésima camada do poço perfurado. Observe que para modelar o trecho do poço perfurado que ainda não foi revestido as curvas são deslocadas no sentido positivo do eixo das abscissas.



**Figura 8.31 - Curva P-y no intervalo de 200-300 m de profundidade**



**Figura 8.32 - Curva P-y no intervalo de 1900-2000 m de profundidade**

Observa-se que entre a primeira e a vigésima camada a pressão variou com a profundidade de 900 kN/m<sup>2</sup> para aproximadamente 1530 kN/m<sup>2</sup>. A validação da implementação da curva P-y realizada pelo programa SITUA/Prosim, pode ser consultada no Apêndice C.

### 8.5.1.3 Coluna do Revestimento Intermediário

A coluna do revestimento intermediário é modelada com elementos rígidos (Tabela 8.39), optou-se por utilizar as propriedades de um revestimento de 13 <sup>3</sup>/<sub>8</sub> in, visto que, na reentrada do poço o espaço anular é reduzido, podendo haver contato entre as superfícies também ao longo do *riser*.

**Tabela 8.39 – Propriedades físicas e geométricas da coluna do revestimento intermediário**

Dados do Revestimento Intermediário		
Densidade (kN/m <sup>3</sup> )		77
Módulo de Elasticidade (kN/m <sup>2</sup> )		210x10 <sup>6</sup>
Tensão de Escoamento (kN/m <sup>2</sup> )		551580,5824
Dimensões (m)	Comprimento da seção (m)	2000
	Diâmetro Externo (m)	0,3229
	Diâmetro Interno (m)	0,3397
	Espessura (m)	0,0084

A Tabela 8.40 apresenta as características da malha da coluna do revestimento intermediário, optou-se por discretizar em elementos menores o trecho da malha próxima a mesa rotativa e fora da linha d'água visto que nesta região são esperadas as maiores concentrações de esforços, da mesma maneira, a fim de registrar com maior exatidão os esforços, o trecho próximo à entrada do poço também é discretizado por elementos menores, já para o restante da coluna optou-se por uma progressão em relação ao aumento do tamanho do elemento.

**Tabela 8.40 – Características da malha da coluna do revestimento intermediário**

Dados da Malha		
Número de nós		1213
Tipo de elemento		pórtico
Coluna	Intervalo do Comprimento	Tamanho do Elemento (m)
Revestimento Intermediário	0 m – 30 m	0,5
	30 m – 1023 m	1
	1023 m – 2000 m	0,5 - 10

### 8.5.2 Resultados do Estudo de Caso 3

Conforme mencionado anteriormente o estudo de caso 3 apresenta a modelagem detalhada de um sistema de *riser* de perfuração a opção por uma análise acoplada possibilita reproduzir de forma mais precisa os efeitos da interação do solo e da sonda com o *riser* de perfuração.

Conforme demonstrado nos resultados obtidos a modelagem do sistema de tração (seção 5.3.1), das juntas flexíveis (seção 5.3.2) e da junta telescópica (seção 5.3.3) garantem a estabilidade do *riser* frente aos movimentos da plataforma conjuntamente com os carregamentos de onda, vento e corrente.

A Figura 8.33 apresenta o detalhamento do modelo, a linha externa representa o *riser* de perfuração/poço revestido, note que o poço é modelado por dois trechos, um revestido, condutor e revestimento de superfície, e outro sem o revestimento com o fluido de perfuração amortecendo o poço. A linha interna representa a coluna do revestimento intermediário, nesta etapa a mesma encontra-se totalmente suspensa e apoiada na cunha da mesa rotativa.



**Figura 8.33 – Detalhamento do modelo**

Ainda observando a Figura 8.33 note que a mesma serve de guia para interpretação dos resultados gráficos apresentados a seguir, posto que a disposição dos equipamentos e das linhas, externa e interna, correspondem ao trecho do comprimento apresentado no eixo das abscissas das figuras 8.34, 8.35 e 8.36.

A Figura 8.34 apresenta os esforços aplicados ao longo do *riser* de perfuração e da coluna do revestimento intermediário, o trecho do *riser* estende-se desde o *diverter* até a conexão do LMRP com o BOPstack, observe que há pequenos esforços de compressão no topo do conjunto, estes efeitos são desprezados entretanto contabilizados na análise

(seção 5.3.3), a partir do anel do tracionador onde é aplicada a tração de topo até a conexão do LMRP com o BOPstack a estrutura encontra-se tracionada.

Ainda observando a Figura 8.34, conclui-se que a tração de topo aplicada é suficiente para garantir que a estrutura não apresente esforços de compressão ao longo de seu comprimento, no mesmo grau de importância, nota-se também os esforços mínimos atuantes na extremidade inferior mais especificamente na conexão do LMRP com o BOPstack, neste ponto os esforços devem ser suficientes para garantir o *overpull* e minimizados para evitar a transferência de cargas da coluna de *riser* para a cabeça de poço.

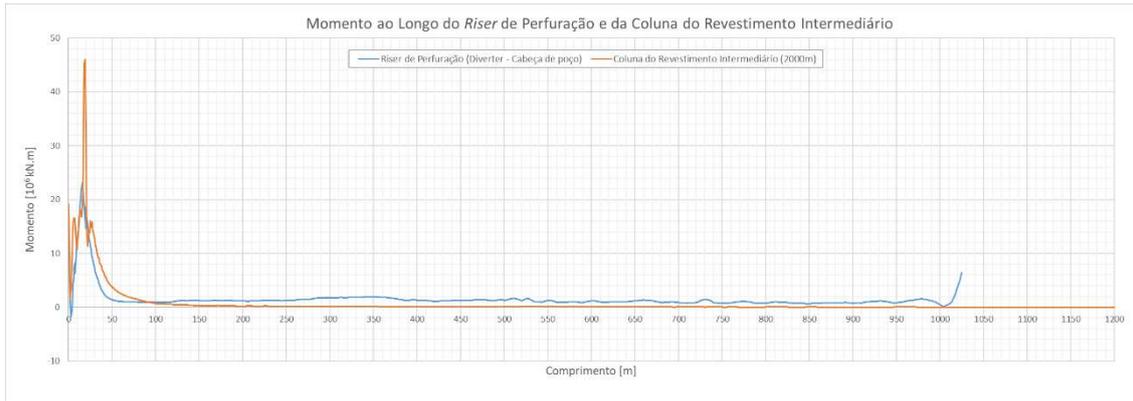
A coluna do revestimento intermediário encontra-se totalmente tracionada, observa-se um pequeno salto nos esforços no intervalo entre 1009 m e 1022 m de seu comprimento, este trecho corresponde ao seguimento interno ao BOP (Figura 8.34).



**Figura 8.34 – Esforços ao longo do *riser* de perfuração e da coluna do revestimento intermediário**

Para as figuras a seguir 8.35 e 8.36 optou-se por limitar a representação do intervalo das abcissas a 1200 m, visto que a partir deste os valores reportados permanecem constantes.

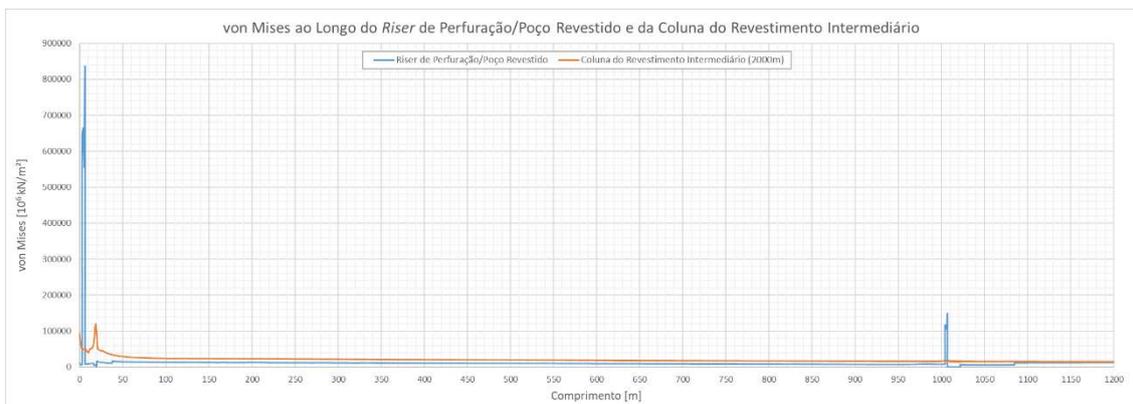
A Figura 8.35 apresenta o momento no *riser* de perfuração, trecho do *diverter* até a cabeça de poço, e da coluna do revestimento até o comprimento de 1200 m. Observe que os picos de valores são reportados nos primeiros 20 m, região próxima à mesa rotativa/cunha, enquanto que na base do *riser* de perfuração o momento fletor registrado na cabeça de poço atinge o valor de  $6,42 \times 10^6$  kN.m, por via de regra em análises de *riser*, o momento fletor nesta região é critério de projeto.



**Figura 8.35 – Momento ao longo do riser de perfuração e da coluna do revestimento intermediário**

Para fins de verificação estrutural por meio do critério de falha de von Mises os cálculos de tensão devem levar em consideração a tração real (seção 7.3). A Figura 8.36 apresenta a tensão de von Mises no riser de perfuração/poço revestido, e na coluna do revestimento.

Os maiores valores foram reportados no topo também na região próxima à mesa rotativa/cunha, após os 50 m a curva da coluna do revestimento apresenta um decaimento e tende a se estabilizar, por sua vez observa-se, na base do riser de perfuração, um salto na tensão de von Mises registrada na conexão da junta flexível inferior com o LMRP.



**Figura 8.36 – von Mises ao longo do riser de perfuração/poço revestido e da coluna do revestimento intermediário**

### 8.5.3 Custo Computacional

O processo de detalhamento do modelo e execução da análise, envolveu algumas estratégias, entre elas a variação da linha interna para averiguar a influência deste seguimento no custo computacional.

Não menos importante a premissa deste estudo de caso, precedeu a simulação do *riser* de perfuração antes do início da operação de descida da coluna do revestimento intermediário, os resultados do tempo total e uso de memória utilizada na execução desta etapa são apresentados na Figura 8.37.

***** EXECUTION SUMMARY AND STATISTICS *****		Estudo de caso 3	
		Riser de perfuração/poço	
END OF DATA INPUT	: 03/03/20 16:30:57 ;	0.43 SECONDS ELAPSED	
END OF DYNAMIC SIMULATION	: 03/03/20 20:48:50 ;	15473.41 SECONDS ELAPSED	
TOTAL RUN TIME	: 03/03/20 20:48:50 ;	15473.83 SECONDS ELAPSED	
		257 MINUTES, 53 SECONDS	
		4 HOURS 17 MINUTES, 53 SECONDS	
USED MEMORY	:	8801411 4-byte words	

**Figura 8.37 - Custo computacional (estudo de caso 3 – riser, sem coluna)**

A Figura 8.38 apresenta o resultado do tempo total e uso de memória utilizada na execução da análise durante a manobra de descida da coluna do revestimento intermediário, note que no primeiro momento da manobra a coluna que desce pelo interior do *riser* de perfuração possui 1200 m de comprimento.

***** EXECUTION SUMMARY AND STATISTICS *****		Estudo de caso 3	
		Riser de perfuração/poço/coluna de revestimento 1200 m	
END OF DATA INPUT	: 17/03/20 16:22:52 ;	0.45 SECONDS ELAPSED	
END OF DYNAMIC SIMULATION	: 17/03/20 21:18:25 ;	17732.87 SECONDS ELAPSED	
TOTAL RUN TIME	: 17/03/20 21:18:25 ;	17733.32 SECONDS ELAPSED	
		295 MINUTES, 33 SECONDS	
		4 HOURS 55 MINUTES, 33 SECONDS	
USED MEMORY	:	8752193 4-byte words	

**Figura 8.38 - Custo computacional (estudo de caso 3 – coluna 1200 m)**

Por sua vez a Figura 8.39 apresenta o resultado do tempo total e uso de memória, para um segundo momento da manobra de descida da coluna do revestimento intermediário, onde a coluna apresenta 2000 m de comprimento.

***** EXECUTION SUMMARY AND STATISTICS *****		Estudo de caso 3	
Riser de perfuração/poço/coluna de revestimento 2000 m			
END OF DATA INPUT	:	03/03/20 16:32:07 ;	0.57 SECONDS ELAPSED
END OF DYNAMIC SIMULATION	:	04/03/20 00:56:43 ;	30276.19 SECONDS ELAPSED
TOTAL RUN TIME	:	04/03/20 00:56:43 ;	30276.76 SECONDS ELAPSED
			504 MINUTES, 36 SECONDS
		8 HOURS	24 MINUTES, 36 SECONDS
USED MEMORY	:		8801561 4-byte words

**Figura 8.39 - Custo computacional (estudo de caso 3 – coluna 2000 m)**

A variação do comprimento da coluna do revestimento, prolongamento da linha interna, refinamento da malha, demanda uma quantidade maior de verificações do *bounding box* na busca por elementos sujeitos ao contato *pipe-in-pipe*, o uso de memória e tempo de execução da análise simulando a descida da coluna de revestimento de 2000 m, expôs um acréscimo ao custo computacional.

## 8.6 Estudo de Caso 4

O estudo de caso 4, além da operação de descida da coluna do revestimento de superfície conectado a coluna de trabalho simula-se conjuntamente também a condição de deriva da sonda.

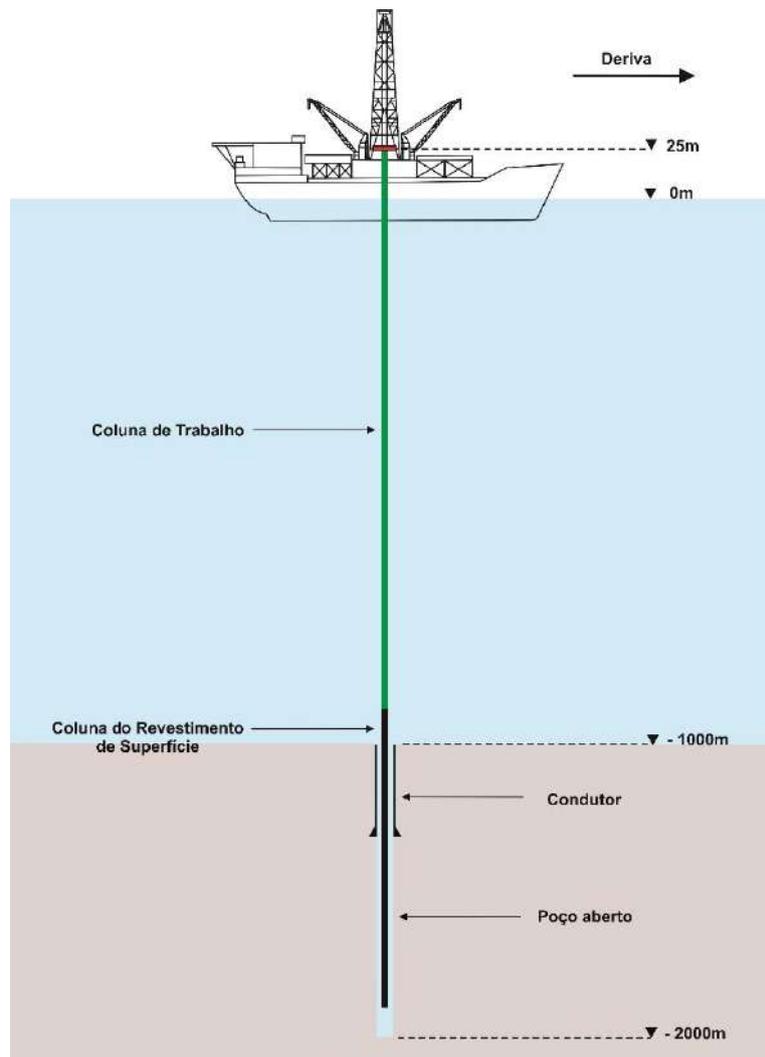
Importante ressaltar que mesmo tratando-se de uma operação de descida de uma coluna de revestimento este procedimento é diferente do apresentado no estudo de caso 3, sobretudo porque agora a manobra é realizada sem a necessidade do *riser* de perfuração, visto que o poço se encontra perfurado na segunda fase e não há circulação de fluido de perfuração sendo a água do mar utilizada como fluido sem retorno para a superfície.

Em consequência da deriva da embarcação ocorrerá contato *pipe-in-pipe* no trecho da coluna interno ao poço, afetando assim a curvatura da linha ao longo do seu comprimento, este problema aponta o propósito principal deste estudo de caso que é observar os acréscimos de tensões na parede externa da coluna e os esforços em função do deslocamento aplicado.

### 8.6.1 Modelagem do Estudo de Caso 4

A Figura 8.40 apresenta o esquema do cenário do estudo de caso, neste há uma sonda conectada a uma linha modelada como coluna de trabalho/revestimento de superfície sendo que se aplica um movimento prescrito a sonda para simular o efeito da deriva.

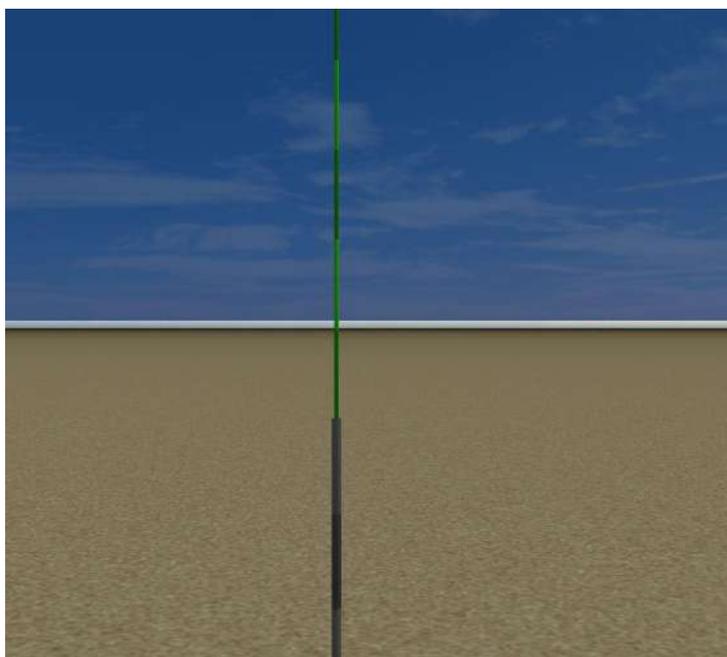
A unidade de perfuração desloca-se 100 m, no intervalo de 1000 segundos, com a coluna de trabalho/revestimento de superfície conectada, observa-se que o contato *pipe-in-pipe* ocorrerá somente no trecho onde a coluna encontra-se dentro do poço. A lâmina d'água é de 1000 m sendo o peso específico da água do mar 10,0389 kN/m<sup>3</sup>.



**Figura 8.40 – Estudo de caso 4**

Neste estudo de caso não são aplicados carregamentos ambientais, os dados da sonda e amortecimento estrutural da coluna podem ser consultados respectivamente nas seções 8.3.2 e 8.3.5.

A coluna de trabalho/revestimento de superfície (Figura 8.24) é modelada por dois segmentos de reta compostos por elementos rígidos, o superior, conectado à sonda representa a coluna de trabalho este trecho da linha possui como característica a tensão de escoamento e conseqüentemente o grau do aço maior que o segmento inferior que é modelado como a coluna do revestimento de superfície.



**Figura 8.41 – Transição na coluna (SITUA/Prosim)**

A Tabela 8.41 apresenta as propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas da coluna de trabalho/revestimento de superfície.

**Tabela 8.41 – Propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas da coluna de trabalho/revestimento de superfície**

<b>Dados da Coluna de Trabalho</b>		
Densidade (kN/m <sup>3</sup> )		77
Módulo de Elasticidade (kN/m <sup>2</sup> )		210x10 <sup>6</sup>
Tensão de Escoamento (kN/m <sup>2</sup> )		700000
Dimensões (m)	Comprimento da seção (m)	1000
	Diâmetro Externo (m)	0,14
	Diâmetro Interno (m)	0,124
	Espessura (m)	0,008
<b>Dados da Coluna do Revestimento de Superfície</b>		
Densidade (kN/m <sup>3</sup> )		77
Módulo de Elasticidade (kN/m <sup>2</sup> )		210x10 <sup>6</sup>
Tensão de Escoamento (kN/m <sup>2</sup> )		551580,5824
Dimensões (m)	Comprimento da seção (m)	1000
	Diâmetro Externo (m)	0,3229
	Diâmetro Interno (m)	0,3397
	Espessura (m)	0,0084
Propriedades Hidrodinâmicas da Coluna	Coefficiente de Arrasto Normal (CDN)	1,2
	Coefficiente de Arrasto Longitudinal (CDL)	0
	Coefficiente de Inércia (CM)	2
	Coefficiente de Massa Adicionada (CA)	0

Similar a estratégia utilizada na seção 8.5.1.3 optou-se por discretizar a malha da coluna de trabalho/revestimento de superfície (Tabela 8.42) em elementos menores nos trechos, próximo a sonda acima da linha d'água e na entrada do poço, visto que também nestas regiões são esperadas as maiores concentrações de esforços.

**Tabela 8.42 – Características da malha da coluna de trabalho/revestimento de superfície**

<b>Dados da Malha</b>		
Número de nós		1005
Tipo de elemento		pórtico
<b>Coluna</b>	<b>Intervalo do Comprimento</b>	<b>Tamanho do Elemento (m)</b>
Trabalho	0 m – 30 m	0,5
	30 m – 1023 m	3
Revestimento	1023 m – 2000 m	0,5 - 3

As propriedades do solo podem ser consultadas na seção 8.5.1.2, diferente do estudo de caso 3 adotou-se uma espessura de 1000 m de argila, subdividida em 10 camadas iguais de 100 m. Os dados para a geração da curva P-y para estes intervalos podem ser consultados no Apêndice B.

O efeito da deformação lateral do solo atua somente ao longo do poço revestido pelo condutor, 100 m, enquanto que o trecho do poço aberto se encontra amortecido pela água do mar. A Tabela 8.43 apresenta as propriedades físicas e geométricas do condutor.

**Tabela 8.43 – Propriedades físicas e geométricas do condutor**

Dados do Condutor		
Densidade (kN/m <sup>3</sup> )		77
Módulo de Elasticidade (kN/m <sup>2</sup> )		210x10 <sup>6</sup>
Tensão de Escoamento (kN/m <sup>2</sup> )		551580,5824
Dimensões (m)	Diâmetro Externo (m)	0,4572
	Diâmetro Interno (m)	0,508
	Espessura (m)	0,0254

A Tabela 8.44 apresenta as características da malha do condutor, optou-se por discretizar em elementos de tamanho 0,5 m todo o intervalo do condutor já que com o deslocamento imposto à sonda espera-se, que o contato *pipe-in-pipe* ocorra ao longo do poço revestido sobretudo na região da entrada do poço.

**Tabela 8.44 – Características da malha do condutor**

Dados da Malha		
Número de nós		201
Tipo de elemento		pórtico
Poço	Intervalo do Comprimento	Tamanho do Elemento (m)
Condutor	0 m – 100 m	0,5

O *offset* é aplicado a sonda por meio de um movimento prescrito. A Figura 8.42 ilustra o deslocamento linear.



**Figura 8.42 – Deslocamento da sonda**

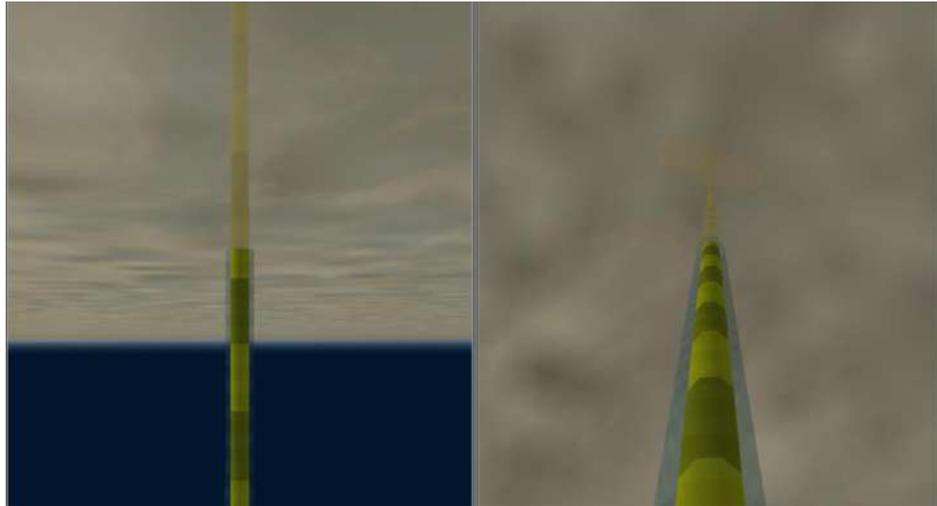
De acordo com a série temporal a velocidade de deslocamento é de 0,1 m/s, onde o objetivo é determinar o *offset* que viola a tensão admissível na parede externa da coluna. A Tabela 8.45 apresenta os parâmetros da análise.

**Tabela 8.45 – Parâmetros da análise**

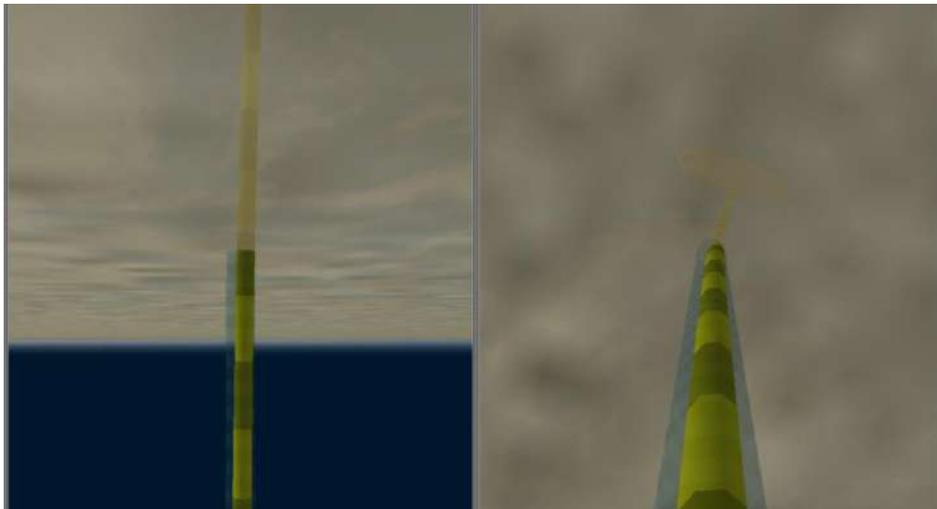
Dados da Análise	
Tempo total (s)	1000
Rampa (s)	100
Intervalo de Integração (s)	0,01

### 8.6.2 Resultados do Estudo de Caso 4

A Figuras 8.43 e 8.44 ilustram a configuração inicial e a configuração final do problema examinado. Percebe-se que com o movimento da sonda a coluna de trabalho/revestimento de superfície colide principalmente com o condutor na região da entrada do poço, afetando assim a sua curvatura.



**Figura 8.43 - Configuração inicial do estudo de caso 4**



**Figura 8.44 – Configuração final do estudo de caso 4**

A análise foi definida a partir da posição da sonda que garante a configuração vertical da coluna sem ação ambiental. Partindo desta posição, a sonda desloca-se por 100 m, no intervalo de 1000 s, a velocidade do deslocamento caracteriza uma deriva lenta, comportamento quase estático.

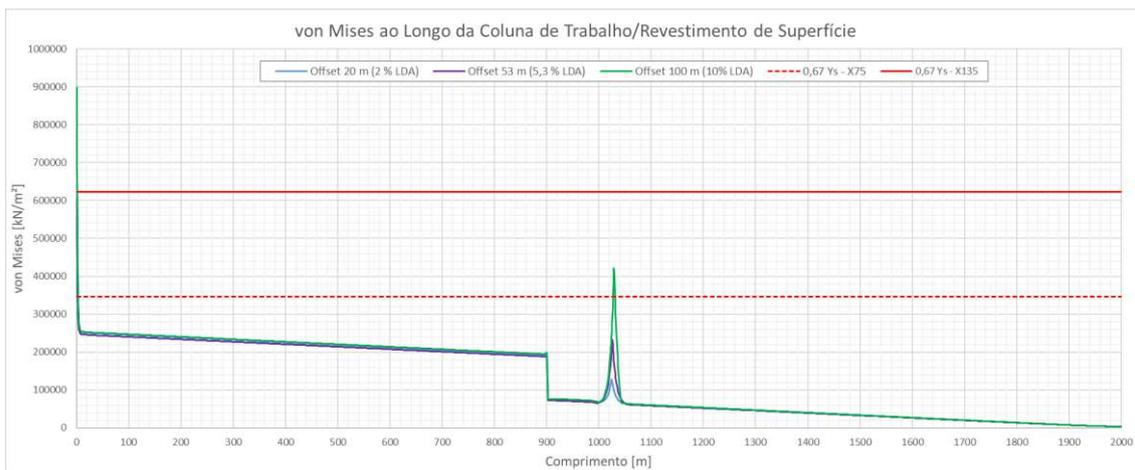
Inicialmente são apresentados os resultados gráficos das tensões de von Mises ao longo do comprimento da coluna de trabalho/revestimento de superfície e ao final o gráfico dos esforços.

O eixo das abscissas representa o comprimento da coluna, o ponto 900 m, marca a transição da coluna de trabalho para a coluna do revestimento, mudança do grau do aço,

observa-se que tanto para a tensão como para a força há uma perceptível alteração no comportamento dos esforços, já o ponto 1025 representa o *mudline*, a partir deste a coluna está interna ao poço, sujeita aos efeitos do contato *pipe-in-pipe*.

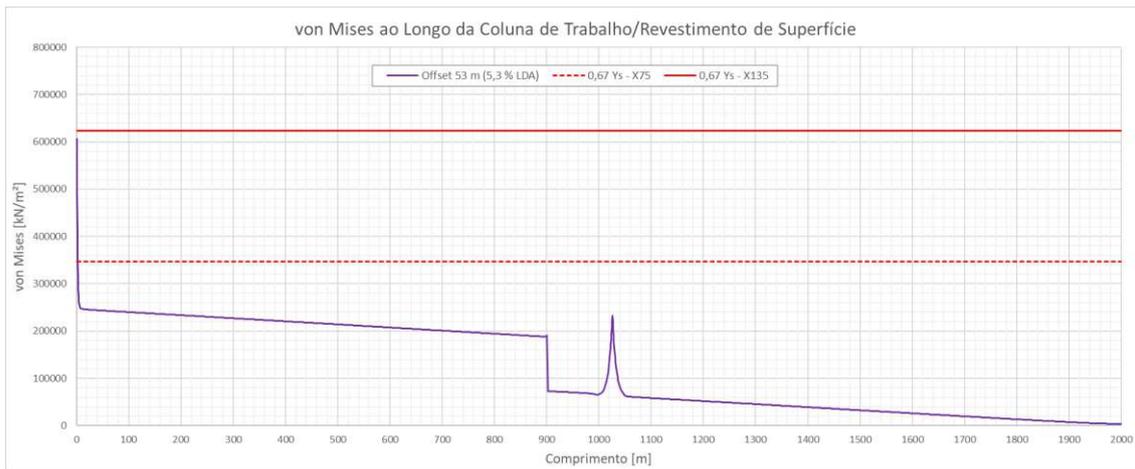
Observando as legendas dos gráficos de von Mises a linha vermelha pontilhada representa o fator de segurança para um grau do aço X-75, análogo, a linha sólida vermelha representa o mesmo fator para um aço de grau X-135, ambos fatores são limitados a 0,67 da tensão de escoamento de cada material.

A Figura 8.45 apresenta o resultado da tensão de von Mises para os *offsets* de 20 m, 53 m e 100m, conforme observado os maiores valores de tensão foram reportados no topo da coluna, indicando que a condição de contorno engastada no topo, está sendo a principal responsável pelas tensões excessivas na coluna e, conseqüentemente, pelas restrições do passeio da sonda.



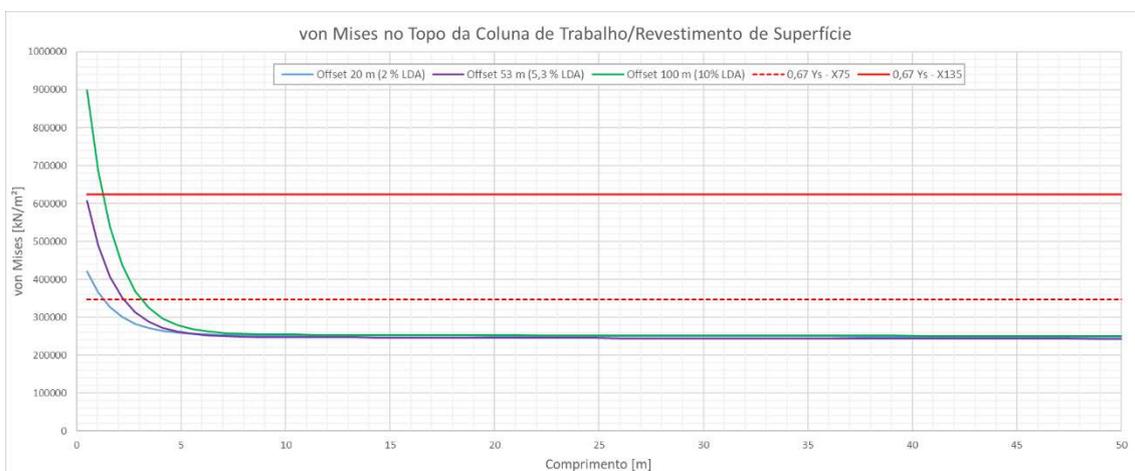
**Figura 8.45 - Tensões de von Mises ao longo da coluna de trabalho/revestimento de superfície**

Os resultados da simulação (Figura 8.46) estabeleceram que o *offset* crítico foi de 53 m, ou seja, quando a sonda ultrapassar os 53 m a tensão de von Mises no topo da coluna de trabalho viola o fator de segurança admissível.



**Figura 8.46 – Tensão de von Mises ao longo da coluna de trabalho/revestimento de superfície (offset 53 m)**

A Figura 8.47 apresenta novamente o resultado das tensões de von Mises para os mesmos *offsets*, destacando os primeiros 50 m de comprimento, este trecho corresponde a parte superior da coluna de trabalho, grau do aço X-135, e o ponto 25 m corresponde a superfície da lâmina d’água, a partir deste a coluna encontra-se submersa.



**Figura 8.47 - Tensões de von Mises (topo da coluna de trabalho/revestimento)**

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 8.46 o valor da tensão de von Mises máxima admissível foi de 606000 kN/m<sup>2</sup> para um *offset* limite de 53 m.

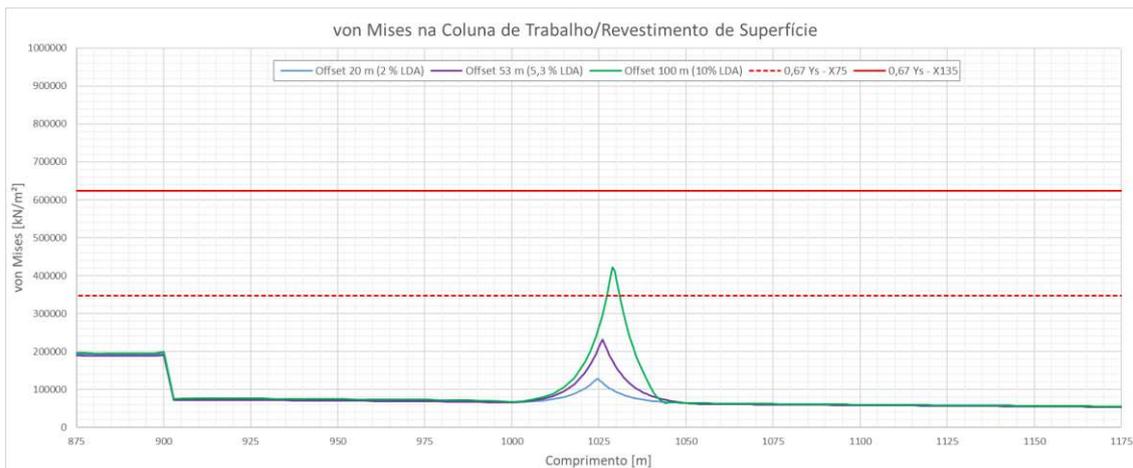
**Tabela 8.46 – Tensões de von Mises (topo da coluna de trabalho)**

Tensões de von Mises (topo da coluna de trabalho)	
Deriva	Von Mises
Offset 20 m	421000 kN/m <sup>2</sup>
Offset 53 m	606000 kN/m <sup>2</sup>
Offset 100 m	899000 kN/m <sup>2</sup>

Importante ressaltar que de acordo com os resultados da análise, nestas condições a coluna, no topo, não se romperia visto que a tensão máxima reportada foi de aproximadamente 0,67 da tensão de escoamento do material, entretanto, de acordo com a norma API 16Q [4] este ponto indica o limite operacional exigido pelos padrões de segurança estabelecidos.

De outro ponto de vista a Figura 8.48, apresenta os resultados da tensão de von Mises na região próxima ao *mudline*, entrada do poço, observou-se que nesta região as curvaturas da coluna tendem a crescer em função do deslocamento da sonda e do contato *pipe-in-pipe* entre a coluna e o poço.

A tensão máxima atingida na região próxima ao *mudline* com o *offset* de 53 m foi de 232000 kN/m<sup>2</sup> (Tabela 8.47). Observe que para este deslocamento na região próxima ao *mudline* a coluna do revestimento não ultrapassa o fator de segurança correspondente ao grau do aço X-75, entretanto, o limite operacional desta análise é estabelecido pelo segmento superior conectado à sonda.

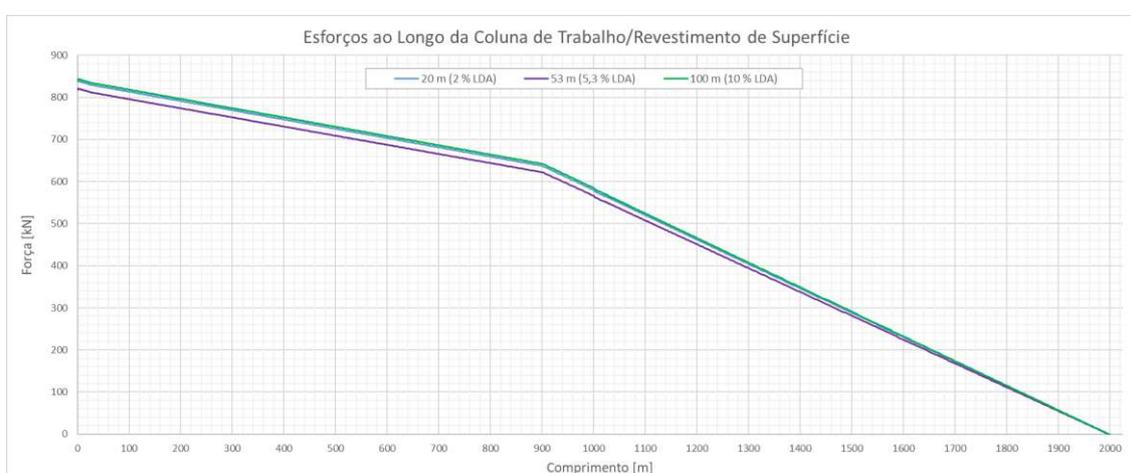


**Figura 8.48 - Tensões de von Mises na coluna de trabalho/revestimento (*mudline*)**

**Tabela 8.47 – Tensões de von Mises (*mudline*)**

Tensões de von Mises ( <i>mudline</i> )	
Deriva	Von Mises
Offset 20 m	126000 kN/m <sup>2</sup>
Offset 53 m	232000 kN/m <sup>2</sup>
Offset 100 m	412000 kN/m <sup>2</sup>

Podemos observar na Figura 8.49 que durante o movimento prescrito imposto a sonda a coluna não sofre esforços de compressão este comportamento era esperado visto que não há ação de carregamentos ambientais, sobretudo em função da ausência do movimento de *heave* que atua na direção vertical da estrutura, não menos importante as condições de contorno, estão livres, na base da coluna.



**Figura 8.49 – Esforços ao longo da coluna de trabalho/revestimento de superfície**

A Tabela 8.48 apresenta os valores das forças, topo e na base da coluna, para os *offsets* de 20 m, 53 m e 100 m.

**Tabela 8.48 – Força ao longo da coluna de trabalho/revestimento de superfície**

Força (kN)		
Deriva	Topo	Base
Offset 20 m	838 kN	2,10 kN
Offset 53 m	819 kN	1,99 kN
Offset 100 m	841 kN	2,14 kN

### 8.6.3 Custo Computacional

A Figura 8.50 apresenta os dados do tempo total e uso de memória utilizado na execução da análise do estudo de caso 4.

Apesar da coluna de trabalho/revestimento de superfície apresentar 2000 m de comprimento, o contato *pipe-in-pipe* é reportado somente em um trecho de 100 m, intervalo ao longo do condutor, note que este trecho é discretizados com elementos de tamanho de 0,5 metros o que requer um maior número de verificações de elementos candidatos ao contato, sendo assim o tempo de simulação foi de 2 horas e 1 minuto.

***** EXECUTION SUMMARY AND STATISTICS *****		Estudo de caso 4 - Deriva
END OF DATA INPUT	: 19/03/20 18:50:47 ;	0.15 SECONDS ELAPSED
END OF DYNAMIC SIMULATION	: 19/03/20 20:52:47 ;	7319.41 SECONDS ELAPSED
TOTAL RUN TIME	: 19/03/20 20:52:47 ;	7319.56 SECONDS ELAPSED
		121 MINUTES, 59 SECONDS
		2 HOURS 1 MINUTES, 59 SECONDS
USED MEMORY	:	5793513 4-byte words

**Figura 8.50 - Custo computacional (estudo de caso 4)**

De acordo com os resultados apresentados nesta seção, demonstrou-se que a sonda pode derivar por no máximo 53 m sem violar o fator de segurança da coluna de trabalho/revestimento de superfície.

A seguir são apresentadas as conclusões finais e as sugestões para os trabalhos futuros.

## 9 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma abordagem computacional para a identificação de problemas de contato do tipo *pipe-in-pipe* entre corpos deformáveis, a busca e identificação de possíveis regiões de contato é realizada por meio de um algoritmo baseado na técnica de *bounding box*.

Importante ressaltar que a implementação do algoritmo não foi posta em prática pelo autor deste estudo, coube ao mesmo fazer uso desta ferramenta disponível no SITUA/Prosim, entretanto, cabe o relato de que esta é a primeira dissertação que utilizou este recurso para investigar problemas de contato em estruturas que apresentam a geometria *pipe-in-pipe*.

Com base na literatura referenciada, catálogos de equipamentos e nas normas técnicas consultadas foram descritos os conceitos fundamentais de um sistema de *riser* de perfuração e a operação de descida de colunas de revestimento em poços de petróleo, assim como, a metodologia de análise utilizada na modelagem, sendo como fonte de pesquisa principal a literatura clássica consagrada e artigos relevantes que abordam estudos atuais.

Não menos importante a internet mostrou-se uma alternativa muito eficaz como fonte de pesquisa, sobretudo com os recursos de vídeos que reproduzem de forma realista os procedimentos e manobras realizadas pelo interior do *riser* de perfuração.

Os modelos foram configurados no SITUA que integra a interface gráfica com o *solver* de simulação, sendo que a representação do tamanho dos elementos finitos mostrou-se adequada para as análises globais, os dimensionamentos dos modelos foram precedidos de inúmeros teste de refinamento da malha.

O comportamento das análises foi visualizado na forma de animação em 3D, por meio deste recurso disponibilizado pelo SITUA foi possível a identificação contínua da região onde ocorreu o contato *pipe-in-pipe*.

Os resultados das análises estáticas realizadas no estudo de caso 1 validaram a implementação da ferramenta de contato *pipe-in-pipe* disponibilizada pelo software SITUA/Prosim.

O estudo de caso 2, por meio de modelos simplificados, demonstrou a aplicação e a influência da ferramenta de contato *pipe-in-pipe* no comportamento global de uma análise estrutural de geometria *pipe-in-pipe*.

O estudo de caso 3 reproduziu um cenário mais realista de uma operação de perfuração *offshore* em águas ultraprofundas, desta forma demonstrou-se que a metodologia de análise acoplada onde a sonda, o *riser* de perfuração e o solo são analisados de forma conjunta provou-se ser a mais adequada para este caso, onde os esforços de ação e reação ao longo da estrutura foram calculados pela aplicação de uma rigidez de contato, dispensando ao usuário definir previamente escalares para identificar a região de contato, enquanto que a dissipação de energia do contato foi determinada pelo amortecimento de Rayleigh.

Os resultados do estudo de caso 4 demonstraram a aplicação da ferramenta para solucionar problemas de engenharia, por meio da análise foi possível determinar o *offset* crítico para a tensão admissível na parede externa da coluna de trabalho/revestimento de superfície definindo assim limites de segurança em situações que a sonda perde posição e deriva com a coluna conectada.

O custo computacional dos estudos de caso demonstrou que a densidade da malha nas regiões de contato é um fator importante na precisão dos resultados obtidos e na convergência dos modelos, entretanto, estudos de sensibilidade, tais como refinamento de malha, variação de outros parâmetros, podem reduzir o custo computacional e proporcionar resultados satisfatórios.

Quanto ao tempo total de análise nos estudos de caso, observou-se nos modelos que apresentam trechos sujeito ao contato *pipe-in-pipe*, um considerável acréscimo ao tempo total, sendo que quando dobrado o trecho sujeito ao contato o custo quase que dobra, importante ressaltar que o aumento do número de elementos deste trecho, refinamento da malha, também contribuem para o acréscimo ao tempo total. Por outro lado, quando a estrutura se apresenta como uma linha sem geometria *pipe-in-pipe* não foi notado acréscimo substancial ao tempo total de análise.

De acordo com os resultados apresentados, a formulação de contato baseada no método das penalidades e o algoritmo de busca baseado na geometria de volume envoltório *bounding box* provou-se uma formulação apropriada, para a solução de problemas de contato *pipe-in-pipe*.

## 9.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Do ponto de vista da formulação uma sugestão está em melhorar o modelo de contato, por exemplo, considerar o efeito do atrito no contato assim como adicionar uma formulação de contato baseada no método da penetração não linear.

A ferramenta de contato *pipe-in-pipe* do SITUA/Prosim pode ter muitas aplicações no cenário *offshore*, especificamente na perfuração de um poço submarino, alguns exemplos estão descritos na introdução deste trabalho.

Um estudo sugerido envolve a modelagem da junta telescópica como estrutura *pipe-in-pipe* e pela aplicação do contato estudar os esforços de ação e reação provenientes do movimento relativo do deslizamento entre os barriletes externo e interno deste equipamento, posteriormente esta modelagem pode ser uma alternativa frente a metodologia utilizada na modelagem da junta telescópica do estudo de caso 3 (seção 5.3.3).

Na operação de descida da coluna de revestimentos também podem ser executados estudos considerando outros carregamentos ambientais, alteração no aproamento da sonda, assim como características variadas do sistema, estudos com a utilização de uma configuração mais detalhada da coluna de *riser* também podem ser relevantes.

Um momento crítico na operação de descida do revestimento é quando os revestimentos mais pesados ou de grandes extensões da fase do poço encontram-se apoiados na cunha da mesa rotativa a abordagem poderia implicar em uma modelagem mais detalhada da cunha podendo avaliar por exemplo o escorregamento nos mordentes deste equipamento, adicionalmente estes estudos podem definir a condição de contorno mais apropriada para a modelagem da cunha.

Especificamente sobre o estudo de caso 4, onde a aplicação do *pipe-in-pipe* provou-se uma alternativa viável para solucionar problemas de engenharia, uma vez definido o *offset* crítico para a máxima tensão admissível na coluna de trabalho/revestimento, adicionalmente sugere a aplicação de forças ambientais, principalmente onda e perfil de corrente, sendo o objetivo definir um novo *offset* seguro, em que a tensão na parede externa da coluna seja menor que a tensão admissível.

## 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABAQUS CAE. User's Manual. Disponível em < [http://xn--90ajn.xn--p1ai/library/abaqus\\_doc/Documentation/docs/v6.12/pdf\\_books/CAE.pdf](http://xn--90ajn.xn--p1ai/library/abaqus_doc/Documentation/docs/v6.12/pdf_books/CAE.pdf) > Acessado em setembro de 2019.
- [2] AKER SOLUTIONS. Aker Drilling Riser Brazil. Disponível em: < <http://iadc.org/backup/chapters/brazil/Aker.pdf> >. Acessado em setembro de 2019.
- [3] ALCHETRON. The Moonpool Subnautica. Disponível em: < <https://alchetron.com/Moon-pool> >. Acessado em setembro de 2019.
- [4] API RP 16Q: Recommended Practice for Design, Selection, Operation and Maintenance of Marine Drilling Riser Systems. API – American Petroleum Institute, Washington, DC, USA, 2001.
- [5] API RP 2GEO. Geotechnical and Foundation Design Considerations. API – American Petroleum Institute, Washington, DC, USA, 2014.
- [6] API Specification 5CT. Specification for Casing and Tubing. API – American Petroleum Institute, 9th Edition, June 2011.
- [7] AMERICAN BUREAU OF SHIPPING – ABS. Guidance Notes On Drilling Riser Analysis. Houston, USA, 2017.
- [8] ANSYS HELP. Disponível em < <https://ansyshelp.ansys.com/> > Acessado em setembro de 2019.
- [9] ANSYS. Engineering Analysis System. User's Manual. 2016.
- [10] ANSYS. Theory Reference Release 5.6. Edited by Peter Kohnke, Ph. D. Disponível em < <http://research.me.udel.edu/~lwang/teaching/MEx81/ansys56manual.pdf> > Acessado em junho de 2019.
- [11] AZEVEDO, C. T.; ROCHA, L. A. S. Projetos de Poços de Petróleo: geopressões e assentamentos de colunas de revestimentos. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2009.

- [12] BAI, Y.; BAI, Q. Subsea Structural Engineering Handbook. Elsevier, 1 ed., Kidlington, Oxford, United Kingdom, 2010.
- [13] BELYTSCHKO, T.; FISH, J. Um Primeiro Curso em Elementos Finitos. Rio de Janeiro: RH, Editora LTC, 2009. 256 p.
- [14] BELYTSCHKO, T.; YEH, I. S. The Splitting Pinball Method for Contact Impact Problems, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, vol. 105, pp. 375–393, 1993
- [15] BELYTSCHKO, T.; LIN, J. I. A Three-Dimensional Impact-Penetration Algorithm with Erosion, *Computer and Structures*, vol. 25, pp. 95–104, 1987.
- [16] BEM, C.; GERWICK, Jr. Construction of Marine and Offshore Structures. 3. Ed. San Francisco, California, USA, 2007.
- [17] BENSON, D.J.; HALLQUIST, J.O. A Single Surface Contact Algorithm for the Post-Buckling Analysis of Shell Structures, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, vol.78, pp. 141–163, 1990.
- [18] BERG, M.; KREVELD, M. V.; OVERMARS, M.; SCHWARZKOPF, O. Computational Geometry – Algorithms and Applications, Springer, 2000.
- [19] BERGER, E. J. Friction modeling for dynamic system simulation. *Applied Mechanics*, v. 6, n. 55, p. 535-577, 2002.
- [20] BERT, C. W. Material Damping: An Introductory Review of Mathematical Models. Measures and Experimental Techniques. *Journal of Sound*, Oklahoma, v. II, n. 29, p. 129-153, 1973.
- [21] BYROM, T. G. Casing and Liners for Drilling and Completion - Design and Application. Elsevier, 2 ed., Kidlington, Oxford, United Kingdom, 2015.
- [22] BOURGOYNE, Jr. A. T.; MILLHEIM, K. K.; CHENEVERT, M. E.; YOUNG, Jr. F. S. Applied Drilling Engineering. SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS - SPE TEXTBOOK VOL. 2 – Texas, USA, 2016.
- [23] BOWYER, A.; WOODWARK, J. A Programmer's Geometry. Butterworths Limited, Boston, USA, 1983.

- [24] BRAKE, M. R. An Analytical Elastic-Perfectly Plastic Contact Model, *International Journal of Solids and Structures*, 49, pp 3129 – 3141, 2012.
- [25] CAMERON. Drilling Products Overview. Total Rig Package Solutions for you Drilling Needs – Technical Catalogue, 2017.
- [26] CAMPOS, F. C. R. Análise dos Critérios de Estabilidade para Projetos de Plataformas do Tipo Monocoluna. 2008. P. 105 Dissertação (Mestre em Engenharia). Departamento de Engenharia Navan e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2008.
- [27] CHAKRABARTI, S. C. *Handbook of Offshore Engineering*. Ed. Elsevier. 2005.
- [28] CHRISTENSEN, R. M. *Theory of Viscoelasticity, an introduction*. New York: Academic Press, 1971.
- [29] COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, AHA. Amortecimento: classificação e métodos de determinação. Informativo Técnico-Científico ITC04-Amortecimento/ATCP Engenharia Física. São Carlos – Brasil, 2010.
- [30] CORRÊA, F. N. Aplicação de Metodologias Híbridas em Estudos Paramétricos Sobre o Comportamento de Sistemas Offshore. 2003. P. 179 Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.
- [31] DIAS, L. F. S. Estudo Numérico do Fenômeno do Amortecimento em Estruturas Sólidas Submetidas a Carregamentos Impulsivos. 2015. Dissertação – Departamento de Construção e Estruturas. Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.
- [32] DRIL-QUIP. Setting a Global Standard. Rapid-deploy Marine Riser Drilling – Technical Catalogue – Aberdeen, Scotland, United Kingdom, 2014.
- [33] ENCANA. Wellbore Construction. Disponível em: < <https://www.encana.com/sustainability/environment/water/protection/construction.html> >. Acessado em setembro de 2019.

- [34] ENSUS. Advanced Engineering. Artigos Técnicos. Contato não linear. Disponível em: < <http://ensus.com.br/procedimento-convergencia/> >. Acessado em agosto de 2019.
- [35] ERICSON, C. Real-Time Collision Detection. The Morgan Kaufmann Series in Interactive 3D Technology. Ed. Elsevier, Oxford, United Kingdom, 2005.
- [36] FERNÁNDEZ, E. F.; JUNIOR, O. A. P.; PINHO, A. C. Dicionário do Petróleo em Língua Portuguesa: exploração e produção de petróleo e gás uma colaboração Brasil, Portugal e Angola. Rio de Janeiro: Lexikon: PUC-Rio 2009.
- [37] GRUPO PORTAL MARÍTIMO. Plataformas Semissubmersíveis. Disponível em: < <https://www.portalmaritimo.com/2017/03/16/plataformas-semi-submersiveis-semisubs/> >. Acessado em agosto de 2019.
- [38] HIROMI, S, E. Desenvolvimento De Curvas P-Y para Argilas Através do Método dos Elementos Finitos. 2016. P. 139 Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.
- [39] HUANG, F. L. et al. A New Approach to Identification of Structural Damping Ratios. Journal of Sound and Vibration, n. 303, p. 144–153, 2007.
- [40] ISO 11960: 2011. Petroleum and Natural Gas Industries — Steel Pipes for use as Casing or Tubing for Wells. 5. Ed. Switzerland, Geneva, ISO – International Organization for Standardization, 2014.
- [41] ISO 13264-1: 2009. Petroleum and Natural Gas industries – Drilling and Production Equipment – Part 1: Design and Operation of Marine Drilling Riser Equipment. Switzerland, Geneva, ISO – International Organization for Standardization, 2009.
- [42] ISO 13264-2: 2009. Petroleum and Natural Gas Industries – Drilling and Production Equipment – Part 2: Deepwater Drilling Riser Methodologies, Operations and Integrity Technical Report. Switzerland, Geneva, ISO – International Organization for Standardization, 2009.

- [43] JACOB, B. P.; BAHIENSE, R. A.; CORREA, F. N.; JACOVAZZO, B.M. Parallel Implementations of Coupled Formulations for the Analysis of Floating Production Systems, Part I: Coupling Formulations. *Ocean Engineering* 55 206-218, 2012, doi: 10.1016/j.oceaneng.2012.06.019.
- [44] JIANG, L.; ROGERS, J. R. Proportional Material Damping in Finite Element Impact Analysis. *Computer & Structures, New Brunswick*, v. 31, n. 2, p. 235-247, December 1989.
- [45] LI, X. Y.; LAW, S. S. Identification of Structural Damping in Time Domain. *Journal of Sound and Vibration*, n. 328, p. 71–84, 2009.
- [46] LIMA, D, A. Avaliação de Formulações de Análise e Metodologias de Projeto de Sistemas de Ancoragem de Plataformas Offshore Considerando Aspectos do Projeto de Risers. 2011. P. 223 Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.
- [47] LYONS, C. W.; PLISGA, B. S.; LORENZ, M. D. *Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering*, Elsevier, 3 ed., Houston, TX, USA, 2016.
- [48] MAERSKDRILLING. Maersk Venturer Ultra Deepwater Drillship Built 2014. Disponível em: < <https://www.maerskdrilling.com/what-we-do/rigs/drillships/maersk-venturer> >. Acessado em agosto de 2019.
- [49] MAERSKDRILLING. Rigs, Discover one of the Youngest and Most Advanced Fleets in the Industry. Disponível em: < <https://www.maerskdrilling.com/what-we-do/rigs> >. Acessado em agosto de 2019.
- [50] MHWIRTH. Rotary Tables. Disponível em: < <https://mhwirth.com/our-products/drilling-make-and-break-2/rotary-tables/> >. Acessado em setembro de 2019.
- [51] MORAIS, J. M. *Petróleo Em Águas Profundas: uma história tecnológica da PETROBRAS na exploração e produção offshore*. Brasília: Ipea, 2013. 424 p.

- [52] NATIONAL ACADEMY OF ENGINEERING AND NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Macondo Well Deepwater Horizon Blowout: Lessons for Improving Offshore Drilling Safety. Washington, DC, USA, 2012.
- [53] NATURAL GAS - GAS DEVELOPMENT STAGES - Well Casing. < <https://marcelluscoalition.org/marcellus-shale/production-processes/casing-the-well/> > Acessado em novembro de 2019.
- [54] NETO, F, Q. Modelagem de Problemas de Contato-Impacto Empregando Formulações Penalizadas do Método dos Elementos Finitos. 2002. P. 156 Tese (Doutor em Ciências em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.
- [55] OFFSHORE ENGINEER. Testing Subsea BOPs to the Limit. Disponível em: < <https://www.oedigital.com/energy/item/5461-testing-subsea-bops-to-the-limit> >. Acessado em agosto de 2019.
- [56] OIL & GAS FOUNDATION. Flexible Risers with Composites Reduce Weight, Improve Sustainability. Disponível em: < <http://www.cleanoilgasfoundation.org/ge-flexible-risers.html> >. Acessado em agosto de 2019.
- [57] ORBAN, F. Damping of Materials and Members in Structures. 5th International Workshop on Multi-Rate Processes and Hysteresis. Hungary: Journal of Physics. 2011.
- [58] PESTANA, R. G. Análise de Desconexão de Emergência de um Riser de Perfuração em Águas Ultra Profundas. 2013. P. 115 Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.
- [59] PIPELAY. Software Components. Disponível em: < [https://pipelay.fea.solutions/flex\\_joint.htm](https://pipelay.fea.solutions/flex_joint.htm) >. Acessado em fevereiro de 2019.

- [60] MCCRAE, H. Marine Riser Systems and Subsea Blowout Preventers: Unit 5, Lesson 10, Rotary Drilling Series. 1st Edition. The University of Texas at Austin Petroleum Extension Service – Petex, Austin, Texas, USA, 2003
- [61] OIL STATES INDUSTRIES. Drilling & Production Systems. Flexjoint Technology. Technical Catalogue – Arlington, Texas, USA, 2019.
- [62] RAHMAN, S. S.; CHILINGARIAN, G. V. Developments in Petroleum Science, 42 - Casing Design Theory and Practice. Elsevier, 1 ed., Amsterdam, The Netherlands, 1995.
- [63] Rao SINGIRESU, S. Vibrações Mecânica. Editora Pearson, 4ª Edição, São Paulo, 2009.
- [64] RAYLEIGH, L. Theory of Sound. 2ª. ed. New York: Dover Publications, v. I, 1877.
- [65] SANTOS, I. F. Dinâmica de Sistemas Mecânicos. Makron Books, 2001.
- [66] SANTOS, O. L. A. Segurança de Poço na Perfuração. Editora Blucher, 1ª Edição, São Paulo, 2013.
- [67] SEVAN DRILLING LIMITED. Prospectos 2015. Oslo, Noruega, 2015. 248 p.
- [68] SILVA, H. C. A.; CALMETO, C. N. J. Noções de Perfuração e Completação. Petrobras, 2014. 194 p.
- [69] SILVA, D. M. L. Ferramentas Computacionais para Análise e Projeto de Instalação de Dutos Submarinos. 2009. P. 156 Tese (Doutor em Ciências em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.
- [70] SILVA, D. M. L.; CORRÊA, F. N.; JACOB, B. P. A Generalized Contact Model for the Simulation of Complex Offshore Operations, XXVII CILAMCE – Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, September 3-6, Belém, Pará, Brazil, 2006.
- [71] SILVA, D. M. L.; CORRÊA, F. N.; JACOB, B. P. A Generalized Contact Model for Dynamic Analysis of Floating Offshore Systems, 25st OMAE – International

Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, June 4-9, Hamburg, Germany, 2006.

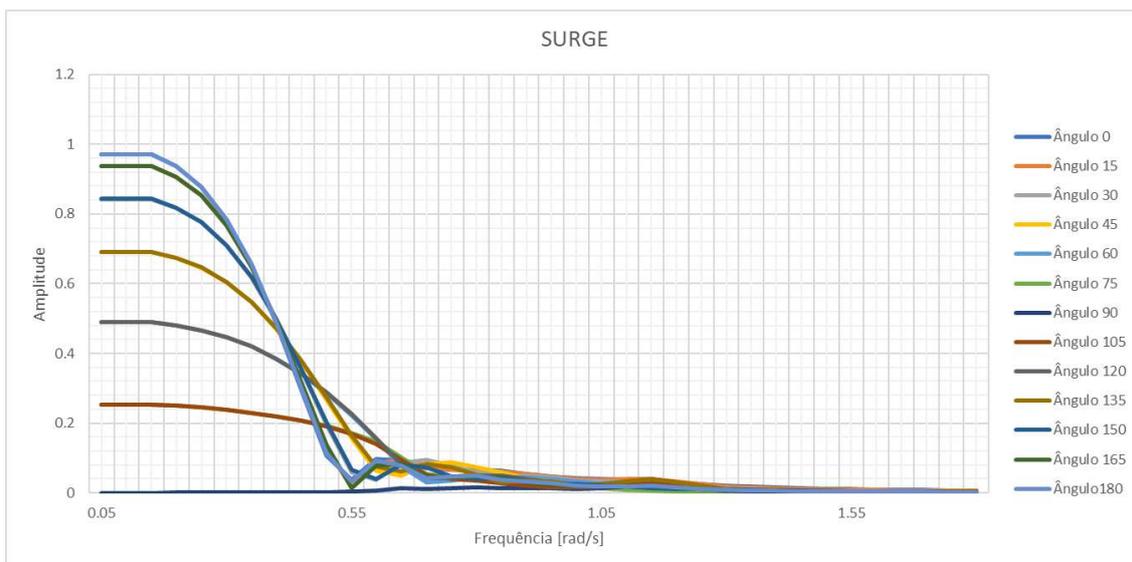
- [72] SILVA, C. E. Implementação Computacional de um Elemento de Casca Triangular para Aplicações em Problemas de Contato-Impacto. Tese (Mestre em Ciências em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- [73] SOLIDWORKS. Disponível em: < [http://help.solidworks.com/2012/Portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/Rayleigh\\_Damping.htm](http://help.solidworks.com/2012/Portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/Rayleigh_Damping.htm) > Acessado em setembro de 2019.
- [74] SPARKS, C. P., Fundamentals of marine riser mechanics: basic principles and simplified analysis, 1 ed., Tulsa, Oklahoma, EUA, 2007.
- [75] THE UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN. Uruguay: First Offshore Well in Years Breaks World Record. Disponível em: < <http://www.jsg.utexas.edu/lacp/2016/04/uruguay-first-offshore-well-in-years-breaks-world-record/> >. Acessado em fevereiro de 2019.
- [76] THOMAS, J. E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Editora Interciência, 2ª Edição, Rio de Janeiro, 2001.
- [77] TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. M. Mecânica dos Sólidos Vol. 1, Editora LTC, 1983.
- [78] TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. M. Mecânica dos Sólidos Vol. 2, Editora LTC, 1984.
- [79] VETCOGRAY. GE Oil & Gas Business. H-4 Subsea Connectors. Technical Catalogue – Houston, Texas, USA, 2018.
- [80] W, He.; SS, Ge.; BE, How.; YS, Choo. Dynamics and Control of Mechanical Systems in Offshore Engineering. Springer-Verlag London, United Kingdom, 2014.
- [81] WRIGGERS, P.; ZAVARISE, G. On Contact Between Three-Dimensional Beams Undergoing Large Deflections, Comm. Numer. Methods Engrg., vol.13, pp. 429-438, 1997.

- [82] YAHOO! ESPORTES. Fifa Insiste Em Que Cabecear A Bola Não Causa Danos Cerebrais. Disponível em: < [https://esportes.yahoo.com/noticias/fifa-insiste-cabecearbolacausadanoscerebrais164409354sow.html?guccounter=1&guce\\_referrer=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2xILmNvbS8&guce\\_referrer\\_sig=AQAAAKiHJgiIpDDviKODTiDVdOkYlaXWaGAV14apW6nW1wvlbOlAY4q\\_Pjc4\\_Z9eQubH4WAAt9uECGSALznprBGvnon5W8XIeZMWqrTr\\_XOXkdqpqOZBWfyJ8LcT3sskAN2GsOXZm3FjpddhJqxQ8huP5Yp8BgAXdCi7JaSf6QZKO](https://esportes.yahoo.com/noticias/fifa-insiste-cabecearbolacausadanoscerebrais164409354sow.html?guccounter=1&guce_referrer=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2xILmNvbS8&guce_referrer_sig=AQAAAKiHJgiIpDDviKODTiDVdOkYlaXWaGAV14apW6nW1wvlbOlAY4q_Pjc4_Z9eQubH4WAAt9uECGSALznprBGvnon5W8XIeZMWqrTr_XOXkdqpqOZBWfyJ8LcT3sskAN2GsOXZm3FjpddhJqxQ8huP5Yp8BgAXdCi7JaSf6QZKO) >. Acessado em janeiro de 2020.
- [83] YOUTUBE. SS Flex Joint 1. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=hM3lPqgulTA> >. Acessado em fevereiro de 2019.
- [84] YOUTUBE. Running Casing. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=3T4nOYH2src> >. Acessado em setembro de 2019.
- [85] YOUTUBE. Casing Running and Cement. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=ZBvau5bQiyA> >. Acessado em setembro de 2019.
- [86] YOUTUBE. Crew Running Casing with Volant Tool 2. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=gilr8lwS15I> >. Acessado em setembro de 2019.
- [87] ZHONG, Z. H.; NILSSON, L. Automatic Contact Searching Algorithm for Dynamic Finite Element Analysis, *Computers & Structures*, vol.52, pp. 187–197, 1994.

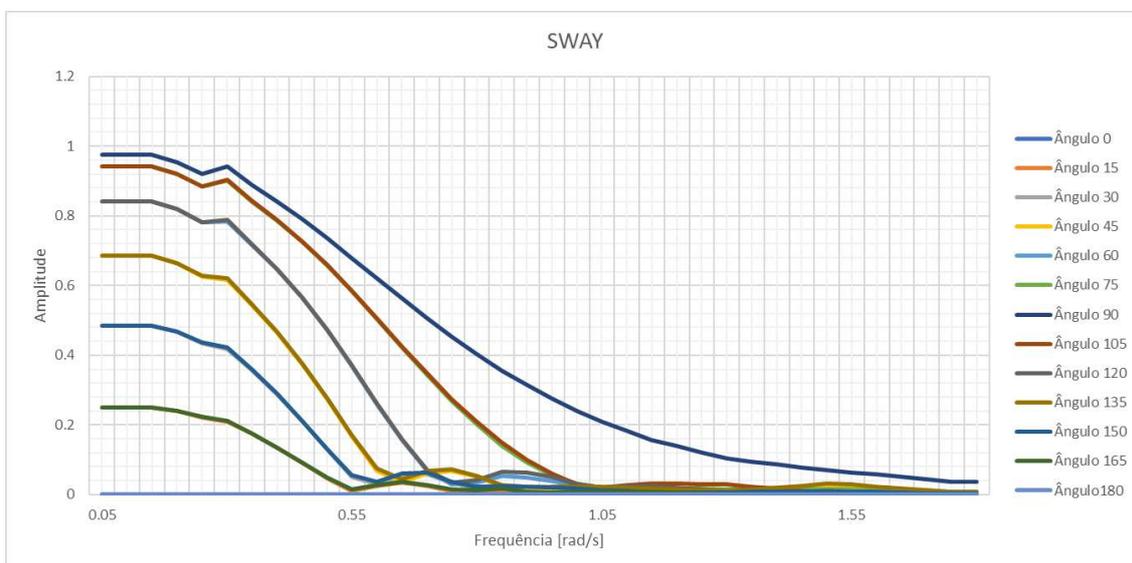
# APÊNDICE A    RAOs DE MOVIMENTOS DA Sonda

## SONDA

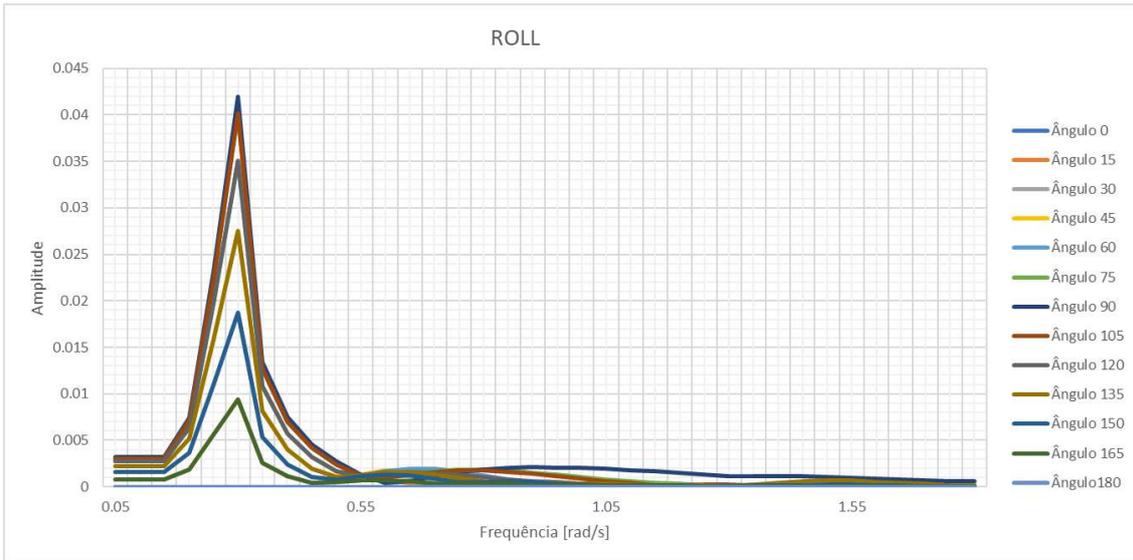
Gráficos de RAO de movimentos da sonda.



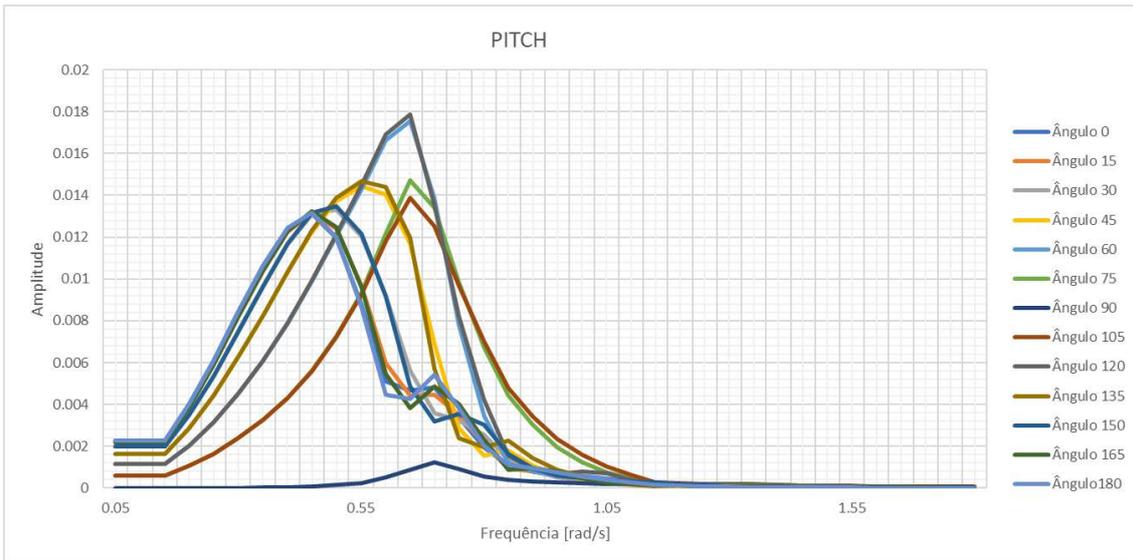
**Figura A.10.1 – RAO de surge**



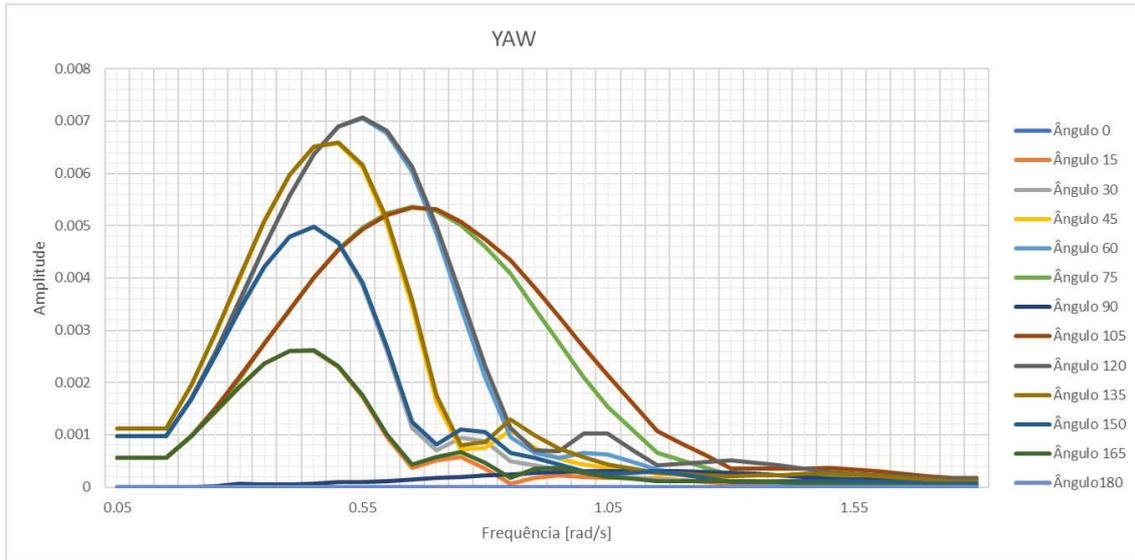
**Figura A.10.2 – RAO de sway**



**Figura A.10.3 – RAO de roll**



**Figura A.10.4 – RAO de pitch**



**Figura A.10.5 – RAO de yaw**

# APÊNDICE B TABELA COM OS DADOS DA CURVA P-Y

Tabelas com os dados das curvas P-y utilizadas nos estudos de caso.

**Tabela 10.1 – Dados da curva P-y, camadas 1 a 4**

Camada 1 (0 – 100 m)		Camada 2 (100 – 200 m)		Camada 3 (200 – 300 m)		Camada 4 (300 – 400 m)	
P (kN/m <sup>2</sup> )	Y (m)	P (kN/m <sup>2</sup> )	Y (m)	P (kN/m <sup>2</sup> )	Y (m)	P (kN/m <sup>2</sup> )	Y (m)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
288.144	0.00133	298.701	0.00133	309.258	0.00133	319.815	0.00133
413.424	0.004	428.571	0.004	443.718	0.004	458.865	0.004
626.4	0.01334	649.35	0.01334	672.3	0.01334	695.25	0.01334
902.016	0.04001	935.064	0.04001	968.112	0.04001	1001.16	0.04001

**Tabela 10.2 – Dados da curva P-y, camadas 5 a 8**

Camada 5 (400 – 500 m)		Camada 6 (500 – 600 m)		Camada 7 (600 – 700 m)		Camada 8 (700 – 800 m)	
P (kN/m <sup>2</sup> )	Y (m)						
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
330.372	0.00133	340.929	0.00133	351.486	0.00133	362.043	0.00133
474.012	0.004	489.159	0.004	504.306	0.004	519.453	0.004
718.2	0.01334	741.15	0.01334	764.1	0.01334	787.05	0.01334
1034.208	0.04001	1067.256	0.04001	1100.304	0.04001	1133.352	0.04001

**Tabela 10.3 – Dados da curva P-y, camadas 9 a 12**

Camada 9 (800 – 900 m)		Camada 10 (900 – 1000 m)		Camada 11 (1000 – 1100 m)		Camada 12 (1100 – 1200 m)	
P (kN/m <sup>2</sup> )	Y (m)	P (kN/m <sup>2</sup> )	Y (m)	P (kN/m <sup>2</sup> )	Y (m)	P (kN/m <sup>2</sup> )	Y (m)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
372.6	0.00133	383.157	0.00133	393.714	0.00133	404.271	0.00133
534.6	0.004	549.747	0.004	564.894	0.004	580.041	0.004
810.0	0.01334	832.95	0.01334	855.9	0.01334	878.85	0.01334
1166.4	0.04001	1199.448	0.04001	1232.496	0.04001	1265.544	0.04001

**Tabela 10.4 – Dados da curva P-y, camadas 13 a 16**

Camada 13 (1200 – 1300 m)		Camada 14 (1300 – 1400 m)		Camada 15 (1400 – 1500 m)		Camada 16 (1500 – 1600 m)	
P (kN/m <sup>2</sup> )	Y (m)						
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
414.828	0.00133	425.385	0.00133	435.942	0.00133	446.499	0.00133
595.188	0.004	610.335	0.004	625.482	0.004	640.629	0.004
901.8	0.01334	924.75	0.01334	947.7	0.01334	970.65	0.01334
1298.592	0.04001	1331.64	0.04001	1364.688	0.04001	1397.736	0.04001

**Tabela 10.5 – Dados da curva P-y, camadas 17 a 20**

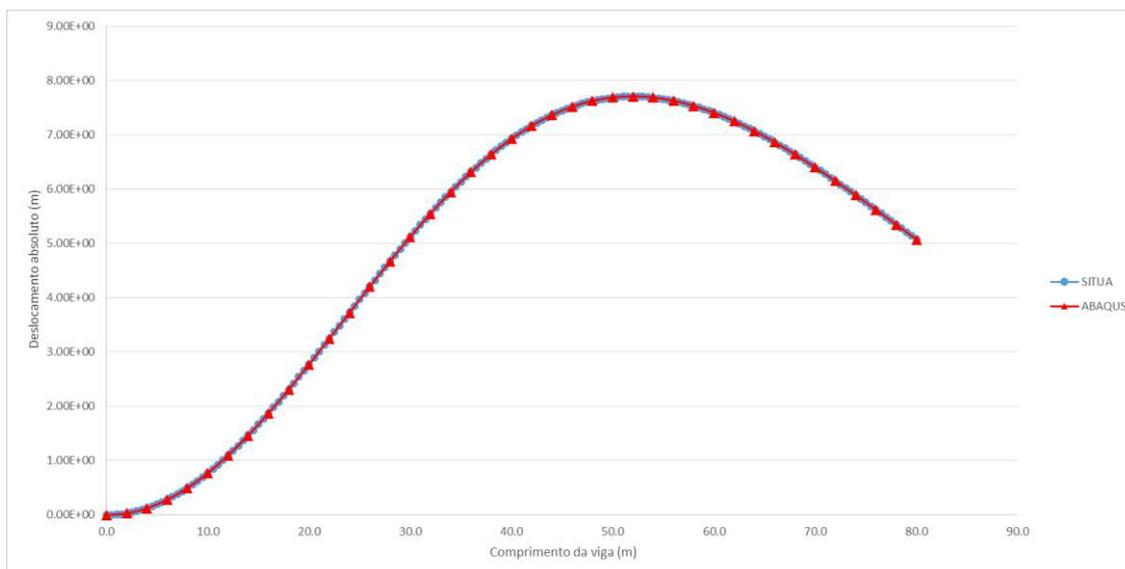
Camada 17 (1600 – 1700 m)		Camada 18 (1700 – 1800 m)		Camada 19 (1800 – 1900 m)		Camada 20 (1900 – 2000 m)	
P (kN/m <sup>2</sup> )	Y (m)						
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
457.056	0.00133	467.613	0.00133	478.17	0.00133	488.727	0.00133
655.776	0.004	670.923	0.004	686.07	0.004	701.217	0.004
993.6	0.01334	1016.55	0.01334	1039.5	0.01334	1062.45	0.01334
1430.784	0.04001	1463.832	0.04001	1496.88	0.04001	1529.928	0.04001

## APÊNDICE C VALIDAÇÃO DA CURVA P-Y

Para fins de validação construiu-se um modelo numérico de uma barra vertical de 80 metros, cravada 40 m no solo e engastada no fundo. A extremidade do topo foi submetida a um deslocamento de 5 m na direção horizontal e um deslocamento de 0.873 m para baixo na direção vertical; considerando rotação livre neste ponto.

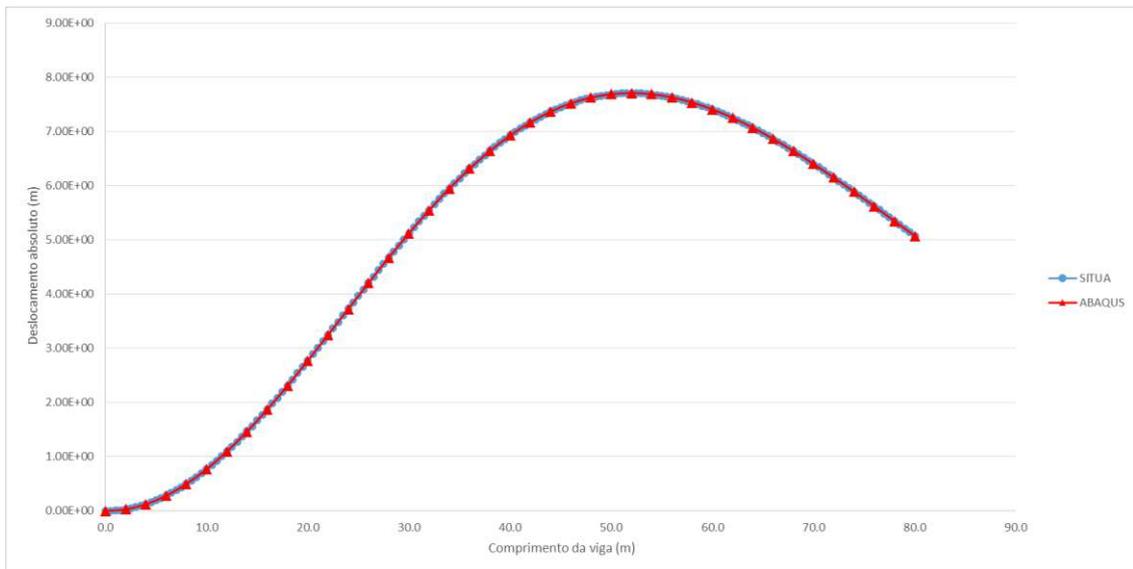
Os resultados do deslocamento horizontal sofrido pela barra reportados pelo programa Abaqus e pelo Prosim são apresentados a seguir.

Na Figura A.10.6 é apresentado o resultado comparativo, observa-se que os resultados são iguais, portanto, conclui-se que a implementação foi realizada com sucesso.



**Figura A.10.6 – Deslocamento horizontal da barra vertical: Abaqus x Prosim**

A Figura A.10.7 apresenta um modelo similar ao anterior, porém o solo foi dividido em duas camadas de 20 m com propriedades físicas distintas. Novamente observa-se que não há diferença entre os resultados do deslocamento horizontal sofrido pela barra reportados pelo programa Abaqus e pelo Prosim.



**Figura A.10.7 – Deslocamento horizontal da barra vertical: Abaqus x Prosim**