



Instituto Alberto Luiz Coimbra de
Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

**AVALIAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE DESCIDA E TRANSPORTE DE
EQUIPAMENTOS PARA PERFURAÇÃO DE POÇOS OFFSHORE PELA COLUNA
DE RISER**

Aline Esperança de Sá 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.

Orientadores: Fabrício Nogueira Corrêa
Bruno Martins Jacovazzo

Rio de Janeiro
Junho de 2019

**AVALIAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE DESCIDA E TRANSPORTE DE
EQUIPAMENTOS PARA PERFURAÇÃO DE POÇOS OFFSHORE PELA COLUNA
DE RISER**

Aline Esperança de Sá Freitas

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

Examinada por:

Prof. Fabrício Nogueira Corrêa, D.Sc.

Prof. Bruno Martins Jacobazzo, D.Sc.

Prof. Breno Pinheiro Jacob, D.Sc.

Prof. Mauro Henrique Alves de Lima Junior, D.Sc.

Eng. Allan Carre de Oliveira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2019

Freitas, Aline Esperança de Sá

Avaliação de Procedimentos de Descida e Transporte
de Equipamentos para Perfuração de Poços Offshore pela
Coluna de Riser / Aline Esperança de Sá Freitas – Rio de
Janeiro: UFRJ/ COPPE, 2019.

XXVII, 228 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Fabrício Nogueira Corrêa

Bruno Martins Jacovazzo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Civil, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 196-199.

1. Instalação de BOP.
 2. Transporte de BOP.
 3. *Offshore*.
 4. Perfuração.
- I. Corrêa, Fabrício Nogueira *et al.*
II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,
Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Aos que deixaram saudade,
vô Vera, vô Jair e tio Poli.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Anderson e Mirieda por sempre me incentivarem a ser o que eu quiser, por me apoiarem da forma que eu precisava em cada momento da minha vida, por me ensinarem que o amor é a razão de tudo, e que com ele sempre vamos encontrar força pra superar todos os obstáculos que surgirem.

Ao meu namorado João Gabriel, por estar ao meu lado durante essa jornada e muitas outras, me apoando da melhor forma possível, crescendo junto comigo e me dando força e motivação pra seguir meu caminho da melhor forma possível.

Às minhas irmãs Lívea, Daniele, Melissa e Camila, e às minhas primas Mariana, Laura, Marina e Priscilla por serem meus exemplos de empoderamento feminino, por me mostrarem todos os dias a força que temos quando estamos unidas e por me darem a certeza de que não importa aonde ou quando, eu sempre vou ter vocês do meu lado.

À minha irmãzinha Maria e aos meus sobrinhos Júlia, Lucca e Fernando por alegrarem todos os dias da minha vida com suas risadas, seu carinho e seu amor incondicional.

Às minhas avós Carmem e Vera por me mostrarem o que é ser uma mulher forte em todos os sentidos, vocês foram e ainda são meu maior exemplo de vida e eu tenho muito orgulho de ser neta de vocês.

Ao meu avô Jair, que carregava alegria nas costas e distribuía de graça pra todos os cantos.

À Lê, aos meus tios Meyre, Poli, Fabrício, Lu, Clóvis, Dé e Ju e aos meus primos Madison e Guilherme pela sensação maravilhosa que sempre foi estar com todos vocês, quando nossa família se reúne eu sinto muita paz, é muito bom poder compartilhar minha vida e minhas vitórias com vocês.

Aos meus sogros Verônica e Eduardo, à Dona Júlia e Seu Zé, e à minha Dinda emprestada Nelcina, que me adotaram e me deram toda ajuda que precisei, principalmente por estar longe de casa.

Aos meus amigos da vida Cissa, Igor, Maria, Bruna, Gabi e Luisa por absolutamente tudo, vocês me ensinaram muito, cada um da sua forma, e vão estar sempre no meu coração.

À Ivete pela amizade e pela confiança, muito obrigada por todas as conversas, todos os “boa noite”, e todos os ensinamentos “da Ivete” que você sempre me passou, você tornou a jornada mais leve e mais divertida.

A todos os meus amigos do Lamcso, especialmente Luiza e Raí por todas as conversas e conselhos sobre todos os aspectos da vida; Alexandra pelo ótimo trabalho em equipe e todos os ensinamentos a respeito de organização que uma professora poderia dar; Rodrigo por todas as brincadeiras bobas com alto nível de maturidade; Elói por toda ajuda com a elaboração deste trabalho, muito obrigada pelo seu tempo; Henri pelo apoio e o tempo me ensinado a crescer em outros aspectos da vida; Jay pela parceria desde o início da minha vida no Lamcso e Thalita pelas gargalhadas no meio do dia.

Aos meus orientadores Fabrício e Bruno Jacobazzo por todo suporte fornecido durante a elaboração deste trabalho.

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

À Universidade Federal do Rio de Janeiro, pela formação e infraestrutura fornecidas.

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.)

**AVALIAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE DESCIDA E TRANSPORTE DE
EQUIPAMENTOS PARA PERFURAÇÃO DE POÇOS OFFSHORE PELA COLUNA
DE RISER**

Aline Esperança de Sá Freitas

Junho/2019

Orientadores: Fabrício Nogueira Corrêa

Bruno Martins Jacovazzo

Programa: Engenharia Civil

Devido à grande demanda de produtos provenientes do petróleo, as produtoras foram levadas a buscar novos reservatórios, explorando zonas offshore com lâminas d'água que chegam a profundidades acima dos 3000 metros. Nessa busca por reservatórios localizados em águas cada vez mais profundas, as operações que envolvem instalação de equipamentos no fundo marinho vêm se tornando cada vez mais críticas e por isso demandam a execução de projetos cada vez mais detalhados com simulações e análises que representem de forma fiel o cenário real. Além disso, algumas operações podem apresentar tempo de execução muito elevado, como por exemplo o transporte destes equipamentos. Este trabalho usa como objeto de estudo o conjunto de equipamentos BOP/LMRP. Esses equipamentos são utilizados na etapa de perfuração de poços, sua função é garantir a segurança do procedimento. Trata-se de equipamentos com grandes dimensões que podem gerar resultados críticos quando instalados ou transportados verticalmente através da coluna de riser, principalmente nas chamadas zonas de ressonância. O objetivo deste trabalho é estudar estes procedimentos e os efeitos que eles causam na coluna de riser conectada aos equipamentos.

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

**EVALUATION OF PROCEDURES FOR DEPLOYMENT AND
TRANSPORTATION OF OFFSHORE DRILLING EQUIPMENT USING THE
RISER COLUMN**

Aline Esperança de Sá Freitas

June/2019

Advisors: Fabrício Nogueira Corrêa
Bruno Martins Jacovazzo

Department: Civil Engineering

Due the large demand of products derived from petroleum, the producers were led to search for new reservoirs, exploring offshore zones with water depths over 3000 meters. With the exploitation on deep waters , the process of the equipment installation on the seabed is becoming a critical factor and therefore requires the execution of very detailed numerical simulations and analysis to represent the real scenario faithfully. Another important factor is the transport of these equipments, that can require a lot of time. To constrain this problems, this dissertation uses the BOP stack as a study object. These equipment are used in drilling of wells procedure to ensure its safety. It has large dimensions and can present critical results during the vertical installations and transport operations using the riser column, especially if they are located in resonance zones. The main objective of this work is to study the mentioned procedure and the effects they cause in the riser connected to the equipment.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Contexto e Motivação.....	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Estruturação do Texto.....	3
2 SISTEMA DE PERFURAÇÃO DE POÇOS.....	4
2.1 Introdução.....	4
2.2 Sondas de Perfuração	5
2.2.1 Plataforma Autoelevatória	6
2.2.2 Plataforma Semi-Submersível.....	7
2.2.3 Navio Sonda.....	8
2.3 <i>Riser</i> de Perfuração.....	9
2.4 Equipamentos de Perfuração	11
2.4.1 Mesa Rotativa	12
2.4.2 <i>Diverter</i>	13
2.4.3 Juntas Flexíveis	13
2.4.4 Cabos de Tracionamento.....	15
2.4.5 Junta Telescópica	16
2.4.6 Linhas de <i>Kill</i> , <i>Choke</i> e Linhas Auxiliares.....	17
2.4.7 LMRP	18
2.4.8 BOP	20
3 MÉTODOS DE INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTOS SUBMARINOS.....	28
3.1 Introdução.....	28
3.2 Método de Instalação via Cabo	28
3.2.1 Com Eslinges, Cabideiro e <i>Spread Bar</i>	30
3.2.2 Com Compensador de <i>Heave</i>	31
3.3 Método Pendular	33
3.4 Método da Roldana.....	35
3.5 Método Y	37

3.6	Método de Alternância de Cabos	38
3.7	Método de Instalação via <i>Riser</i> de Perfuração	39
4	MÉTODOS DE TRANSPORTE DE BOP/LMRP	42
4.1	Introdução.....	42
4.2	Considerações do Método de Transporte com BOP Suspensão	45
4.2.1	Distância a ser percorrida.....	45
4.2.2	Profundidade da cabeça de poço	45
4.2.3	Condições ambientais	45
4.2.4	Estruturas instaladas no percurso do equipamento	46
4.2.5	Batimetria do fundo marinho	46
4.2.6	Propriedades da coluna de <i>riser</i>	46
4.2.7	Design do BOP e do LMRP	46
4.3	Recomendações Práticas e Protocolos para o Transporte do BOP/LMRP Suspensão	47
5	METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS PROCESSOS ESTUDADOS.....	49
5.1	Introdução.....	49
5.2	Metodologia de Estudo.....	49
5.3	Software SITUA/Prosim	50
5.4	Cálculo Preliminar das Profundidades Críticas	51
5.5	Identificação dos RAOs de Movimento	56
5.6	Critérios para a Verificação do Processo de Instalação e Transporte do BOP/LMRP	57
5.6.1	Tensão Máxima Atuante no <i>Riser</i>	58
5.6.2	Verificação de Compressão na Coluna de <i>Riser</i>	59
5.6.3	Ângulo Máximo da <i>Lower Flex Joint</i>	59
5.6.4	Deslocamento do BOP/LMRP	59
5.6.5	Limitações Operacionais no Processo de Transporte do BOP/LMRP	60
5.7	Construção do Modelo de Instalação do BOP/LMRP	60
5.8	Construção do Modelo de Transporte do BOP/LMRP	64

6 ESTUDO DE CASO	67
6.1 Dados dos Componentes do Sistema de Perfuração.....	67
6.1.1 Sonda de Perfuração.....	67
6.1.2 <i>Riser</i> de Perfuração	68
6.1.3 BOP/LMRP	71
6.2 Profundidades Estudadas na Instalação dos Equipamentos	76
6.3 Comprimento do <i>Riser</i> para Transporte do BOP	77
6.4 Casos de Carregamento	78
6.4.1 Procedimento de Instalação do BOP/LMRP.....	78
6.4.2 Procedimento de Transporte do BOP/LMRP.....	80
6.5 Velocidade da Sonda no Procedimento de Transporte dos Equipamentos	83
7 RESULTADOS DO PROCESSO DE INSTALAÇÃO DO BOP	85
7.1 Considerações Iniciais	85
7.2 Conjunto de Equipamentos 1.....	86
7.2.1 Resultados de Tensão por Estado de Mar em cada Profundidade	86
7.2.2 Resultados de Deslocamento Vertical dos Equipamentos	114
7.2.3 Resultados de Ângulo Máximo da <i>Lower Flex Joint</i>	128
7.3 Conjunto de Equipamentos 2.....	129
7.3.1 Resultados de Tensão por Estado de Mar em cada Profundidade	129
7.3.2 Resultados de Deslocamento Vertical dos Equipamentos	157
7.3.3 Resultados de Ângulo Máximo da <i>Lower Flex Joint</i>	171
8 RESULTADOS DO PROCESSO DE TRANSPORTE DO BOP.....	172
8.1 Considerações Iniciais	172
8.2 Transporte com Profundidade de 1000m	172
8.2.1 Tensão Máxima no <i>Riser</i>	172
8.2.2 Momento Fletor Máximo no <i>Riser</i>	176
8.2.3 Ângulo Máximo da <i>Lower Flex Joint</i>	178
8.3 Transporte com Profundidade de 1500m	179
8.3.1 Tensão Máxima atuante no <i>Riser</i>	179
8.3.2 Momento Fletor Máximo no <i>Riser</i>	182
8.3.3 Ângulo Máximo da <i>Lower Flex Joint</i>	184

8.4	Transporte com Profundidade de 3000m	185
8.4.1	Tensão Máxima atuante no <i>Riser</i>	185
8.4.2	Momento Fletor Máximo no <i>Riser</i>	188
8.4.3	Ângulo Máximo da <i>Lower Flex Joint</i>	190
9	CONCLUSÕES	191
9.1	Considerações Finais	191
9.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	194
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	196
APÊNDICE A - SÉRIES DE MOVIMENTO DO BOP/LMRP		200
A.1	Conjunto de Equipamentos 1.....	200
A.2	Conjunto de Equipamentos 2.....	207
APÊNDICE B - AMPLITUDES DE <i>HEAVE</i> POR PROFUNDIDADE		215
B.1	Conjunto de Equipamentos 1.....	215
B.2	Conjunto de Equipamentos 2.....	216
APÊNDICE C - ENVOLTÓRIAS DE MOMENTOS FLETORES.....		218
C.1	Profundidade 1000m	218
C.2	Profundidade 1500m	222
C.3	Profundidade 3000m	225

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Perfil de um poço perfurado, exibindo as diversas camadas de revestimento [1]	5
Figura 2.2 – Diferentes tipos de sonda de perfuração	6
Figura 2.3 - Plataforma Autoelevatória [2]	7
Figura 2.4 - Plataforma Semi-submersível [2].....	8
Figura 2.5 - Navio Sonda [2]	9
Figura 2.6 – Seção de <i>riser</i> de perfuração [5].....	10
Figura 2.7 – Esquematização de dois tipos de <i>riser</i> de perfuração [6]	10
Figura 2.8 – Esquema do sistema de perfuração convencional em uma semi-submersível [8].....	12
Figura 2.9 – Mesa Rotativa [9]	13
Figura 2.10 – <i>Diverter</i> [13]	13
Figura 2.11 – <i>Flex Joint</i> [14].....	14
Figura 2.12 – <i>Ball Joint</i> [15]	15
Figura 2.13 – Sistema de Tracionadores [16]	16
Figura 2.14 – <i>Telescopic Joint</i> [17].....	17
Figura 2.15 – Seção de <i>riser</i> de perfuração [19].....	18
Figura 2.16 – Desenho esquemático do conjunto BOP/LMRP [20].....	19
Figura 2.17 – <i>Lower Marine Riser Package</i> (LMRP) [21].....	20
Figura 2.18 – <i>Blowout Preventer</i> (BOP) [21]	21
Figura 2.19 – Arranjo típico de um BOP [1]	22
Figura 2.20 – Preventor anular do BOP [17,22]	23
Figura 2.21 – BOP com gavetas de tubo [17,22]	24
Figura 2.22 – Tendência de crescimento do conjunto BOP/LMRP [25]	25
Figura 3.1 – Método de instalação via cabo [2]	29
Figura 3.2 - Embarcação de instalação de equipamentos pelo método vertical via cabo com a utilização de A-frame. [26].....	29
Figura 3.3 – Embarcação de instalação de equipamentos pelo método vertical via cabo com a utilização de guindaste. [26].....	30

Figura 3.4 – Embarcação de instalação de equipamentos pelo método vertical via cabo com a utilização de torre de instalação. [26]	30
Figura 3.5 – Instalação utilizando cabideiro, eslingas e <i>spread bar</i> [26]	31
Figura 3.6 – Sistema passivo de compensadores de <i>heave</i> [30]	32
Figura 3.7 – Sistema ativo de compensadores de <i>heave</i> [30]	33
Figura 3.8 – Instalação pelo método pendular [27].....	34
Figura 3.9 – Desenho esquemático representando o método da roldana [27]	35
Figura 3.10 – Manifold sendo instalado pelo método da roldana [27]	36
Figura 3.11 – Método Y [34]	37
Figura 3.12 – Método de instalação de alternância de cabos [28]	38
Figura 3.13 - Representação do processo de instalação de um BOP utilizando o método vertical via <i>riser</i> de perfuração [2].....	40
Figura 3.14 – Instalação de manifold utilizando <i>riser</i> de perfuração [27].....	40
Figura 4.1 – Tempo de descida e recolhimento do BOP em função da profundidade de instalação [36]	43
Figura 4.2 – Representação do processo de transporte de um BOP submerso [37].....	44
Figura 5.1 – Representação do sistema de lançamento de BOP/LMRP por um sistema massa-mola.....	51
Figura 5.2 – Períodos naturais para sistemas de instalação de BOPs com diferentes profundidades e espectros de Jonswap para diferentes Tps	53
Figura 5.3 – RAOs de <i>heave</i> da sonda de perfuração para incidência de onda de 0°	56
Figura 5.4 - RAOs de <i>heave</i> da sonda de perfuração para incidência de onda de 30° ...	57
Figura 5.5 – Modelo no software SITUA da embarcação de lançamento utilizada no estudo de caso	61
Figura 5.6 - Modelo no software SITUA do conjunto de equipamentos utilizado no estudo de caso	62
Figura 5.7 – Modelo no software SITUA do sistema de instalação e transporte do BOP/LMRP	64
Figura 6.1 – Sistema de coordenadas utilizado para a definição dos dados da sonda de perfuração.....	67
Figura 6.2 – Desenho representativo dos trechos da coluna de <i>riser</i> com diferentes materiais	71
Figura 6.3 – Sistema de coordenadas utilizado para a definição dos dados do BOP e do LMRP	72

Figura 6.4 – (a) Modelo no software SITUA do conjunto 1 (b) Modelo no software SITUA do conjunto 2	76
Figura 6.5 – Forças atuantes em uma sonda de perfuração durante o transporte do BOP/LMRP suspenso [38].....	80
Figura 6.6 – Perfil de corrente utilizado no estudo de transporte do BOP/LMRP para a profundidade de 1000 metros.....	82
Figura 6.7 – Perfil de corrente utilizado no estudo de transporte do BOP/LMRP para a profundidade de 1500 metros.....	82
Figura 6.8 – Perfil de corrente utilizado no estudo de transporte do BOP/LMRP para a profundidade de 3000 metros.....	83
Figura 7.1 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1000m e incidência de onda de 0°	87
Figura 7.2 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1000m e incidência de onda de 30°	87
Figura 7.3 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1000m e incidência de onda de 0°	88
Figura 7.4 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1000m e incidência de onda de 30°	88
Figura 7.5 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1500m e incidência de onda de 0°	91
Figura 7.6 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1500m e incidência de onda de 30°	91
Figura 7.7 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1500m e incidência de onda de 0°	92
Figura 7.8 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1500m e incidência de onda de 30°	92
Figura 7.9 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2000m e incidência de onda de 0°	95
Figura 7.10 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2000m e incidência de onda de 30°	95
Figura 7.11 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2000m e incidência de onda de 0°	96
Figura 7.12 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2000m e incidência de onda de 30°	96
Figura 7.13 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2500m e incidência de onda de 0°	99

Figura 7.14 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2500m e incidência de onda de 30°	99
Figura 7.15 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2500m e incidência de onda de 0°	100
Figura 7.16 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2500m e incidência de onda de 30°	100
Figura 7.17 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3000m e incidência de onda de 0°	103
Figura 7.18 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3000m e incidência de onda de 30°	103
Figura 7.19 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3000m e incidência de onda de 0°	104
Figura 7.20 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3000m e incidência de onda de 30°	104
Figura 7.21 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3500m e incidência de onda de 0°	107
Figura 7.22 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3500m e incidência de onda de 30°	107
Figura 7.23 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3500m e incidência de onda de 0°	108
Figura 7.24 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3500m e incidência de onda de 30°	108
Figura 7.25 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 4000m e incidência de onda de 0°	111
Figura 7.26 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 4000m e incidência de onda de 30°	111
Figura 7.27 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 4000m e incidência de onda de 0°	112
Figura 7.28 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 4000m e incidência de onda de 30°	112
Figura 7.29 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 1 com profundidade de 1000m e incidência de 0°	115
Figura 7.30 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 1 com profundidade de 1000m e incidência de 30°	115
Figura 7.31 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 1 com profundidade de 1500m e incidência de 0°	117

Figura 7.32 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 1 com profundidade de 1500m e incidência de 30°	117
Figura 7.33 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 1 com profundidade de 2000m e incidência de 0°	119
Figura 7.34 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 1 com profundidade de 2000m e incidência de 30°	119
Figura 7.35 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 1 com profundidade de 2500m e incidência de 0°	121
Figura 7.36 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 1 com profundidade de 2500m e incidência de 30°	121
Figura 7.37 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 1 com profundidade de 3000m e incidência de 0°	123
Figura 7.38 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 1 com profundidade de 3000m e incidência de 30°	123
Figura 7.39 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 1 com profundidade de 3500m e incidência de 0°	125
Figura 7.40 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 1 com profundidade de 3500m e incidência de 30°	125
Figura 7.41 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 1 com profundidade de 4000m e incidência de 0°	127
Figura 7.42 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 1 com profundidade de 4000m e incidência de 30°	127
Figura 7.43 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1000m e incidência de onda de 0°	130
Figura 7.44 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1000m e incidência de onda de 30°	130
Figura 7.45 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1000m e incidência de onda de 0°	131
Figura 7.46 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1000m e incidência de onda de 30°	131
Figura 7.47 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1500m e incidência de onda de 0°	134
Figura 7.48 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1500m e incidência de onda de 30°	134
Figura 7.49 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1500m e incidência de onda de 0°	135

Figura 7.50 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1500m e incidência de onda de 30°	135
Figura 7.51 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2000m e incidência de onda de 0°	138
Figura 7.52 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2000m e incidência de onda de 30°	138
Figura 7.53 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2000m e incidência de onda de 0°	139
Figura 7.54 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2000m e incidência de onda de 30°	139
Figura 7.55 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2500m e incidência de onda de 0°	142
Figura 7.56 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2500m e incidência de onda de 30°	142
Figura 7.57 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2500m e incidência de onda de 0°	143
Figura 7.58 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2500m e incidência de onda de 30°	143
Figura 7.59 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3000m e incidência de onda de 0°	146
Figura 7.60 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3000m e incidência de onda de 30°	146
Figura 7.61 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3000m e incidência de onda de 0°	147
Figura 7.62 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3000m e incidência de onda de 30°	147
Figura 7.63 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3500m e incidência de onda de 0°	150
Figura 7.64 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3500m e incidência de onda de 30°	150
Figura 7.65 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3500m e incidência de onda de 0°	151
Figura 7.66 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3500m e incidência de onda de 30°	151
Figura 7.67 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 4000m e incidência de onda de 0°	154

Figura 7.68 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 4000m e incidência de onda de 30°	154
Figura 7.69 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 4000m e incidência de onda de 0°	155
Figura 7.70 – Amplitude de tensão na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 4000m e incidência de onda de 30°	155
Figura 7.71 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 2 com profundidade de 1000m e incidência de 0°	158
Figura 7.72 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 2 com profundidade de 1000m e incidência de 30°	158
Figura 7.73 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 2 com profundidade de 1500m e incidência de 0°	160
Figura 7.74 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 2 com profundidade de 1500m e incidência de 30°	160
Figura 7.75 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 2 com profundidade de 2000m e incidência de 0°	162
Figura 7.76 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 2 com profundidade de 2000m e incidência de 30°	162
Figura 7.77 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 2 com profundidade de 2500m e incidência de 0°	164
Figura 7.78 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 2 com profundidade de 2500m e incidência de 30°	164
Figura 7.79 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 2 com profundidade de 3000m e incidência de 0°	166
Figura 7.80 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 2 com profundidade de 3000m e incidência de 30°	166
Figura 7.81 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 2 com profundidade de 3500m e incidência de 0°	168
Figura 7.82 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 2 com profundidade de 3500m e incidência de 30°	168
Figura 7.83 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 2 com profundidade de 4000m e incidência de 0°	170
Figura 7.84 – Amplitude máxima de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto 2 com profundidade de 4000m e incidência de 30°	170
Figura 8.1 – Tensão máxima em cada período dos casos de estudo com profundidade de 1000 metros e Hs 3m	174

Figura 8.2 – Tensão máxima em cada período dos casos de estudo com profundidade de 1000 metros e Hs 3m	174
Figura 8.3 – Comparação da tensão máxima e do limite normativo para os casos de transporte à profundidade de 1000 metros e Hs 2m.....	175
Figura 8.4 - Comparação da tensão máxima e do limite normativo para os casos de transporte à profundidade de 1000 metros e Hs 3m.....	175
Figura 8.5 – Momento fletor máximo a profundidade de 1000 metros e velocidade variando entre 1.0m/s e 1.5m/s	176
Figura 8.6 – Momento fletor máximo em cada período dos estudos de caso de transporte com profundidade de 1000 metros e Hs 2m.....	177
Figura 8.7 - Momento fletor máximo em cada período dos estudos de caso de transporte com profundidade de 1000 metros e Hs 3m	177
Figura 8.8 – Tensão máxima em cada período dos casos de estudo com profundidade de 1500 metros e Hs 2m	180
Figura 8.9 – Tensão máxima em cada período dos casos de estudo com profundidade de 1500 metros e Hs 3m	180
Figura 8.10 – Comparação da tensão máxima e do limite normativo para os casos de transporte à profundidade de 1500 metros e Hs 2m.....	181
Figura 8.11 - Comparação da tensão máxima e do limite normativo para os casos de transporte à profundidade de 1500 metros e Hs 3m.....	181
Figura 8.12 – Momento fletor máximo a profundidade de 1500 metros e velocidade variando entre 1.0m/s e 1.5m/s	182
Figura 8.13 – Momento fletor máximo em cada período dos estudos de caso de transporte com profundidade de 1500 metros e Hs 2 m.....	183
Figura 8.14 - Momento fletor máximo em cada período dos estudos de caso de transporte com profundidade de 1500 metros e Hs 3m.....	183
Figura 8.15 – Tensão máxima em cada período dos casos de estudo com profundidade de 3000 metros e Hs 2m.....	186
Figura 8.16 – Tensão máxima em cada período dos casos de estudo com profundidade de 3000 metros e Hs 3m.....	186
Figura 8.17 – Comparação da tensão máxima e do limite normativo para os casos de transporte à profundidade de 3000 metros e Hs 2m.....	187
Figura 8.18 - Comparação da tensão máxima e do limite normativo para os casos de transporte à profundidade de 3000 metros e Hs 3m.....	187
Figura 8.19 – Momento fletor máximo a profundidade de 3000 metros e velocidade variando entre 1.0m/s e 1.5m/s	188

Figura 8.20 – Momento fletor máximo em cada período dos estudos de caso de transporte com profundidade de 3000 metros e Hs 2 m.....	189
Figura 8.21 - Momento fletor máximo em cada período dos estudos de caso de transporte com profundidade de 3000 metros e Hs 3m.....	189
Figura A.10.1 – Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 1 com prof. de 1000 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s	200
Figura A.10.2 - Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 1 com prof. de 1000 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s	201
Figura A.10.3 – Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 1 com prof. de 1500 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s	201
Figura A.10.4 - Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 1 com prof. de 1500 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s	202
Figura A.10.5 – Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 1 com prof. de 2000 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s	202
Figura A.10.6 - Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 1 com prof. de 2000 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s	203
Figura A.10.7 – Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 1 com prof. de 2500 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s	203
Figura A.10.8 - Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 1 com prof. de 2500 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s	204
Figura A.10.9 – Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 1 com prof. de 3000 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s	204
Figura A.10.10 - Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 1 com prof. de 3000 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s	205
Figura A.10.11 – Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 1 com prof. de 3500 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s	205
Figura A.10.12 - Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 1 com prof. de 3500 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s	206
Figura A.10.13 – Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 1 com prof. de 4000 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s	206
Figura A.10.14 - Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 1 com prof. de 4000 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s	207
Figura A.10.15 – Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 2 com prof. de 1000 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s	207
Figura A.10.16 - Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 2 com prof. de 1000 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s	208

Figura A.10.17 – Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 2 com prof. de 1500 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s	208
Figura A.10.18 - Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 2 com prof. de 1500 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s	209
Figura A.10.19 – Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 2 com prof. de 2000 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s	209
Figura A.10.20 - Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 2 com prof. de 2000 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s	210
Figura A.10.21 – Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 2 com prof. de 2500 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s	210
Figura A.10.22 - Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 2 com prof. de 2500 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s	211
Figura A.10.23 – Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 2 com prof. de 3000 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s	211
Figura A.10.24 - Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 2 com prof. de 3000 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s	212
Figura A.10.25 – Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 2 com prof. de 3500 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s	212
Figura A.10.26 - Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 2 com prof. de 3500 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s	213
Figura A.10.27 – Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 2 com prof. de 4000 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s	213
Figura A.10.28 - Série de movimentos em <i>heave</i> dos modelos do conjunto 2 com prof. de 4000 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s	214
Figura B.10.29 – Amplitude de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto de equipamentos 1, para todas as profundidades estudadas, com incidência de onda de 0°	215
Figura B.10.30 –Amplitude de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto de equipamentos 1, para todas as profundidades estudadas, com incidência de onda de 30°	216
Figura B.10.31 –Amplitude de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto de equipamentos 2, para todas as profundidades estudadas, com incidência de onda de 0°	217
Figura B.10.32 – Amplitude de deslocamento em <i>heave</i> do conjunto de equipamentos 2, para todas as profundidades estudadas, com incidência de onda de 30°	217
Figura C.10.33 – Envoltória de momentos fletores no <i>riser</i> com profundidade de 1000m, Hs 2m e Tp 7s	219
Figura C.10.34 – Envoltória de momentos fletores no <i>riser</i> com profundidade de 1000m, Hs 2m e Tp 9s	219

Figura C.10.35 – Envoltória de momentos fletores no <i>riser</i> com profundidade de 1000m, Hs 2m e Tp 11s	220
Figura C.10.36 – Envoltória de momentos fletores no <i>riser</i> com profundidade de 1000m, Hs 3m e Tp 7s	220
Figura C.10.37 – Envoltória de momentos fletores no <i>riser</i> com profundidade de 1000m, Hs 3m e Tp 9s	221
Figura C.10.38 – Envoltória de momentos fletores no <i>riser</i> com profundidade de 1000m, Hs 3m e Tp 11s	221
Figura C.10.39 – Envoltória de momentos fletores no <i>riser</i> com profundidade de 1500m, Hs 2m e Tp 7s	222
Figura C.10.40 – Envoltória de momentos fletores no <i>riser</i> com profundidade de 1500m, Hs 2m e Tp 9s	223
Figura C.10.41 – Envoltória de momentos fletores no <i>riser</i> com profundidade de 1500m, Hs 2m e Tp 11s	223
Figura C.10.42 – Envoltória de momentos fletores no <i>riser</i> com profundidade de 1500m, Hs 3m e Tp 7s	224
Figura C.10.43 – Envoltória de momentos fletores no <i>riser</i> com profundidade de 1500m, Hs 3m e Tp 9s	224
Figura C.10.44 – Envoltória de momentos fletores no <i>riser</i> com profundidade de 1500m, Hs 3m e Tp 11s	225
Figura C.10.45 – Envoltória de momentos fletores no <i>riser</i> com profundidade de 3000m, Hs 2m e Tp 7s	226
Figura C.10.46 – Envoltória de momentos fletores no <i>riser</i> com profundidade de 3000m, Hs 2m e Tp 9s	226
Figura C.10.47 – Envoltória de momentos fletores no <i>riser</i> com profundidade de 3000m, Hs 2m e Tp 11s	227
Figura C.10.48 – Envoltória de momentos fletores no <i>riser</i> com profundidade de 3000m, Hs 3m e Tp 7s	227
Figura C.10.49 – Envoltória de momentos fletores no <i>riser</i> com profundidade de 3000m, Hs 3m e Tp 9s	228
Figura C.10.50 – Envoltória de momentos fletores no <i>riser</i> com profundidade de 3000m, Hs 3m e Tp 11s	228

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Propriedades da coluna de <i>riser</i>	52
Tabela 5.2 – Resumo dos valores de período de ressonância para sistemas que utilizam a coluna de <i>riser</i>	55
Tabela 5.3 - Valores de coeficiente de arrasto para prismas com base quadrada [43] ..	62
Tabela 5.4 – Valores de coeficiente de massa adicionada para prismas com base quadrada [43]	63
Tabela 5.5 – Condições de contorno nas extremidades da coluna de <i>riser</i>	65
Tabela 6.1 – Dados da sonda de perfuração.....	68
Tabela 6.2 – Dados do posicionamento da mesa rotativa na sonda de perfuração	68
Tabela 6.3 – Dados da Coluna de <i>Riser</i>	70
Tabela 6.4 – Dados do BOP do primeiro conjunto de equipamentos	72
Tabela 6.5 – Dados do LMRP do primeiro conjunto de equipamentos	73
Tabela 6.6 - Dados do BOP do segundo conjunto de equipamentos	73
Tabela 6.7 - Dados do LMRP do segundo conjunto de equipamentos	74
Tabela 6.8 – Dados do conjunto 1 de equipamentos modelado no software SITUA para o estudo de caso	75
Tabela 6.9 - Dados do conjunto 2 de equipamentos modelado no software SITUA para o estudo de caso	75
Tabela 6.10 – Valores de profundidade e comprimento de <i>riser</i> do estudo de caso de instalação.....	77
Tabela 6.11 - Valores de profundidade e comprimento de <i>riser</i> do estudo de caso de transporte	78
Tabela 6.12 – Estados de mar utilizados no estudo de caso de instalação do BOP/LMRP	79
Tabela 6.13 - Estados de mar utilizados no estudo de caso de transporte do BOP/LMRP	81
Tabela 6.14 – Velocidade total aplicada em cada modelo, considerando a velocidade proveniente da corrente marítima e a velocidade proveniente da movimentação da sonda	84
Tabela 7.1 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1000m.....	86
Tabela 7.2 - Esforços axiais mínimos na coluna de <i>riser</i> referentes ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1000m	89
Tabela 7.3 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1500m.....	90

Tabela 7.4 - Esforços axiais mínimos na coluna de <i>riser</i> referentes ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1500m	93
Tabela 7.5 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2000m.....	94
Tabela 7.6 - Esforços axiais mínimos na coluna de <i>riser</i> referentes ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2000m	97
Tabela 7.7 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2500m.....	98
Tabela 7.8 - Esforços axiais mínimos na coluna de <i>riser</i> referentes ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2500m	101
Tabela 7.9 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3000m.....	102
Tabela 7.10 - Esforços axiais mínimos na coluna de <i>riser</i> referentes ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3000m	105
Tabela 7.11 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3500m	106
Tabela 7.12 - Esforços axiais mínimos na coluna de <i>riser</i> referentes ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3500m	109
Tabela 7.13 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 4000m	110
Tabela 7.14 - Esforços axiais mínimos na coluna de <i>riser</i> referentes ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 4000m	113
Tabela 7.15 – Movimento em <i>heave</i> do conjunto de equipamentos 1, a uma profundidade de 1000 metros.....	114
Tabela 7.16 – Movimento em <i>heave</i> do conjunto de equipamentos 1, a uma profundidade de 1500 metros.....	116
Tabela 7.17 – Movimento em <i>heave</i> do conjunto de equipamentos 1, a uma profundidade de 2000 metros.....	118
Tabela 7.18 – Movimento em <i>heave</i> do conjunto de equipamentos 1, a uma profundidade de 2500 metros.....	120
Tabela 7.19 – Movimento em <i>heave</i> do conjunto de equipamentos 1, a uma profundidade de 3000 metros.....	122
Tabela 7.20 – Movimento em <i>heave</i> do conjunto de equipamentos 1, a uma profundidade de 3500 metros.....	124
Tabela 7.21 – Movimento em <i>heave</i> do conjunto de equipamentos 1, a uma profundidade de 4000 metros.....	126
Tabela 7.22 – Ângulo máximo da <i>lower flex joint</i> do conjunto 1, a uma profundidade de 4000 metros e com incidência de onda de 30°	128
Tabela 7.23 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1000m	129

Tabela 7.24 - Esforços axiais mínimos na coluna de <i>riser</i> referentes ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1000m	132
Tabela 7.25 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1500m	133
Tabela 7.26 - Esforços axiais mínimos na coluna de <i>riser</i> referentes ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1500m	136
Tabela 7.27 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2000m	137
Tabela 7.28 - Esforços axiais mínimos na coluna de <i>riser</i> referentes ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2000m	140
Tabela 7.29 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2500m	141
Tabela 7.30 - Esforços axiais mínimos na coluna de <i>riser</i> referentes ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2500m	144
Tabela 7.31 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3000m	145
Tabela 7.32 - Esforços axiais mínimos na coluna de <i>riser</i> referentes ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3000m	148
Tabela 7.33 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3500m	149
Tabela 7.34 - Esforços axiais mínimos na coluna de <i>riser</i> referentes ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3500m	152
Tabela 7.35 – Tensão máxima na coluna de <i>riser</i> referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 4000m	153
Tabela 7.36 - Esforços axiais mínimos na coluna de <i>riser</i> referentes ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 4000m	156
Tabela 7.37 – Movimento em <i>heave</i> do conjunto de equipamentos 2, a uma profundidade de 1000 metros.....	157
Tabela 7.38 – Movimento em <i>heave</i> do conjunto de equipamentos 2, a uma profundidade de 1500 metros.....	159
Tabela 7.39 – Movimento em <i>heave</i> do conjunto de equipamentos 2, a uma profundidade de 2000 metros.....	161
Tabela 7.40 – Movimento em <i>heave</i> do conjunto de equipamentos 2, a uma profundidade de 2500 metros.....	163
Tabela 7.41 – Movimento em <i>heave</i> do conjunto de equipamentos 2, a uma profundidade de 3000 metros.....	165
Tabela 7.42 – Movimento em <i>heave</i> do conjunto de equipamentos 2, a uma profundidade de 3500 metros.....	167
Tabela 7.43 – Movimento em <i>heave</i> do conjunto de equipamentos 2, a uma profundidade de 4000 metros.....	169

Tabela 7.44 – Ângulo máximo da <i>lower flex joint</i> do conjunto 2, a uma profundidade de 4000 metros e com incidência de 30°	171
Tabela 8.1 – Tensão máxima no <i>riser</i> para estudo do transporte de BOP a 1000 metros de profundidade, com velocidade de 1.0m/s.....	173
Tabela 8.2 – Tensão máxima no <i>riser</i> para estudo do transporte de BOP a 1000 metros de profundidade, com velocidade de 1.5m/s.....	173
Tabela 8.3 – Momentos fletores máximos nos casos de transporte do BOP a 1000 metros de profundidade.....	176
Tabela 8.4 – Ângulo máximo da <i>lower flex joint</i> nos casos de transporte de equipamentos em profundidade de 1000 metros.....	178
Tabela 8.5 – Tensão máxima no <i>riser</i> para estudo do transporte de BOP a 1500 metros de profundidade, com velocidade de 1.0m/s.....	179
Tabela 8.6 – Tensão máxima no <i>riser</i> para estudo do transporte de BOP a 1500 metros de profundidade, com velocidade de 1.5m/s.....	179
Tabela 8.7 – Momentos fletores máximos nos casos de transporte do BOP a 1500 metros de profundidade.....	182
Tabela 8.8 – Ângulo máximo da <i>lower flex joint</i> nos casos de transporte de equipamentos em profundidade de 1500 metros.....	184
Tabela 8.9 – Tensão máxima no <i>riser</i> para estudo do transporte de BOP a 3000 metros de profundidade, com velocidade de 1.0m/s.....	185
Tabela 8.10 – Tensão máxima no <i>riser</i> para estudo do transporte de BOP a 3000 metros de profundidade, com velocidade de 1.5m/s.....	185
Tabela 8.11 – Momentos fletores máximos nos casos de transporte do BOP a 3000 metros de profundidade.....	188
Tabela 8.12 – Ângulo máximo da <i>lower flex joint</i> nos casos de transporte de equipamentos em profundidade de 1500 metros.....	190

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e Motivação

A evolução na forma de produção e consumo da sociedade a partir da segunda revolução industrial, no século XIX, somada ao acelerado crescimento populacional presenciado no cenário atual global vem gerando uma demanda com aumento exponencial de insumos provenientes do petróleo.

Este aumento na demanda veio acompanhado da necessidade de desenvolvimento de novas técnicas de localização de reservatórios, o que levou a grandes descobertas, como a da camada pré-sal no Brasil, localizada em lâminas d'água ultraprofundas, podendo chegar a mais de 3000 metros.

Para possibilitar o acesso a essas reservas é necessário que os equipamentos utilizados na execução dos poços sejam compatíveis com o meio em que irão operar, sendo capazes de resistir às altas pressões do fundo marinho e garantir que os procedimentos de perfuração sejam executados com segurança.

Além dos equipamentos, os processos envolvidos na perfuração de poços devem sofrer adaptações para que sua aplicação em altas profundidades seja viável. Um dos problemas provenientes do aumento de profundidade dos poços está relacionado à etapa de instalação dos equipamentos que irão compor a cabeça de poço, dentre eles: *manifolds*, árvores de natal e BOP/LMRP.

Trata-se de equipamentos com grandes dimensões e elevada massa adicional, o que pode levar o sistema a sofrer efeitos de amplificação dinâmica durante a instalação, elevando sua amplitude de movimentação e consequentemente os esforços atuantes na linha de suporte, seja ela um riser rígido ou um cabo. Este efeito pode causar danos no sistema de instalação e em casos extremos o comprometimento total da operação.

Considerando esses fatores, torna-se cada vez mais necessária a execução de simulações dos processos de instalação de equipamentos levando em conta as possíveis condições ambientais da região de instalação e os dados reais dos dispositivos envolvidos na operação.

Outro fator crítico que pode ocorrer devido à exploração de petróleo em águas mais profundas está relacionado ao tempo necessário para o procedimento de instalação e recolhimento de equipamentos, no caso do BOP/LMRP este fator se torna mais significante, pois a instalação é feita através da coluna de riser que irá executar a perfuração do poço. Trata-se de um duto rígido vertical formado por juntas conectadas no convés da sonda, uma a uma, até que o BOP/LMRP atinja a posição de repouso no leito marinho. Apesar de estar associado a um alto tempo de execução, este é um procedimento bem controlado e considerado seguro para a instalação de equipamentos.

Após o término do procedimento de perfuração de determinado poço, o conjunto BOP/LMRP é retirado e pode ser transportado para um poço vizinho, onde irá participar de um novo processo de perfuração. O tempo necessário para esse transporte deve ser otimizado para evitar gastos com locação de sonda e agilizar o processo de perfuração, o que demanda o desenvolvimento de pesquisas nessa área com o objetivo de obter uma solução para estes casos.

1.2 Objetivo

Com base nas considerações descritas em 1.1, o presente trabalho apresenta o estudo dos procedimentos de instalação e transporte de um conjunto de equipamentos composto pelo *blowout preventer* (BOP) e pelo *lower marine riser package* (LMRP).

O processo de descida dos equipamentos será feito com a utilização da coluna de *riser* conectada à sonda de perfuração através da mesa rotativa e serão utilizados modelos em águas ultraprofundas com diferentes carregamentos ambientais de onda atuando sobre o sistema de perfuração.

A primeira etapa do trabalho consiste no estudo do procedimento de instalação do BOP/LMRP. Nessa etapa foram executadas análises em profundidades pré definidas com o objetivo de localizar possíveis zonas de ressonância ao longo do trecho de instalação dos equipamentos e fazer a comparação das solicitações máximas obtidas nos resultados com os limites normativos.

Em seguida foram executadas simulação do processo de transporte dos equipamentos pelo método suspenso. Essa fase também conta com a comparação dos esforços atuantes no *riser* com os critérios normativos de tensão máxima especificados

pela norma API 16Q [4]. O objetivo é verificar a viabilidade do processo e as condições necessárias para sua ocorrência em LDAs ultraprofundas para velocidades de navegação maiores do que as usualmente empregadas pelas sondas.

Na literatura podem ser encontrados alguns estudos que abordam o método de transporte com o BOP/LMRP suspenso, porém ainda se trata de um assunto pouco abordado, que demanda atenção e estudo para a prevenção de acidentes durante sua execução.

1.3 Estruturação do Texto

Primeiramente o assunto do trabalho é introduzido no Capítulo 2 através da apresentação e caracterização dos componentes e equipamentos presentes em um sistema de perfuração típico.

Em seguida, o Capítulo 3 descreve o funcionamento dos diferentes métodos de instalação de equipamentos disponíveis na literatura, assim como a ocasião apropriada para a utilização de cada um deles.

O Capítulo 4 disserta sobre os procedimentos presentes na realização do transporte do BOP/LMRP, suas principais considerações e normas utilizadas.

A metodologia de estudo é introduzida no Capítulo 5, que apresenta também um cálculo preliminar das profundidades críticas de instalação dos equipamentos e faz uma descrição detalhada da construção dos modelos estudados.

O Capítulo 6 trata das características dos modelos utilizados no estudo e os Capítulos 7 e 8 dos resultados obtidos no estudo de instalação e transporte dos equipamentos respectivamente.

Por fim, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 9, que é seguido pelas Referências Bibliográficas e os Apêndices.

2 SISTEMA DE PERFURAÇÃO DE POÇOS

2.1 Introdução

A perfuração de poços para produção de petróleo atualmente é feita quase que em sua totalidade através de um método rotativo, onde a coluna de *riser* está conectada a um top drive, que transfere a ela os movimentos de rotação que, em conjunto com uma força peso aplicada à coluna, são capazes de exercer a perfuração de rochas no solo marinho [1].

Além disso o sistema de perfuração conta com um fluido de perfuração que é injetado através do *swivel* no interior da coluna de *riser* e retorna à superfície através do espaço anular localizado entre as paredes do poço e a própria coluna. O objetivo desse fluido é carregar consigo até a superfície os fragmentos de rocha que surgem devido ao procedimento de perfuração.

A operação de perfuração é feita em etapas, que são caracterizadas pelos diferentes diâmetros do poço em cada trecho. Ao atingir determinada profundidade a coluna de perfuração é recolhida pela sonda e se inicia a instalação da coluna de revestimento, que deve possuir diâmetro menor que o da broca. Após posicionada a coluna de revestimento, o espaço remanescente entre coluna e parede de poço é preenchido com cimento sob pressão, com o objetivo de selar a rocha e permitir que se dê prosseguimento ao processo de perfuração com segurança. Em seguida a broca é substituída por uma com diâmetro menor que o da coluna de revestimento. A coluna de perfuração desce novamente até o fundo marinho e é dado início a próxima etapa do processo de perfuração. Uma representação do perfil do poço após a perfuração pode ser verificada na Figura 2.1.

Este capítulo tem o objetivo de apresentar e caracterizar os principais processos e equipamentos utilizados em um sistema de perfuração.

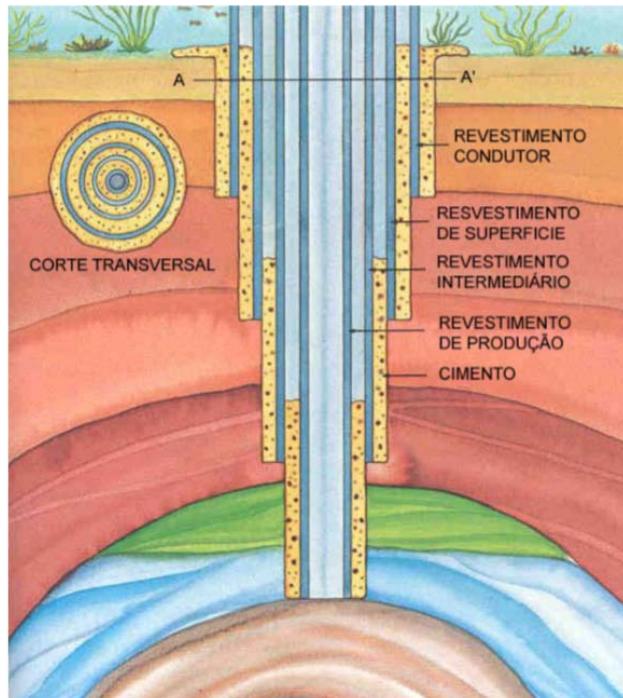


Figura 2.1 – Perfil de um poço perfurado, exibindo as diversas camadas de revestimento [1]

2.2 Sondas de Perfuração

A Figura 2.2 apresenta quatro diferentes tipos de sondas de perfuração: uma plataforma fixa, uma semi-submersível, um navio sonda e uma plataforma autoelevatória. Cada uma dessas sondas é projetada com os sistemas e equipamentos necessários para a execução de uma operação de perfuração. Além disso as sondas também são utilizadas com o objetivo de executar a instalação dos equipamentos que irão compor a cabeça de poço, como o BOP. A utilização dessas embarcações para este fim se deve à sua capacidade de instalação em águas ultraprofundas, já que são projetadas para suportar grandes cargas, além da sua grande mobilidade no leito marinho, que possibilita a movimentação dos equipamentos de forma rápida [2].

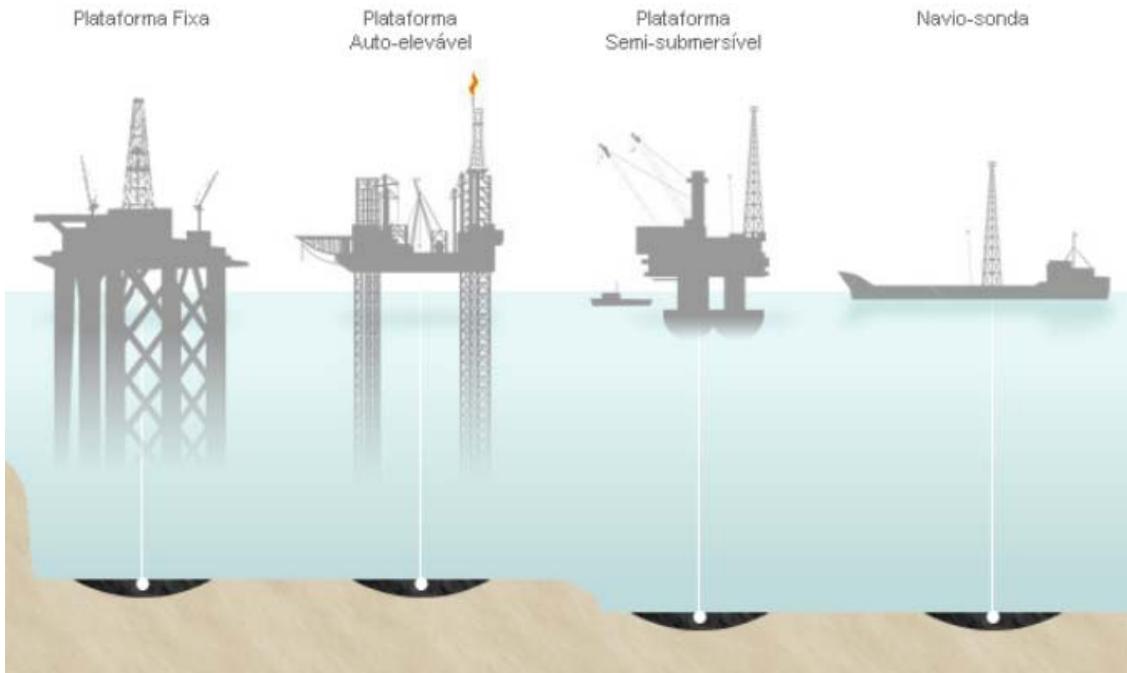


Figura 2.2 – Diferentes tipos de sonda de perfuração

2.2.1 Plataforma Autoelevatória

As plataformas autoelevatórias surgiram em torno de 1954 e se tornaram muito utilizadas em sistemas *offshore* devido à facilidade de sua mobilidade no leito marinho. Além disso, esse tipo de plataforma apresenta grande estabilidade durante a perfuração, o que ocorre devido ao seu sistema de pinhão e cremalheira que permite elevar e abaixar as pernas treliçadas presentes em seu casco, possibilitando seu total apoio no fundo marinho [2].

A Figura 2.3 ilustra uma sonda de perfuração do tipo plataforma autoelevatória. Sua principal limitação está relacionada à profundidade máxima em que ela é capaz de operar, sua instalação pode ser feita em lâminas d'água de até 110 metros, o que as torna pouco utilizadas nos dias atuais, já que os poços estão mais comumente localizados em profundidades acima dos 1000 metros.



Figura 2.3 - Plataforma Autoelevatória [2]

2.2.2 Plataforma Semi-Submersível

A Figura 2.4 ilustra uma plataforma semi-submersível típica, contendo os sistemas e equipamentos necessários para a execução de uma operação de perfuração. Esse tipo de sonda é capaz de perfurar em lâminas d'água ultraprofundas, o que se deve à sua capacidade de flutuação, que faz com que a sonda dispense uma estrutura de apoio no fundo marinho. A *station keeping* dessas plataformas é garantida através de um sistema de ancoragem ou por posicionamento dinâmico [2,3].

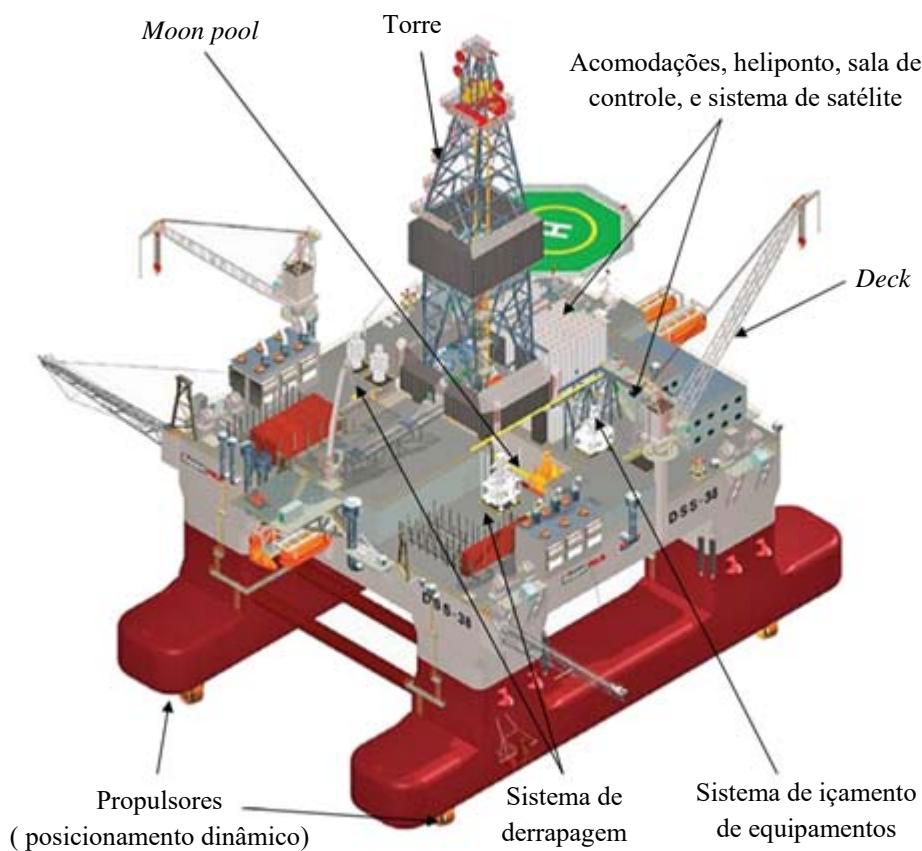


Figura 2.4 - Plataforma Semi-submersível [2]

2.2.3 Navio Sonda

Outra possibilidade de sonda de perfuração são os navios-sonda (Figura 2.5). Assim como as plataformas semi-submersíveis esses navios são capazes de executar processos de perfuração em lâminas d’água ultraprofundas, sua vantagem em relação à primeira é a sua maior capacidade de carga, por outro lado esse tipo de sonda possui uma mobilidade muito alta, o que dificulta o processo de perfuração.



Figura 2.5 - Navio Sonda [2]

2.3 *Riser de Perfuração*

Os *risers* de perfuração (Figura 2.6) têm a função de envolver e proteger os equipamentos que serão utilizados durante o processo de perfuração em poços para exploração de petróleo e gás. Além de proteger a coluna de perfuração e a broca, o *riser* de perfuração possui outras funções, entre elas [4]:

- Conduzir até o fundo marinho o fluido de perfuração, elemento necessário tanto para estabilizar o poço (executar o controle de *kicks*) quanto para conduzir as impurezas originadas da ação das brocas até a superfície;
- Executar a instalação e recolhimento de equipamentos posicionados na cabeça de poço (BOP);
- Conduzir ferramentas necessárias até o poço;
- Acoplar as linhas de *choke*, *kill* e linhas auxiliares à cabeça de poço.



Figura 2.6 – Seção de *riser* de perfuração [5]

A Figura 2.7 apresenta a esquematização de dois tipos de *riser* de perfuração. O primeiro é projetado para utilização em ambientes de alta pressão, já o segundo (mais utilizado) é projetado para uso em ambientes de baixa pressão.

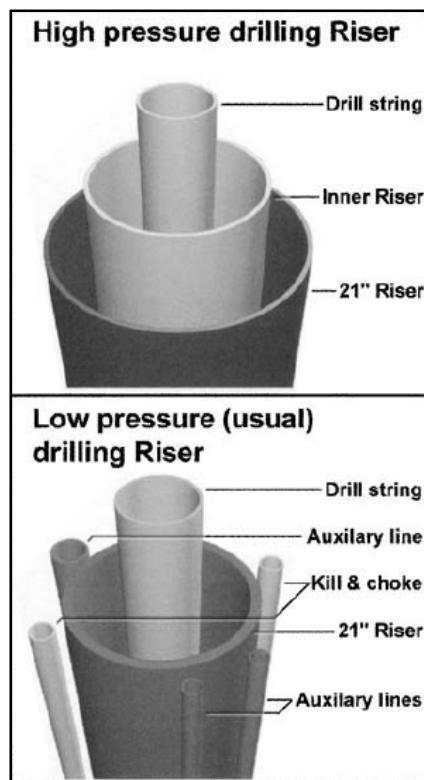


Figura 2.7 – Esquematização de dois tipos de *riser* de perfuração [6]

Os *risers* de perfuração são envolvidos por flutuadores, equipamentos compostos por espuma sintética (material compósito) que possuem o objetivo de adicionar empuxo à linha, reduzindo assim seu peso próprio e consequentemente a sua tração de topo. Os

flutuadores são instalados em toda extensão do *riser*, exceto no trecho próximo à superfície e antes da *flexjoint* inferior, para evitar a concentração de tensões no BOP [7].

2.4 Equipamentos de Perfuração

O procedimento de perfuração de poços requer a utilização de diversos equipamentos com funções essenciais para garantir a segurança e eficiência do processo. Estes equipamentos podem ser divididos em sistemas. Os principais sistemas e seus respectivos equipamentos são [1]:

- Sistema de sustentação de cargas: torre, subestruturas e estaleiros;
- Sistema de geração e transmissão de energia: fontes de energia, sondas mecânicas e sondas diesel-elétricas;
- Sistema de movimentação de carga: guincho, bloco de coroamento, catarina, cabo de perfuração e elevador;
- Sistema de rotação: mesa rotativa, *kelly*, cabeça de injeção, *top driver* e motor de fundo;
- Sistema de circulação: fase de injeção, fase de retorno e fase de tratamento;
- Sistema de segurança do poço: cabeça de poço e pelos preventores;
- Sistema de monitoração: manômetros, indicadores de peso sobre a broca, indicador de torque, tacômetro, etc.

A Figura 2.8 ilustra os principais equipamentos utilizados em um sistema de perfuração convencional, que utiliza o BOP como dispositivo de segurança. O objetivo dessa seção é apresentar brevemente cada um deles e suas principais funções e características.

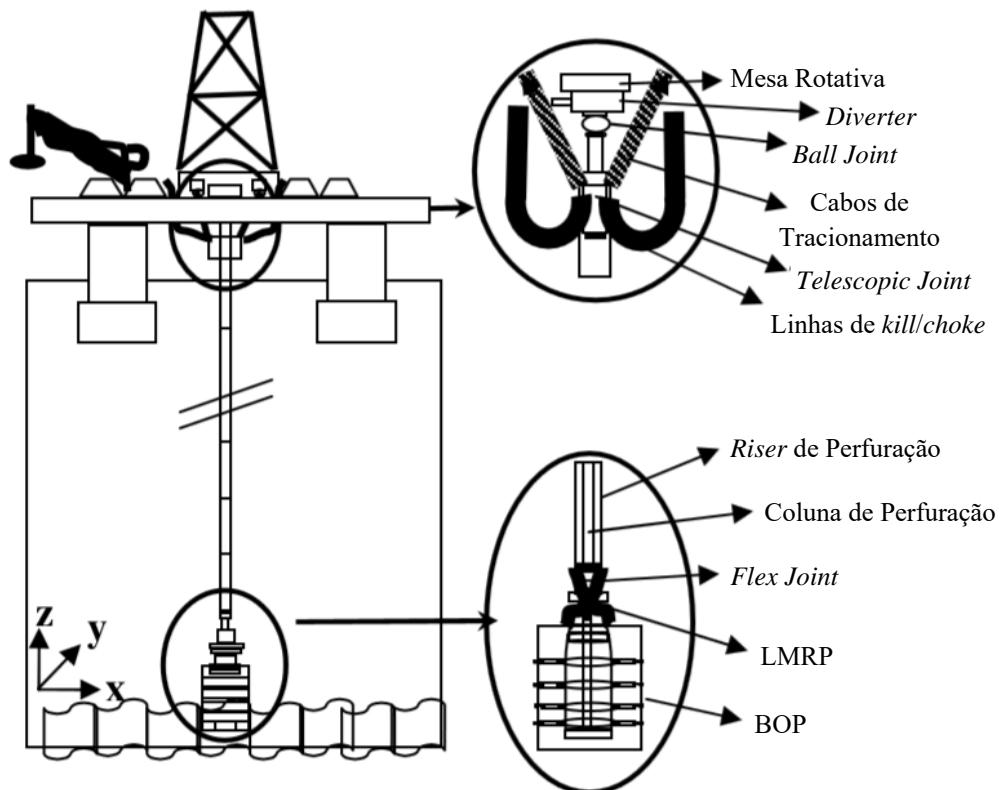


Figura 2.8 – Esquema do sistema de perfuração convencional em uma semi-submersível [8]

2.4.1 Mesa Rotativa

A mesa rotativa (Figura 2.9) é um equipamento que faz parte do sistema de rotação da sonda de perfuração. Este dispositivo fica localizado no interior da sonda e é responsável pelo movimento de rotação da coluna de perfuração, movimento que é transferido através do *kelly* e é utilizado principalmente no momento em que a broca está perfurando o fundo marinho. Em determinadas operações a mesa rotativa deve suportar todo o peso da coluna de perfuração. A sustentação da coluna na mesa rotativa se dá através de uma ferramenta chamada cunha [1].

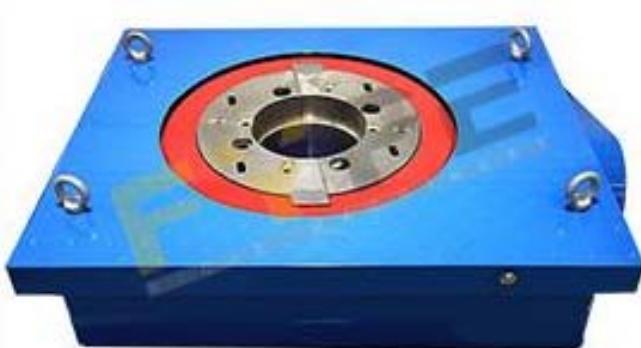


Figura 2.9 – Mesa Rotativa [9]

2.4.2 Diverter

O *diverter* (Figura 2.10) é um equipamento de segurança usualmente posicionado abaixo da mesa rotativa. Trata-se de um dispositivo mecânico que trabalha em baixas pressões. Seu objetivo é impedir que um fluxo indesejado de fluido chegue ao deck de perfuração da sonda de forma descontrolada.

Este equipamento é acionado no caso de ocorrência de um *kick*, se uma parte do fluido conseguir acessar a coluna do *riser* antes do fechamento do BOP. Neste caso o *diverter* redireciona o fluido para um local seguro, fora da plataforma, ou para um separador atmosférico, garantindo a integridade dos equipamentos e a segurança da tripulação [10,11,12].



Figura 2.10 – Diverter [13]

2.4.3 Juntas Flexíveis

As juntas flexíveis têm o objetivo de permitir um desalinhamento angular entre duas partes do sistema de *riser*. Em geral são posicionadas em dois pontos do sistema: na parte

superior da coluna de *riser* (entre o *diverter* e a junta telescópica); e na parte inferior da coluna de *riser* (acima do LMRP).

A primeira é utilizada para compensar os movimentos provenientes da unidade flutuante em que o *riser* de perfuração está apoiado, reduzindo o momento fletor atuante em toda sua extensão. Já a segunda tem o objetivo de reduzir o momento fletor na extremidade inferior do *riser*, onde este está acoplado ao rígido sistema de cabeça de poço [4,11].

Normalmente são encontrados dois tipos de juntas flexíveis: as *Flex Joints* e as *Ball Joints*.

As *Flex Joints* (Figura 2.11) são compostas por uma série de lâminas metálicas e camadas de elastômero formando uma estrutura “sanduíche” capaz de resistir aos efeitos de cisalhamento impostos pelos deslocamentos dos elementos conectados a ela. Esta estrutura confere flexibilidade e estanqueidade à junta ao mesmo tempo que resiste à tração [7,8].



Figura 2.11 – Flex Joint [14]

As *Ball Joints* (Figura 2.12) são compostas por uma esfera maciça e um soquete em aço que possibilitam a movimentação rotacional entre os dois trechos do sistema de perfuração conectados a este dispositivo. As *ball joints* também possuem uma extensão cilíndrica e um adaptador de *riser* posicionados em sua extremidade [8].

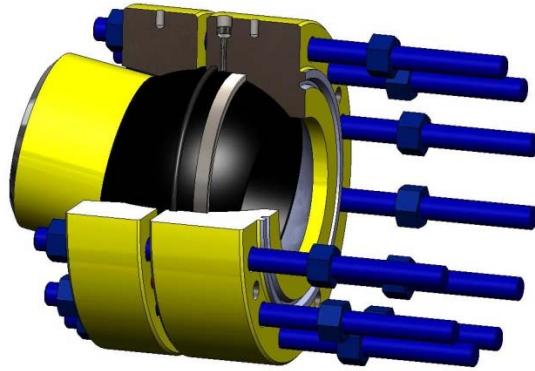


Figura 2.12 – Ball Joint [15]

2.4.4 Cabos de Tracionamento

O *riser* de perfuração deve estar constantemente submetido a esforços de tração para evitar que ocorra flambagem em sua extensão. Estes esforços são proporcionados pelos flutuadores instalados em seu entorno em conjunto com o sistema de tracionamento (Figura 2.13) presente a bordo da sonda de perfuração. A função do sistema de tracionamento é aplicar uma carga vertical no topo do *riser* que seja capaz de suportar o peso do conjunto e mantê-lo constantemente tracionado sem ultrapassar o seu limite dinâmico de tração [4,8,11,12].

Os sistemas de tracionadores são compostos por sistemas hidráulicos e pneumáticos que controlam um conjunto cilindro-pistão. Os cabos de aço que exercem os esforços de tração (usualmente 8 ou 12) são ligados a um anel (anel tracionador) localizado no cilindro externo da junta telescópica. Estes cabos são distribuídos uniformemente em torno do anel e aplicam esforços uniformes de tração [4,8,11].

O sistema de tracionadores conta também com um sistema de compensação de movimento, que o torna capaz de absorver os movimentos verticais da sonda de perfuração, fazendo com que a carga de tração transmitida ao *riser* se mantenha quase constante durante toda a operação [4,8].

A classificação dos sistemas de tracionadores pode ser feita de acordo com a forma de atuação do pistão, dividindo-se em: pistão de atuação ativa e pistão de atuação passiva [4,8].

Os sistemas com pistão de atuação ativa trabalham diretamente no tracionamento do *riser*. Para isso possuem um curso mais longo, mas têm maior capacidade de carga.

Os sistemas com pistão de atuação passiva transmitem carga ao *riser* de forma indireta, por meio de um sistema de polias e cabos de aço.



Figura 2.13 – Sistema de Tracionadores [16]

2.4.5 Junta Telescópica

A junta telescópica (Figura 2.14) é um dispositivo que atua em conjunto com o sistema de tracionadores e tem a função de compensar o efeito de suspensão (*heave*) da sonda em relação ao *riser* de perfuração, reduzindo esforços de tração e compressão que poderiam ser transmitidos à coluna devido a essa movimentação [4,11,12].

O equipamento é composto por dois barriletes cilíndricos concêntricos vedados entre si, um interno ao outro. A parte superior da junta telescópica, composta pelo barrillete interno, é conectada ao *diverter* através da junta flexível, já a parte inferior, composta pelo barrillete externo, é conectada ao *riser* de perfuração. Neste trecho, o suporte das linhas auxiliares é acoplado ao barrillete externo da junta telescópica. Também conectado ao cilindro externo encontra-se o anel tracionador, terminal responsável pela transmissão da carga de tração referente à coluna de *riser* [4,8,11].

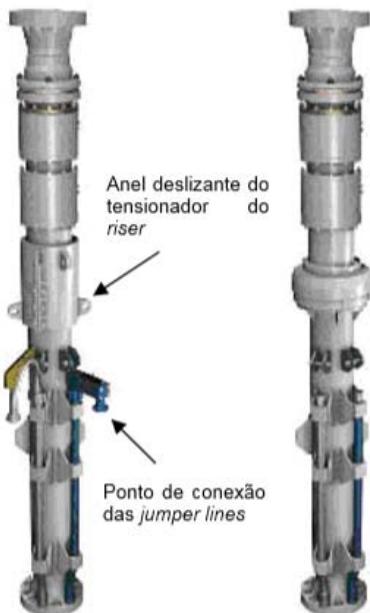


Figura 2.14 – Telescopic Joint [17]

2.4.6 Linhas de *Kill*, *Choke* e Linhas Auxiliares

O *riser* de perfuração conta com linhas auxiliares acopladas à sua parte externa por meio de suportes. Essas linhas possuem diferentes funções e são responsáveis pelo transporte de diferentes tipos de fluidos, dentre elas pode-se citar [8,18]:

- *Choke Line*: trata-se de uma linha de alta pressão, conectada diretamente ao BOP, que tem o objetivo de conduzir de forma controlada, os fluidos em alta pressão até o *choke manifold*, na superfície. A *choke line* trabalha durante as operações de controle do poço [10,18].
- *Kill Line*: trata-se de outra linha diretamente conectada ao BOP, assim como a *choke line* trabalha em alta pressão. Seu objetivo é bombear fluido de perfuração pesado para dentro do poço, expulsando o fluido anular através da *choke line* [10,18].
- *Mud Boost Line*: linha utilizada para conduzir fluido de perfuração que será injetado acima do BOP. Possui o objetivo de aumentar a velocidade do fluxo no espaço entre o *riser* de perfuração e a coluna [8,18].
- *Air Inject Line*: linha responsável pelo controle do volume de ar no *riser* de perfuração. Seu objetivo é manter a flutuabilidade do *riser* adequada durante todo o processo de perfuração [8,18].

- *Hydraulic Supply Line*: linha responsável pelo transporte de fluidos para o acionamento dos comandos hidráulicos do BOP [8,18].

As linhas auxiliares são compostas por dutos rígidos ao longo da maior parte do *riser* de perfuração, nos trechos em que elas passam pela junta telescópica e pelas juntas flexíveis seu material passa a ser flexível para permitir a movimentação do sistema nesses trechos.

A Figura 2.15 apresenta uma esquematização da seção de um *riser* de perfuração, evidenciando todos os elementos que o compõem, inclusive as linhas auxiliares.

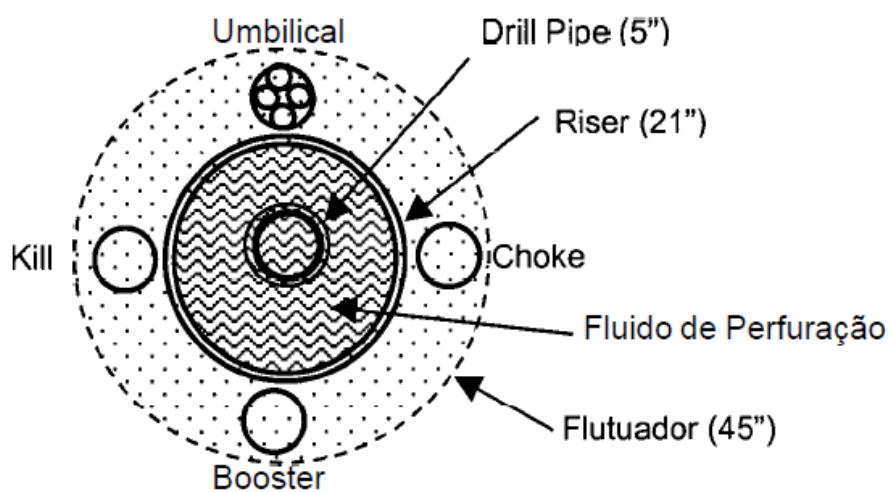


Figura 2.15 – Seção de *riser* de perfuração [19]

2.4.7 LMRP

O LMRP (*Lower Marine Riser Package*), apresentado na Figura 2.17, é instalado em conjunto com o BOP no sistema de perfuração de poço. Seu objetivo é executar o controle hidráulico das operações realizadas no BOP, além de ser capaz de desconectar a cabeça de poço da coluna de *riser* de forma rápida em caso de emergência [12]. A Figura 2.16 apresenta um desenho esquemático do conjunto de equipamentos.

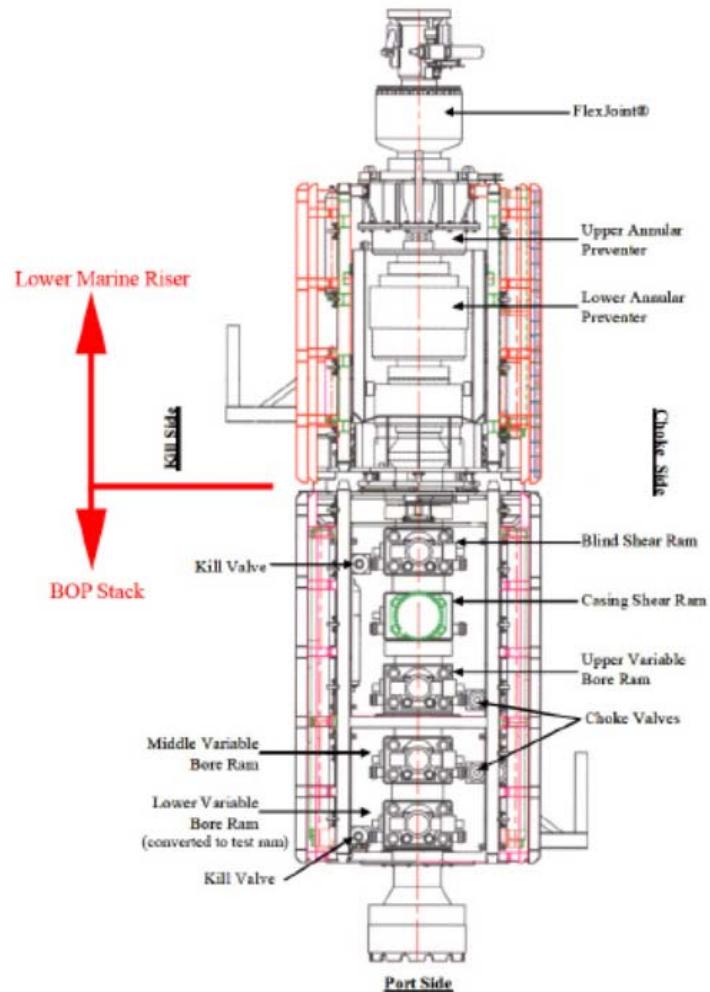


Figura 2.16 – Desenho esquemático do conjunto BOP/LMRP [20]

O conjunto LMRP/BOP pode chegar a pesar 300 toneladas no ar, e é composto por um adaptador de *riser*, uma junta flexível, conectores hidráulicos, BOPs anulares e uma central submarina de controle do BOP. A conexão entre os dois equipamentos é feita através de um conector hidráulico, o *High Angle Release* – H4, que possui ângulo de desconexão de até 15° e é projetado especialmente para a utilização no LMRP [7,8,11].



Figura 2.17 – Lower Marine Riser Package (LMRP) [21]

2.4.8 BOP

2.4.8.1 Características do Equipamento

Um dos sistemas necessários para a execução da perfuração de poços de petróleo é o chamado Sistema de Segurança do poço. Esse sistema é constituído pelos Equipamentos de Segurança de Cabeça de Poço (ESCP), dentre os quais pode-se citar o *blowout preventer* (BOP), representado na Figura 2.18.



Figura 2.18 – Blowout Preventer (BOP) [21]

Os BOPs são responsáveis pelo fechamento da conexão entre a cabeça de poço e o *riser* de perfuração caso haja a ocorrência de um *kick*, fenômeno em que um fluido submetido a altas pressões, presente na parede do solo perfurado, consegue penetrar no poço. À medida em que esse fluido sobe em direção à plataforma, a pressão exercida sobre ele diminui, fazendo seu volume expandir, esse fenômeno é conhecido como *blowout* e pode causar um acidente com grandes danos ao atingir a superfície.

O fechamento do BOP é feito por meio de válvulas (Figura 2.19), e o equipamento pode ser classificado em duas categorias, de acordo com o tipo de válvula utilizada, dentre elas: preventor anular e preventor de gaveta.

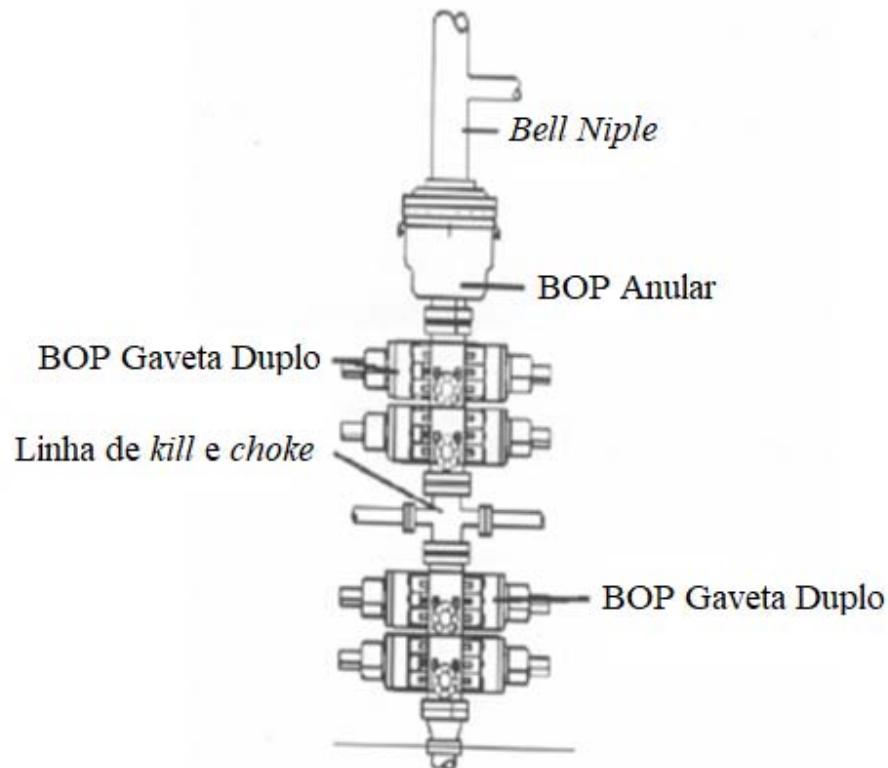


Figura 2.19 – Arranjo típico de um BOP [1]

O BOP anular (Figura 2.20) consiste em um pistão posicionado dentro de um corpo cilíndrico que, ao ser acionado, é deslocado em direção a um dispositivo de borracha, o contato destes dois elementos impede a circulação de fluxo na tubulação do poço [1].

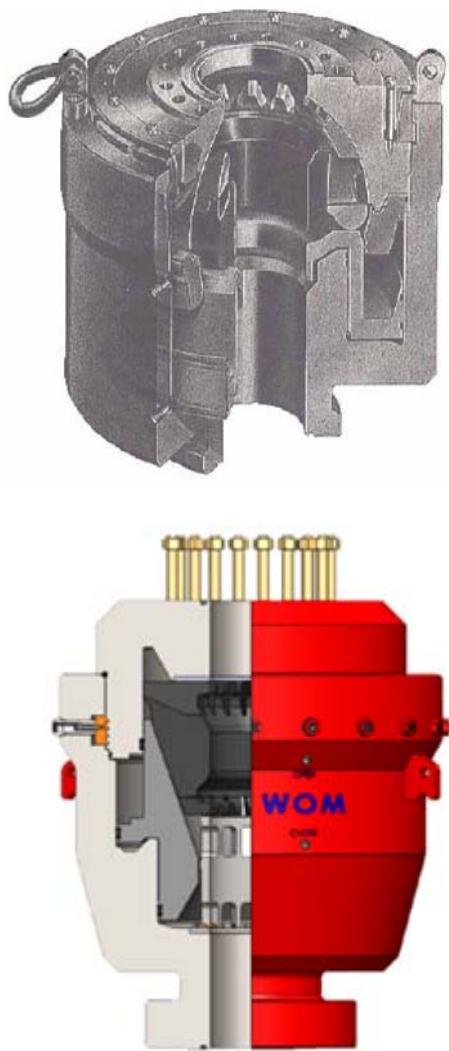
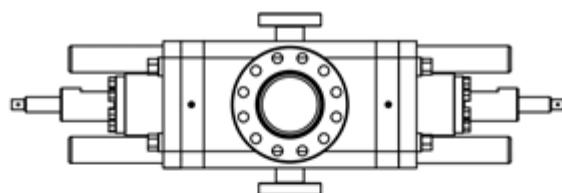
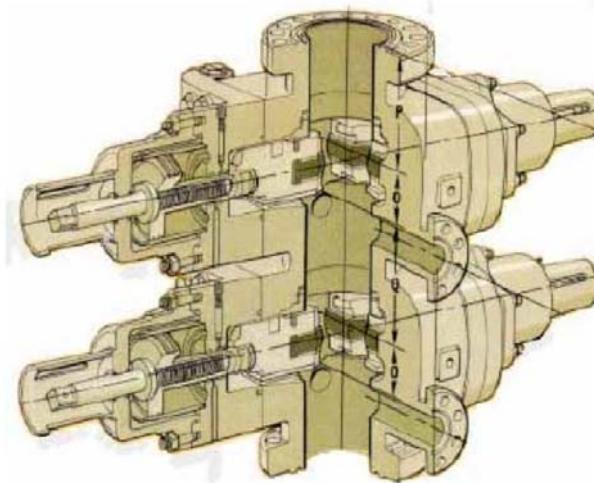
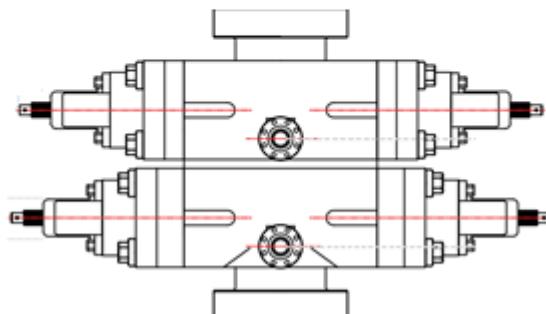


Figura 2.20 – Preventor anular do BOP [17,22]

Já o BOP de gavetas (Figura 2.21) é composto por dois pistões, que ao serem acionados deslocam duas gavetas em sentidos opostos. As gavetas são posicionadas transversalmente à tubulação do poço e o seu fechamento é feito devido ao contato entre elas [1].



Top View of Double WU BOP



Side View of Double WU BOP

Figura 2.21 – BOP com gavetas de tubo [17,22]

A disposição dos preventores na cabeça de poço pode variar de acordo com as características do sistema, como o tipo de sonda (fixa ou flutuante) e seu posicionamento (onshore ou offshore).

A tendência no ramo de exploração de petróleo é se deparar com poços localizados em lâminas d'água cada vez mais profundas. Atualmente o recorde de perfuração pertence ao poço Raya-1, localizado a 250 quilômetros da costa do Uruguai, o poço está posicionado a 3400 metros de lâmina d'água e sua perfuração avança 3000 metros no solo marinho [23,24].

Com essa tendência se faz necessária a evolução de tecnologias dos equipamentos que compõem a cabeça de poço, dentre eles o BOP. Nota-se que essa evolução vem acompanhada do aumento das dimensões do equipamento, como pode ser verificado na Figura 2.22. Sendo assim, é importante que sejam feitos estudos detalhados para garantir que não hajam danos durante sua instalação.

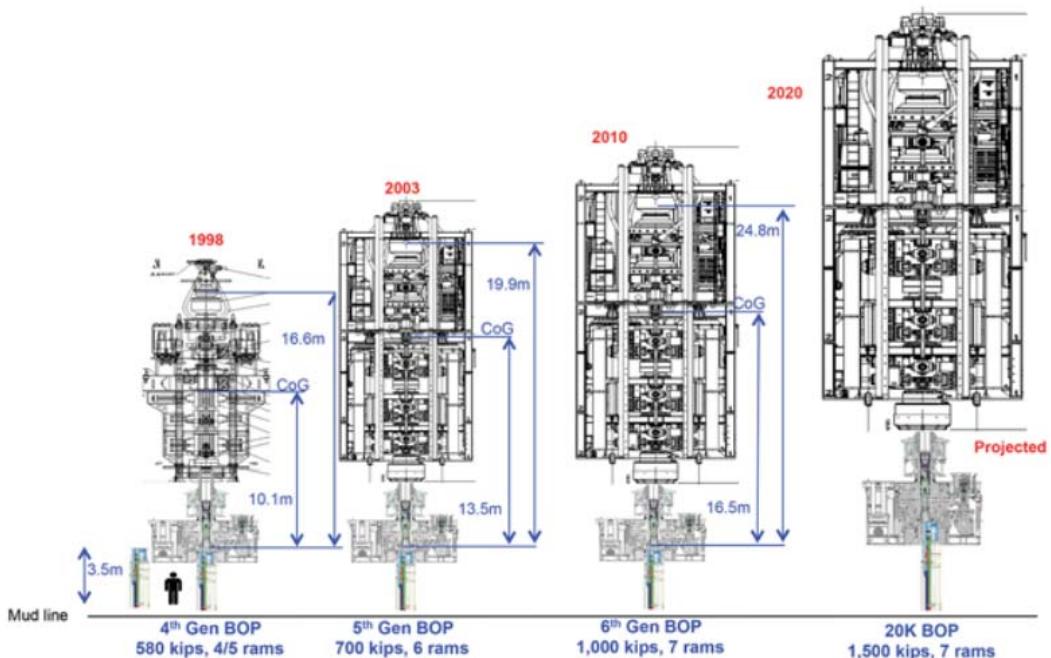


Figura 2.22 – Tendência de crescimento do conjunto BOP/LMRP [25]

2.4.8.2 Controle de Kicks

Ao executar a perfuração de um poço, são encontrados cenários com diversas variáveis que podem influenciar na tomada de decisões relacionadas ao processo de perfuração. Uma característica que deve ser avaliada com extrema importância é se a formação do solo marinho possui pressão normal ou anormal. A formação é dita de pressão normal se a sua pressão de poro for equivalente à pressão hidrostática exercida sobre ela pela coluna d'água (doce ou salgada), considerando a profundidade onde está localizada. Por outro lado, a formação é dita de pressão anormal caso o gradiente de pressão do fluido contido em seus poros esteja fora desta faixa [1].

O conhecimento deste parâmetro está diretamente ligado à segurança no processo de perfuração, já que a pressão aplicada pelo fluido de perfuração deve ser suficiente para

evitar que o fluido presente no solo consiga penetrar no poço (evento conhecido como *kick*, que caso saia de controle pode se transformar em um *blowout*).

Sendo assim, as principais causas de *kick* durante a perfuração de um poço são: utilização de lama com peso insuficiente para a contenção dos fluidos presentes nos poros da formação de solo; e o abastecimento incorreto de lama no poço durante a manobra (processo em que a coluna de perfuração é retirada para substituição da broca e deve ser substituída por um volume equivalente de lama, mantendo a pressão hidrostática no fundo do poço) [1].

Existem também procedimentos que ocorrem de forma indesejada durante a perfuração que podem ocasionar em *kicks*, dentre eles pode-se citar [1]:

- Pistoneio: trata-se da formação de pressões negativas no poço devido ao processo de retirada da coluna de perfuração. As pressões negativas reduzem a pressão hidrostática efetiva no fundo do poço, o que pode possibilitar a entrada dos fluidos presentes no solo;
- Lama Cortada por Gás: Ao perfurar uma formação, os gases contidos em cascalhos cortados pela broca podem se incorporar à lama de perfuração. À medida em que essa mistura sobe até a superfície sua densidade diminui devido à expansão do volume do gás. Caso não seja feito o devido tratamento deste fluido um *kick* pode ser provocado;
- Perda de Circulação: Durante o processo de perfuração pode acontecer uma perda do fluido de perfuração em circulação, o que reduz o nível do fluido e consequentemente a pressão hidrostática aplicada no fundo do poço, possibilitando a entrada de fluido da formação;
- Cimentação Inadequada: Durante o processo de cura do cimento aplicado à parede do poço pode acontecer a criação de uma estrutura auto-sustentável com a redução da pressão hidrostática da pasta de cimento;

Segundo Thomas [1] os principais indícios da formação de um *kick* são:

- Aumento de volume nos tanques de lama;
- Aumento de vazão de retorno;
- Poço em fluxo com as bombas desligadas;

- Diminuição da pressão de bombeio e aumento da velocidade da bomba;
- Poço aceitando menos lama que o volume de aço retirado;
- Poço devolvendo mais lama que o volume de aço em seu interior;
- Aumento da taxa de penetração, provocado por um desbalanceamento entre as pressões de poro da formação e hidrostática da lama, causando um esforço no sentido formação-poço que auxilia a ação da broca;
- Corte da lama por gás, óleo ou água;

A contenção de um *kick* é feita através do fechamento do poço utilizando-se um BOP. Em seguida o poço deve ser controlado, retirando-se o fluido invasor de seu interior e ao ser reativado deve contar com modificações, como o aumento do peso da lama de perfuração, para evitar a ocorrência de um novo *kick*.

3 MÉTODOS DE INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTOS SUBMARINOS

3.1 Introdução

De acordo com [2] uma das etapas do processo de instalação de equipamentos submarinos é a definição da posição de instalação tanto da embarcação, na superfície marinha, quanto do equipamento, ao longo de sua descida.

A unidade de instalação deve estar posicionada de forma que o equipamento seja facilmente direcionado para a sua localização no fundo marinho e deve se manter no posicionamento correto durante todo o procedimento de instalação [2].

Além disso o equipamento que está sendo instalado deve ser monitorado durante toda sua descida, o que é feito por meio de dois dispositivos: o *transponder*, responsável pelo monitoramento da sua posição; e o giroscópio, responsável por detectar variações na sua inclinação (*roll* e *pitch*) [2].

As seções pertencentes a esse capítulo fazem a apresentação dos diversos métodos existentes de instalação de equipamentos *offshore* e do método utilizado para a execução do seu transporte.

3.2 Método de Instalação via Cabo

O método via cabo é muito utilizado na instalação de equipamentos *offshore* de pequeno porte e posicionados em lâminas d'água com pouca profundidade. Sua execução é feita através do içamento do equipamento por um cabo de aço ou de fibra sintética que é desenrolado lentamente pelo guincho da embarcação até que seu posicionamento no solo marinho seja concluído. A Figura 3.1 apresenta um desenho esquemático do método.

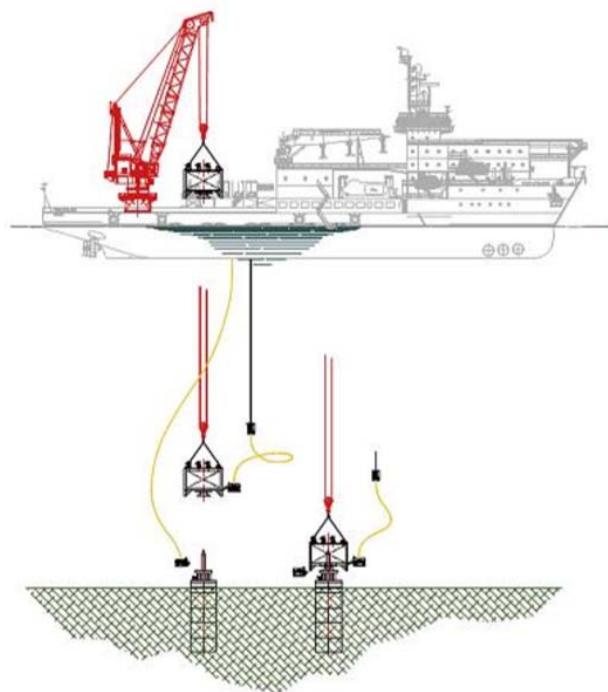


Figura 3.1 – Método de instalação via cabo [2]

A embarcação de instalação a ser utilizada deve possuir um sistema de movimentação de carga, sendo ele do tipo A-frame, guindaste ou torre de instalação. As Figuras 3.2, 3.3 e 3.4 apresentam respectivamente uma embarcação de instalação que utiliza um A-frame, um guindaste e uma torre de instalação.



Figura 3.2 - Embarcação de instalação de equipamentos pelo método vertical via cabo com a utilização de A-frame. [26]



Figura 3.3 – Embarcação de instalação de equipamentos pelo método vertical via cabo com a utilização de guindaste. [26]

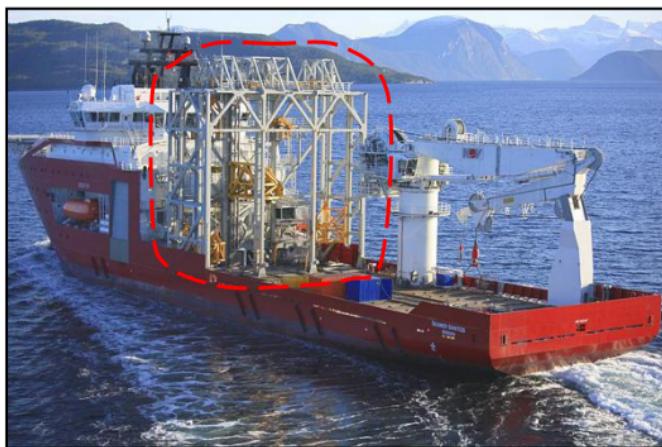


Figura 3.4 – Embarcação de instalação de equipamentos pelo método vertical via cabo com a utilização de torre de instalação. [26]

A utilização deste método para instalação de equipamentos em águas ultraprofundas pode apresentar complicações como: redução da capacidade do guincho devido ao elevado peso do cabo de aço; e risco de ocorrência de ressonância axial no sistema devido à movimentação imposta pelas ondas na embarcação, em determinados comprimentos do cabo de içamento [27].

3.2.1 Com Eslingas, Cabideiro e Spread Bar

Como já mencionado, o método via cabo convencional pode apresentar zonas de ressonância quando utilizado na instalação de equipamentos em águas profundas. Com

o objetivo de minimizar esses efeitos, podem ser instalados no convés da embarcação duas estruturas fixas denominadas cabideiros. Essas estruturas servem de apoio para o içamento do equipamento, que é feito por meio de uma placa de conexão e da *spread bar* conectada ao conjunto de eslingas.

A Figura 3.5 apresenta um desenho esquemático da instalação de equipamento com eslingas, cabideiro e *spread bar*. [26,27]

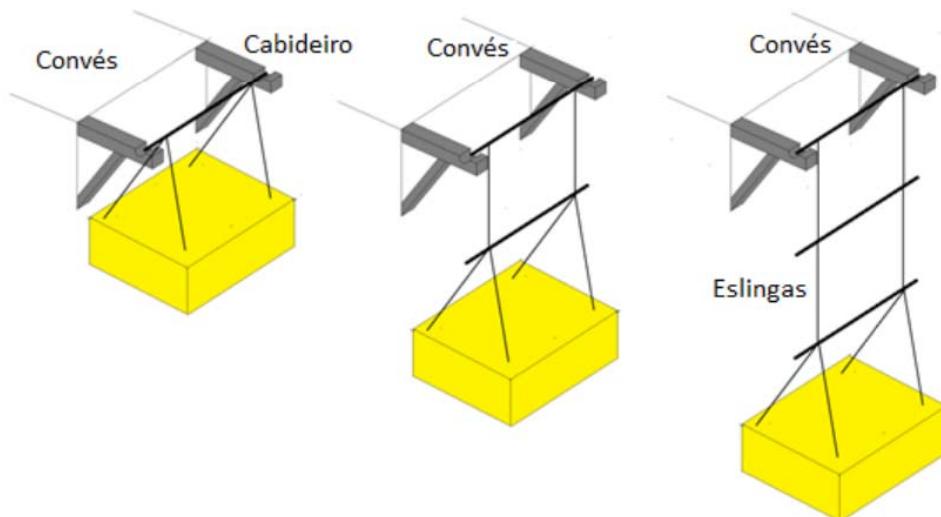


Figura 3.5 – Instalação utilizando cabideiro, eslingas e *spread bar* [26]

Uma desvantagem do método é que sua execução é feita de forma lenta, o que impacta diretamente no custo da operação. Além disso trata-se de um método que demanda técnicas complexas de instalação [26].

3.2.2 Com Compensador de *Heave*

Outra alternativa para a instalação de equipamentos pelo método vertical via cabos é com a utilização de compensadores de *heave*. Trata-se de um dispositivo que é posicionado junto ao sistema de içamento do rebocador. Este dispositivo tem o objetivo de compensar os movimentos verticais que são transferidos da embarcação para o equipamento devido à ação das ondas, reduzindo assim os efeitos de amplificação dinâmica que podem ocorrer durante a instalação do equipamento. Além disso os compensadores de *heave* têm a função de auxiliar as operações que utilizam ROV [2].

Os compensadores de *heave* podem ser classificados em dois tipos: sistemas passivos e sistemas ativos.

Os compensadores passivos (Figura 3.6) são compostos por uma mola pneumática e por um reservatório hidropneumático (acumulador). Seu funcionamento ocorre devido à resistência do gás à compressão e à expansão exercidas pelo pistão, o que confere rigidez ao sistema, em conjunto com o escoamento do fluido proveniente do acumulador, que promove seu amortecimento [28,29].

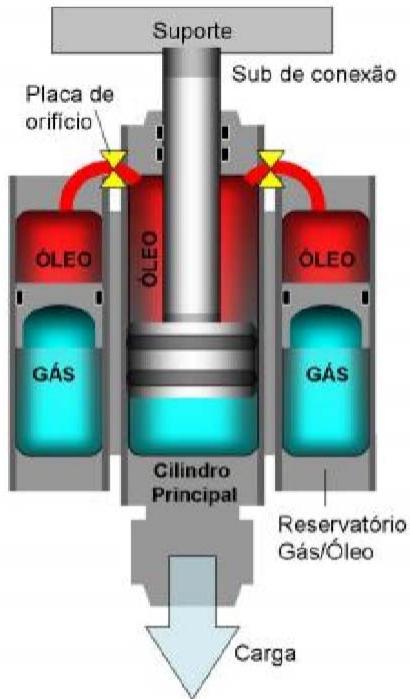


Figura 3.6 – Sistema passivo de compensadores de *heave* [30]

Por outro lado, os compensadores ativos de *heave* (Figura 3.7) possuem sensores de movimentação da embarcação que, através de processos computacionais, controlam o fornecimento e recolhimento do cabo de içamento.

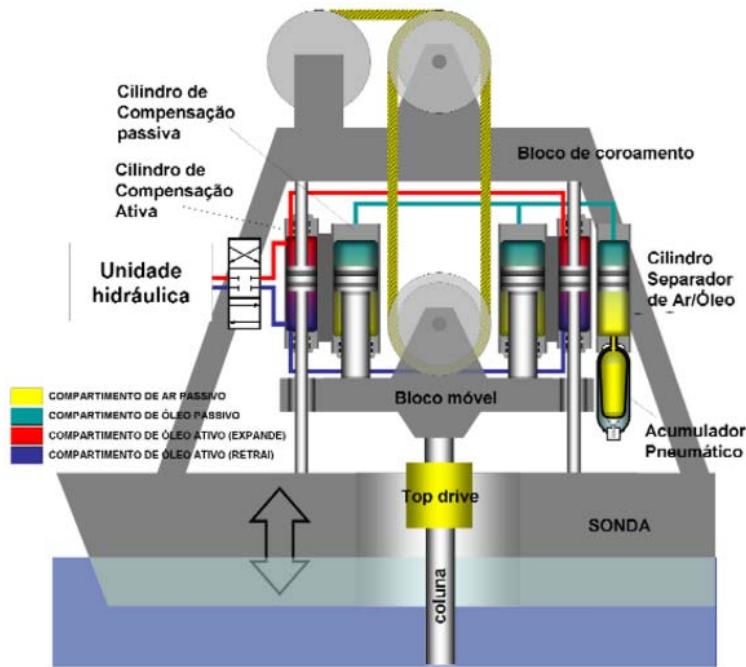


Figura 3.7 – Sistema ativo de compensadores de *heave* [30]

Quando utilizado, o sistema ativo deve ser conectado em paralelo com um sistema de compensação de *heave* passivo para evitar a ocorrência de falha e minimização da energia requerida para ação do sistema [31].

A utilização de um sistema de instalação com compensadores de *heave* possui algumas limitações, tais como: baixa disponibilidade de embarcações com o sistema implantado; alto custo de instalação e manutenção; complicadores operacionais que podem ocorrer no dispositivo [28,29].

3.3 Método Pendular

Durante a execução do método pendular para instalação de equipamentos são utilizadas duas embarcações: uma embarcação transportadora, contendo guindaste e com a capacidade necessária para suportar o peso do equipamento; e uma embarcação instaladora, que pode ser do tipo AHTS e deve ser equipada com guincho/rolo de popa [26].

O procedimento é iniciado com o transporte do equipamento pela embarcação dotada de guindaste até o local de instalação, em seguida é feita a conexão do cabo de

poliéster na placa triangular do equipamento. O cabo é responsável por conectar o equipamento à embarcação de instalação e deve possuir comprimento equivalente a 90% da profundidade no ponto de lançamento. A placa triangular presente no equipamento permite a ligação simultânea do cabo de poliéster e do sistema de içamento [26,28].

Em seguida o equipamento é içado e posicionado a uma profundidade de aproximadamente 50 metros. Neste momento a embarcação de instalação deve estar posicionada a uma distância equivalente a 95% do valor do comprimento do cabo de poliéster. Atingida essa configuração o equipamento é desconectado do cabo de içamento e inicia um movimento que é considerado pendular, porém que sofre os efeitos do amortecimento hidrodinâmico durante sua descida [26,32].

Ao final do procedimento de descida do equipamento, o mesmo se encontra em posição de equilíbrio, com o cabo de poliéster na vertical, e próximo ao fundo marinho. O trecho final de descida é executado pelo sistema de içamento da embarcação de instalação, com o auxílio de amarras para evitar que haja abrasão entre o cabo de poliéster e o rolo de popa [26,27].

A Figura 3.8 ilustra o passo a passo da instalação de um equipamento pelo método pendular.

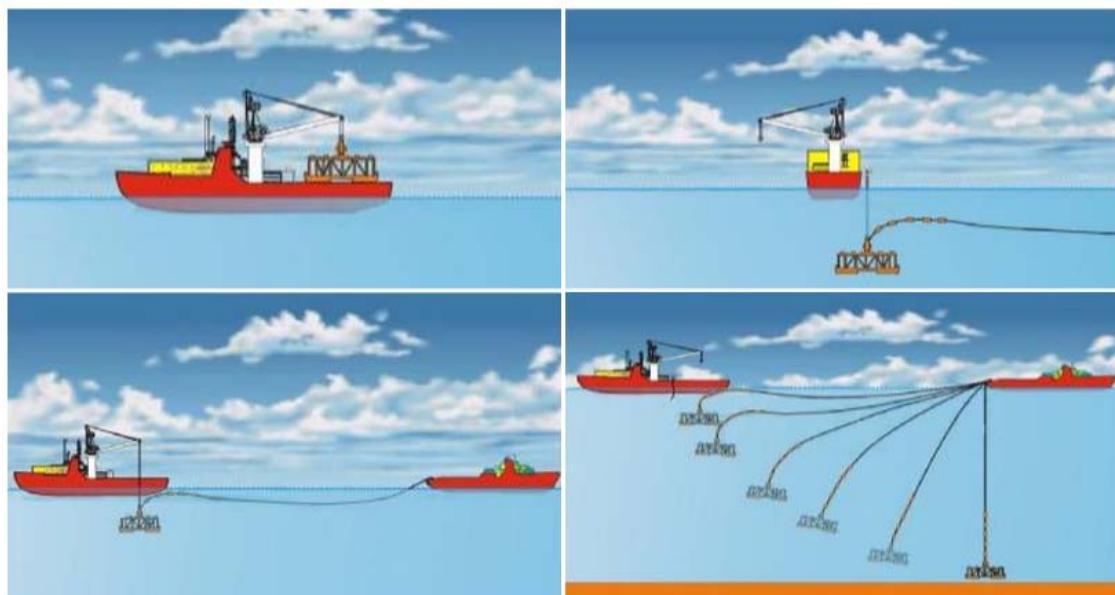


Figura 3.8 – Instalação pelo método pendular [27]

Trata-se de um método patenteado no Brasil, já utilizado pela PETROBRAS três vezes para instalação de manifolds no campo de Roncador [33]. Suas principais limitações estão relacionadas aos seguintes aspectos:

- Baixo controle da movimentação do equipamento durante sua descida, o que pode ocasionar em situações de instabilidade, principalmente relacionada à rotação do equipamento;
- Alta susceptibilidade à abrasão do cabo de poliéster
- Limitação na capacidade de carga dos sistemas de içamento tanto da embarcação de transporte quanto da embarcação de instalação;

3.4 Método da Roldana

Para a execução do método da roldana são necessárias três embarcações, sendo uma semissubmersível e duas do tipo AHTS. A Figura 3.9 apresenta a configuração de instalação do equipamento por esse método.

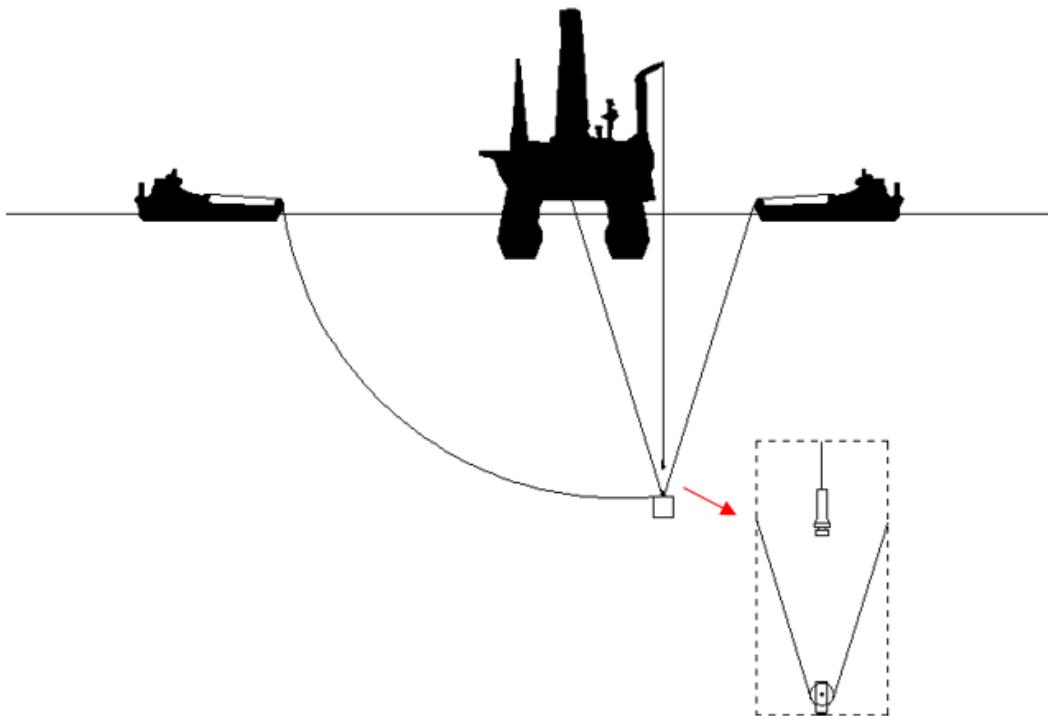


Figura 3.9 – Desenho esquemático representando o método da roldana [27]



Figura 3.10 – Manifold sendo instalado pelo método da roldana [27]

Inicialmente o equipamento a ser instalado fica posicionado no convés da semissubmersível. O primeiro passo da operação de instalação é o içamento do equipamento pelo guindaste da embarcação, que o posiciona em determinada profundidade. Neste ponto, a carga do equipamento é transferida para uma roldana, conectada a um cabo de aço que possui uma extremidade ligada à própria semissubmersível e a outra extremidade ligada a uma das embarcações do tipo AHTS (formato em V). Além disso o sistema conta com um segundo cabo de aço, conectado na lateral do equipamento, que realiza sua ligação com a outra embarcação AHTS e tem o objetivo de impedir que ocorram rotações excessivas no sistema e controlar o posicionamento do equipamento no fundo marinho [28].

Apesar de viabilizar a instalação de equipamentos em águas ultraprofundas (lâmina d’água de até 3000m), o método apresenta diversas limitações, tais como [26]:

- Alto custo de execução, já que são necessárias três embarcações nos processos de instalação;
- Alta complexidade operacional, pois conta com a coordenação de diversas equipes posicionadas nas três embarcações;
- Capacidade de carga limitada do sistema de içamento empregado;
- Possibilidade de ocorrência de efeitos de amplificação dinâmica em determinadas profundidades;
- Janela operacional limitada para a execução da manobra;

3.5 Método Y

O método Y de instalação de equipamentos utiliza em sua execução duas embarcações (do tipo rebocador) posicionadas de forma alinhada, como mostra a Figura 3.11. Cada embarcação é conectada ao equipamento por meio de um cabo de aço, sendo que os cabos não possuem ligação entre si. A conexão entre os cabos de aço e o equipamento é feita através de uma peça auxiliar, que pode ser uma placa triangular ou um anel. A peça é conectada ao equipamento por uma lingada [28].

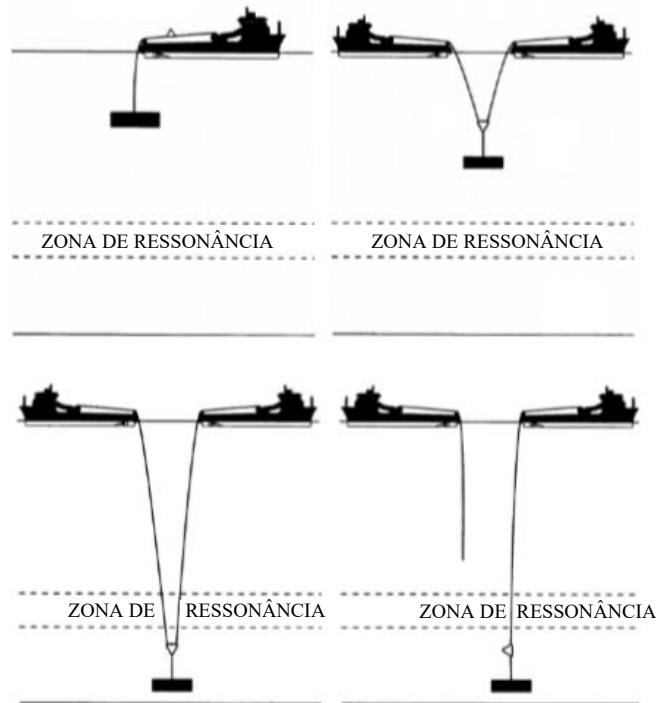


Figura 3.11 – Método Y [34]

A configuração do conjunto composto pelos cabos de aço e o equipamento assume o formato de um Y, o que dá origem ao nome do método que possui patente brasileira [34] e americana [35].

A principal vantagem deste método é a redução dos efeitos advindos da movimentação das embarcações de instalação que ocorre devido à geometria do sistema de lançamento. Sendo assim é possível que o equipamento atravesse zonas de ressonância de forma controlada, sem que ocorram efeitos de amplificação dinâmica no sistema.

3.6 Método de Alternância de Cabos

O método de alternância de cabos foi recentemente proposto em [28] como uma alternativa para a instalação de equipamentos submarinos em águas ultraprofundas. O principal fator a ser considerado por este método é a existência de zonas de ressonância (trechos em que podem ocorrer efeitos de amplificação dinâmica no equipamento devido à equivalência do período das ondas que estão atuando na embarcação com o período natural do sistema de lançamento).

O método apresenta uma configuração em que são utilizadas duas embarcações de instalação, posicionadas de forma alinhada. Cada uma das embarcações é conectada ao equipamento por meio um cabo de instalação. Os cabos utilizados na operação devem possuir materiais diferentes, por exemplo podem ser utilizados um cabo de aço e um de poliéster.

A Figura 3.12 apresenta uma série de desenhos esquemáticos que demonstram o funcionamento do método de alternância de cabos.

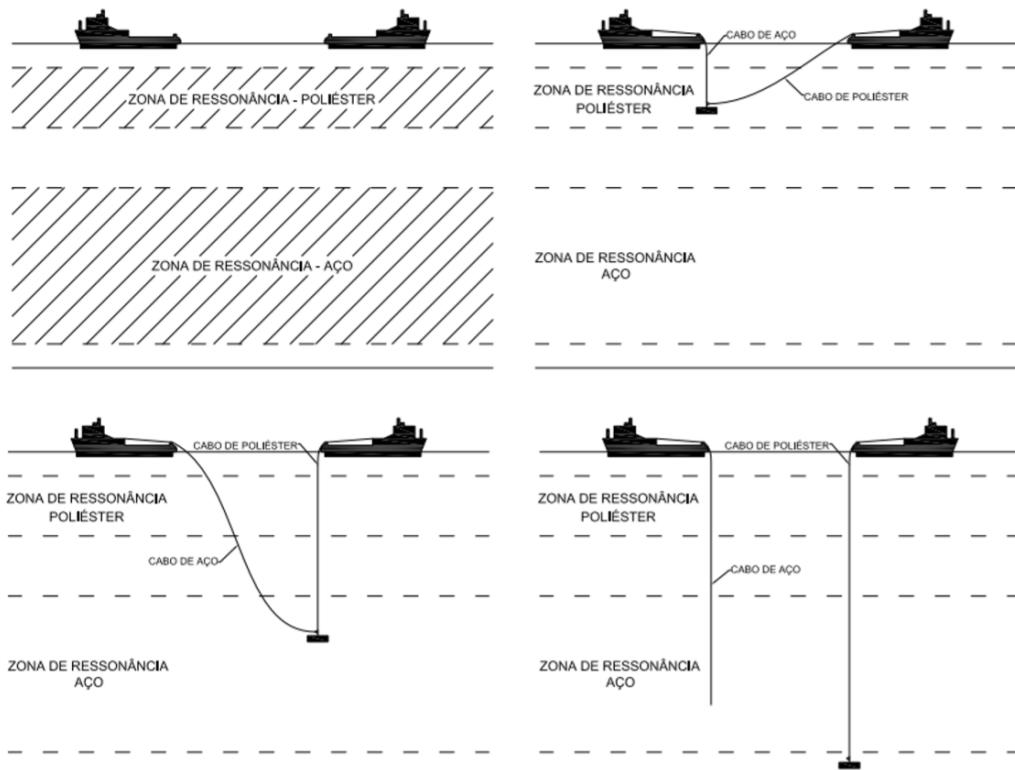


Figura 3.12 – Método de instalação de alternância de cabos [28]

O cálculo do período natural de um sistema de instalação de equipamento leva em consideração a rigidez do sistema, sua configuração geométrica, a massa do equipamento a ser instalado e o intervalo de períodos de onda à que a embarcação estará submetida. Sendo assim, considerando que os cabos de içamento possuem diferentes valores de rigidez, pode-se afirmar que as zonas de ressonância relativas a cada cabo irão se posicionar em diferentes profundidades do trecho de instalação do equipamento [28].

O procedimento de instalação com a utilização deste método é feito a partir da alternância da utilização dos cabos conectados visando evitar que o sistema de instalação sofra os efeitos de ressonância durante a passagem do equipamento pelas suas profundidades críticas [28].

3.7 Método de Instalação via *Riser* de Perfuração

O procedimento de instalação do BOP é feito por meio do método vertical via *riser* de perfuração. A operação se inicia com o posicionamento do equipamento na sonda de perfuração, o BOP é guiado até o *moonpool* por meio de equipamentos e guinchos, onde será adequadamente preparado para seu lançamento. A segurança no processo de posicionamento do BOP depende da magnitude da movimentação da sonda, tornando este um fator importante de ser monitorado.

A descida do BOP é feita com a utilização do próprio *riser* de perfuração em conjunto com outros equipamentos auxiliares. A medida em que o equipamento é lançado novas sessões de *riser* devem ser acopladas em sua extremidade para aumentar seu comprimento, o que torna este um procedimento de instalação lento. A Figura 3.13 faz a representação do processos de instalação pelo método vertical via *riser* de perfuração e a Figura 3.14 apresenta imagens da instalação de um manifold via *riser* de perfuração.

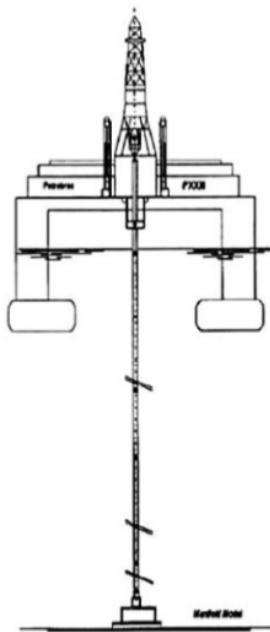


Figura 3.13 - Representação do processo de instalação de um BOP utilizando o método vertical via *riser* de perfuração [2]



Figura 3.14 – Instalação de manifold utilizando *riser* de perfuração [27]

De acordo com [8] alguns cuidados devem ser tomados durante a descida do BOP até o fundo marinho:

- Antes de retirar o BOP da mesa auxiliar seus controles devem estar na posição de funcionamento e a trava do conector do *riser* deve ser verificada;
- A primeira seção de *riser* conectada ao BOP deve ter comprimento suficiente para que este se posicione dentro do leito marinho sem intervalos;

- A conexão entre as seções de *riser* deve ser feita de acordo com os procedimentos recomendados pelo fabricante;
- Deve-se utilizar uma *gimballed spider* quando os movimentos de *pitch* e *roll* da embarcação forem significativos causando momentos fletores elevados na conexão;
- As linhas auxiliares, de *kill* e de *choke* devem ser testadas para a pressão em intervalos regulares, além disso as linhas de *kill* e *choke* devem estar preenchidas com água;
- O comprimento e o número de seções de *riser* devem ser definidos de forma que, com a chegada do BOP na cabeça de poço a junta telescópica esteja posicionada corretamente para reduzir os deslocamentos causados pela movimentação da sonda;
- Entre outras;

A instalação do BOP na cabeça de poço deve ser feita com o monitoramento de um equipamento subaquático (ROV). Nessa última etapa existe o risco de o *riser* sofrer compressão, o que deve ser evitado, além disso os tensionadores devem suportar um peso maior que o do *riser* e os compensadores de *heave* devem suportar a movimentação de todo o sistema [8].

4 MÉTODOS DE TRANSPORTE DE BOP/LMRP

4.1 Introdução

Após concluído o procedimento de perfuração de um poço, o BOP é retirado e uma capa de abandono é instalada para revestir o topo do alojador de alta pressão e proteger as áreas de vedação de possíveis quedas de equipamentos ou material e até mesmo das ações do meio ambiente durante o período de abandono do poço [1].

Desta forma o BOP pode ser imediatamente instalado em outra cabeça de poço ou pode ser recolhido e armazenado para futuras utilizações. No caso de existir outra cabeça de poço disponível para instalação do BOP, o procedimento usual é: execução do recolhimento total do equipamento, até a sonda na superfície; seu transporte através da sonda de perfuração até o ponto onde está localizada a nova cabeça de poço; execução do procedimento de instalação com a utilização do *riser* de perfuração.

Pode-se considerar que os procedimentos de instalação e recolhimento do BOP são realizados de forma lenta, já que ambos são executados com a utilização do *riser* de perfuração, que é composto por seções rígidas e deve ser montado à medida em que o equipamento é instalado.

A Figura 4.1 apresenta um gráfico com os resultados obtidos por um estudo feito por [36], que calcula o tempo necessário para executar os procedimentos de descida e posterior recolhimento do BOP, através do método vertical via *riser* de perfuração, em profundidades que variam entre 200 e 7000 pés.

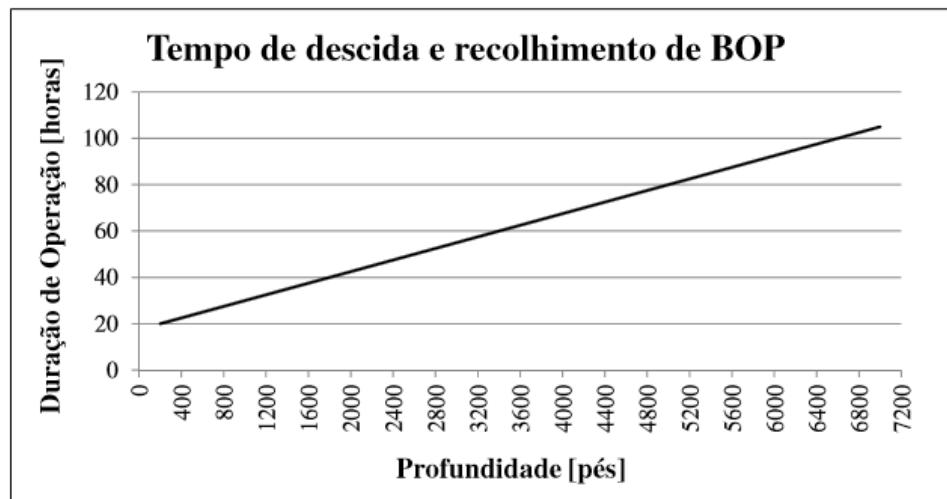


Figura 4.1 – Tempo de descida e recolhimento do BOP em função da profundidade de instalação [36]

Pode-se notar no gráfico que para uma lâmina d'água de 6800 pés (2072 metros) a duração estimada para a essa operação é de aproximadamente 100 horas, o que equivale a pouco mais que 4 dias. Deve-se ainda levar em consideração que essa estimativa não engloba o tempo gasto pela sonda para se deslocar entre um poço e outro e que atualmente os poços de petróleo estão localizados em lâminas d'água ainda mais profundas, podendo chegar a 3000 metros.

Usualmente as empresas de exploração de petróleo precisam fazer a locação das sondas para executar os procedimentos de perfuração, instalação e recolhimento de equipamentos, sendo assim a velocidade dessas operações está diretamente relacionada aos gastos despendidos com elas, ou seja, a redução do tempo de operação representa uma economia significativa para a empresa de exploração.

Sendo assim, outra alternativa é que o transporte do BOP seja feito com o equipamento suspenso pela sonda, porém submerso e próximo ao fundo marinho, eliminando a necessidade de recolhimento e posterior descida do BOP em todo o trecho da lâmina d'água. A Figura 4.2 faz a representação do processo de transporte de um BOP suspenso pelo *riser*.

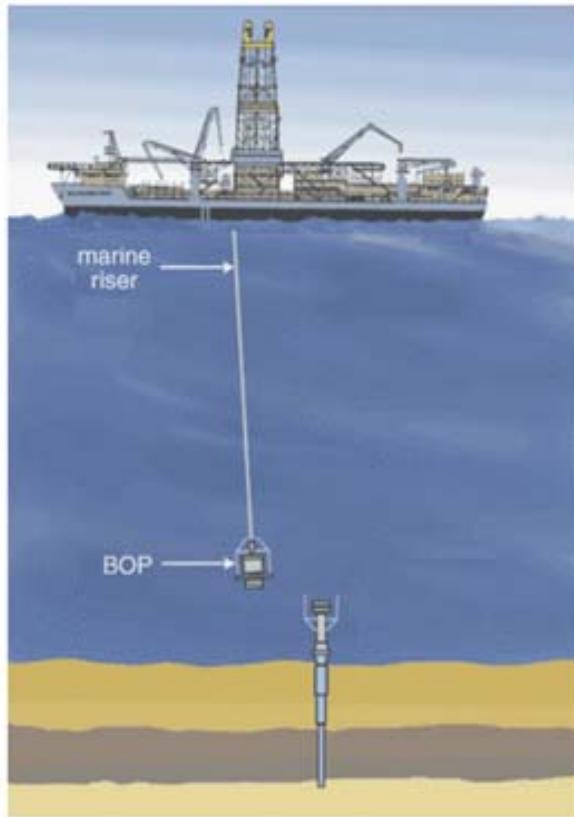


Figura 4.2 – Representação do processo de transporte de um BOP submerso [37]

Neste método o BOP é levantado através da coluna de *riser*, até que atinja determinada profundidade, em seguida a sonda de perfuração se movimenta em direção à nova cabeça de poço, onde o BOP será instalado, mantendo a coluna de *riser* e o equipamentos suspensos, neste momento o BOP é transportado como um pêndulo. Ao atingir o ponto de instalação, o equipamento desce novamente até que seja instalado na cabeça de poço.

Durante o procedimento, tanto o BOP/LMRP quanto a coluna de *riser* sofrem influências dos carregamentos ambientais. A atuação das ondas na embarcação provoca deslocamentos no sistema, enquanto o perfil de correnteza pode gerar esforços indesejáveis na coluna de *riser*, além de aumentar a velocidade relativa do sistema.

Na literatura podem ser encontrados alguns estudos que abordam o método de transporte com o BOP/LMRP suspenso. Pode-se citar como exemplo as referências [38,39 e 40], porém ainda se trata de um assunto pouco abordado, que demanda atenção e estudo para a prevenção de acidentes surante sua execução.

4.2 Considerações do Método de Transporte com BOP Suspenso

Para a constatação da viabilidade e da necessidade do transporte do BOP/LMRP pelo método suspenso, [38] aponta alguns fatores que devem ser verificados nas condições do meio, no trajeto a ser percorrido.

4.2.1 Distância a ser percorrida

O primeiro fator a ser considerado é a distância entre pontos de instalação, o método suspenso possibilita o transporte do conjunto BOP/LMRP entre poços vizinhos ou muito próximos, a utilização deste método para transporte em longas distâncias não é recomendada pois a probabilidade de ocorrência de obstáculos não previstos e problemas de execução aumenta.

4.2.2 Profundidade da cabeça de poço

O transporte do BOP/LMRP pelo método suspenso é vantajoso por economizar o tempo de subida e descida dos equipamento entre o fundo marinho e a sonda de perfuração, ou seja, nos sistemas em que o equipamento se encontra instalado em maiores profundidades o método se torna mais vantajoso. Além disso os equipamentos localizados no topo da coluna de *riser* são os que possuem maior dificuldade de instalação e necessitam de mais tempo para serem recolhidos [38].

Sendo assim, pode-se concluir que para sistemas em águas rasas o método de transporte com o BOP suspenso pode não ser o mais apropriado, já que não representa uma economia de tempo tão significativa [38].

4.2.3 Condições ambientais

As condições ambientais no momento do transporte do BOP/LMRP suspenso são de extrema importância para a execução da operação. Determinados perfis de corrente podem inviabilizar o método caso provoquem uma elevação significativa da velocidade relativa da coluna de *riser*. Além disso, os esforços provenientes de ondas na embarcação podem influenciar de forma significativa nos deslocamentos dos equipamentos durante o processo de transporte.

4.2.4 Estruturas instaladas no percurso do equipamento

Durante a execução do transporte do BOP/LMRP suspenso existe a possibilidade de ocorrer uma falha de operação que resulte na queda dos equipamentos em solo marinho. Tal ocorrência seria por si só desastrosa, porém a existência de estruturas instaladas no fundo marinho, no momento da queda poderiam torná-la ainda mais crítica.

Sendo assim, durante a definição do trajeto a ser percorrido pela sonda, deve-se evitar que haja o cruzamento dos equipamentos com essas estruturas. Caso isso não seja possível a recomendação prática [41] determina que sua produção seja interrompida durante a execução do cruzamento.

4.2.5 Batimetria do fundo marinho

Outro fator a ser verificado durante a definição do percurso a ser traçado pela sonda é a batimetria do fundo marinho existente ao longo do trajeto. Seu conhecimento detalhado é de extrema importância para garantir que não haja colisão dos equipamentos suspensos com elevações inesperadas no solo.

4.2.6 Propriedades da coluna de *riser*

A coluna de *riser* do sistema de instalação deve ser projetada de forma que seja capaz de suportar o peso do conjunto BOP/LMRP somado a seu peso próprio submerso. Nos casos em que os equipamentos serão transportados pelo método suspenso a estrutura deve ainda resistir às solicitações dinâmicas geradas pela movimentação do sistema. Sendo assim é de extrema importância que a coluna de *riser* escolhida seja apropriada para a execução dos procedimentos de instalação, perfuração e transporte dos equipamentos [38].

4.2.7 Design do BOP e do LMRP

Durante o transporte do BOP/LMRP submerso diversas forças hidrodinâmicas atuam constantemente nos equipamentos podendo gerar danos em trechos de sua estrutura considerados frágeis. Sendo assim, é necessário que a resistência de alguns trechos seja verificada para esse procedimento antes de sua execução [38].

4.3 Recomendações Práticas e Protocolos para o Transporte do BOP/LMRP Suspenso

Para que seja executado o procedimento de transporte do BOP/LMRP suspenso algumas normas e protocolos devem ser seguidos. Esses protocolos podem ser definidos por autoridades locais ou pelas próprias empresas que executam o procedimento de transporte ou que são proprietárias dos equipamentos.

De acordo com a recomendação prática [41], da Transocean, um plano de movimentação do conjunto sonda/*riser*/BOP deve ser preparado antes que o transporte seja. O plano deve incluindo os seguintes elementos:

- Distância de movimentação do conjunto;
- Comprimento do *riser* que deve ser suspenso para garantir a segurança do processo, sem que o BOP entre em contato com o fundo marinho;
- Procedimentos operacionais;
- Condições ambientais máximas e atuais do trecho a ser percorrido;
- Dados dos equipamentos acoplados ao *riser*;
- Batimetria do trecho a ser percorrido;
- Utilização do ROV para monitorar a folga entre BOP e possíveis obstáculos localizados no fundo marinho (nos casos onde a folga é menor que 500 pés);
- Relatório de avaliação de risco;

A recomendação prática [41] também define medidas operacionais que devem ser respeitadas durante todo o procedimento de transporte dos equipamentos, tais como:

- Monitoramento constante do BOP pelo ROV;
- Comunicação ativa entre a sala de controle, a ponte de comando, o piso da sonda e o *moonpool* durante todo o processo de transporte para garantir a segurança e o posicionamento correto do *riser*;
- Monitoramento constante do ângulo de topo do *riser* para qualquer movimento, vibração e aumento ou redução da tração que possa ocorrer. O procedimento deve parar caso seja observado um movimento abrupto;

- Monitoração da aproximação do *riser* com a mesa rotativa, o moonpool ou qualquer outra estrutura que possa restringir o deslocamento lateral do *riser*;
- Ajuste constante da velocidade e direção do movimento de acordo com observações feitas em tempo real no *moonpool*, no ângulo do *riser* e no piso da sonda;
- Fechamento da produção de pipelines e outras estruturas no caminho do BOP suspenso, durante sua passagem;

5 METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS PROCESSOS ESTUDADOS

5.1 Introdução

Anteriormente à execução dos modelos numéricos, é necessário que a metodologia a ser utilizada seja definida e que algumas análises preliminares sejam executadas, a fim de definir as premissas para o desenvolvimento do estudo de caso. Sendo assim, esse capítulo apresenta alguns fatores fundamentais para o entendimento da proposta de estudo, assim como para sua execução.

A metodologia de estudo é apresentada a fim de explicitar os meios utilizados na execução dos modelos, além do passo a passo das definições necessárias para sua montagem. Após sua apresentação são definidos os critérios normativos para verificação do sistema durante os procedimentos de instalação e transporte e é feita a apresentação da montagem do modelo no software de análise estrutural.

Além disso o capítulo apresenta o cálculo preliminar das profundidades críticas do sistema de instalação, que é feito através de expressões analíticas com a consideração de um sistema massa-mola. E também a identificação dos gráficos de RAO da embarcação utilizada no estudo, que podem explicitar os estados de mar críticos durante a instalação e transporte dos equipamentos.

5.2 Metodologia de Estudo

A proposta deste trabalho é apresentar estudos de caso através dos quais é possível definir a janela operacional de lançamento de um BOP em determinadas condições ambientais, além das possíveis condições de transporte do equipamento suspenso pela coluna de *riser*.

A metodologia do estudo de caso é composta pelas seguintes etapas:

- Definição das características da sonda de perfuração, do *riser* de perfuração e do conjunto BOP/LMRP que serão utilizados tanto no estudo de instalação dos equipamentos, quanto no estudo de transporte dos mesmos;

- Definição das profundidades a serem modeladas no estudo da instalação dos equipamentos a partir do cálculo analítico da profundidade crítica do sistema;
- Definição dos carregamentos ambientais que serão aplicados nas simulações dos modelos de instalação do BOP/LMRP;
- Obtenção dos resultados do processo de instalação do BOP/LMRP por meio de simulações feitas no software SITUA-Prosim;
- Comparaçāo dos resultados do procedimento de instalação dos equipamentos com critérios normativos;
- Definição dos comprimentos de *riser* que serão estudados no processo de transporte do BOP/LMRP;
- Definição dos casos de carregamento que serão aplicados nas simulações dos modelos de transporte do BOP/LMRP;
- Obtenção dos resultados do procedimento de transporte dos equipamentos, através de simulações feitas no software utilizado;
- Comparaçāo dos resultados obtidos pela simulação do transporte do BOP suspenso com os critérios normativos definidos para esse tipo de operação;
- Apresentação e análise crítica dos resultados.

5.3 Software SITUA/Prosim

Os modelos do estudo proposto serão 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 situações de instalação (de dutos e equipamentos) e de avaria.

Conforme [42], o SITUA compõe 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. A ferramenta computacional fornece ao usuário a visualização em 3D do modelo executado, além de recursos como apresentação dos resultados em forma de animação.

O Prosim contempla o *solver* da simulação do modelo. 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 ser de treliça ou de pórtico). Além disso o programa é capaz de simular o acoplamento destes dois elementos, considerando sua interação [42].

5.4 Cálculo Preliminar das Profundidades Críticas

Com o objetivo de calcular de forma analítica as profundidades críticas de um sistema de instalação de BOP/LMRP pode-se apresentá-lo por um sistema massa-mola, utilizando para tal a soma das massas dos equipamentos e a rigidez da coluna de *riser*.

A Figura 5.1 mostra a representação do sistema de lançamento de equipamentos por um sistema massa-mola.

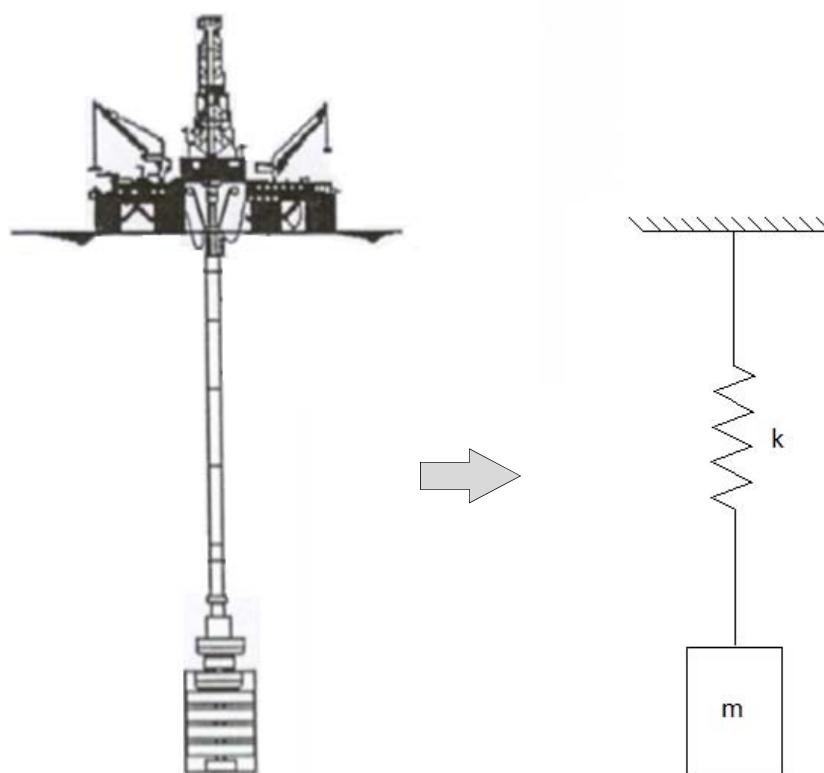


Figura 5.1 – Representação do sistema de lançamento de BOP/LMRP por um sistema massa-mola

Para a execução do cálculo analítico das profundidades críticas do sistema de lançamento do BOP/LMRP primeiramente é importante apresentar a definição de alguns

conceitos que serão utilizados. A frequência natural do sistema (ω_n) representa a frequência de vibração a que ele estará submetido após sofrer o efeito de uma perturbação inicial momentânea, a equação que representa a frequência natural está relacionada à sua rigidez (k) e massa (m) e pode ser observada em (5.1). Além disso deve-se ressaltar que a rigidez de um corpo com comprimento L , área de seção transversal A e módulo de elasticidade E pode ser obtida pela equação (5.2).

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5.1)$$

$$k = \frac{EA}{L} \quad (5.2)$$

Substituindo a rigidez em (5.1) pela expressão (5.2) e modificando a equação resultante para fornecer período no lugar de frequência, podemos obter a expressão (5.3).

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{mL}{EA}} \quad (5.3)$$

Com esta expressão é possível calcular o período natural do sistema de lançamento do BOP para diferentes valores de comprimento do *riser* de perfuração.

Aplicando a equação (5.3) para diferentes valores de massa do conjunto de equipamentos e variando o comprimento do *riser* de perfuração é possível elaborar um gráfico de períodos naturais do sistema para diversos casos de instalação.

Os dados da coluna de riser que será utilizada no estudo podem ser verificados na

Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Propriedades da coluna de riser

Propriedades do Riser de Perfuração	
Diâmetro Externo (m)	0.533
Diâmetro Interno (m)	0.492
Módulo de Elasticidade (GPa)	203.395
Rigidez axial (kN)	6713328.1

A Figura 5.2 apresenta à direita um gráfico com as profundidades críticas para sistemas de lançamento de BOP/LMRP com massa variando entre 200 e 1800 toneladas e profundidades variando entre 100 e 4000 metros e à esquerda um gráfico com os espectros de onda de Jonswap para períodos de pico variando de 1 a 14 segundos e altura de onda unitária, pode-se notar que para períodos maiores a energia dissipada pela onda também aumenta, mesmo que a altura de onda permaneça constante.

Vale ressaltar que os valores de massa considerados nos gráficos são equivalentes à soma das massas dos equipamentos submersos com as massas adicionadas de ambos. Os cálculos das massas adicionadas podem ser verificados posteriormente no Item 6.1.3.

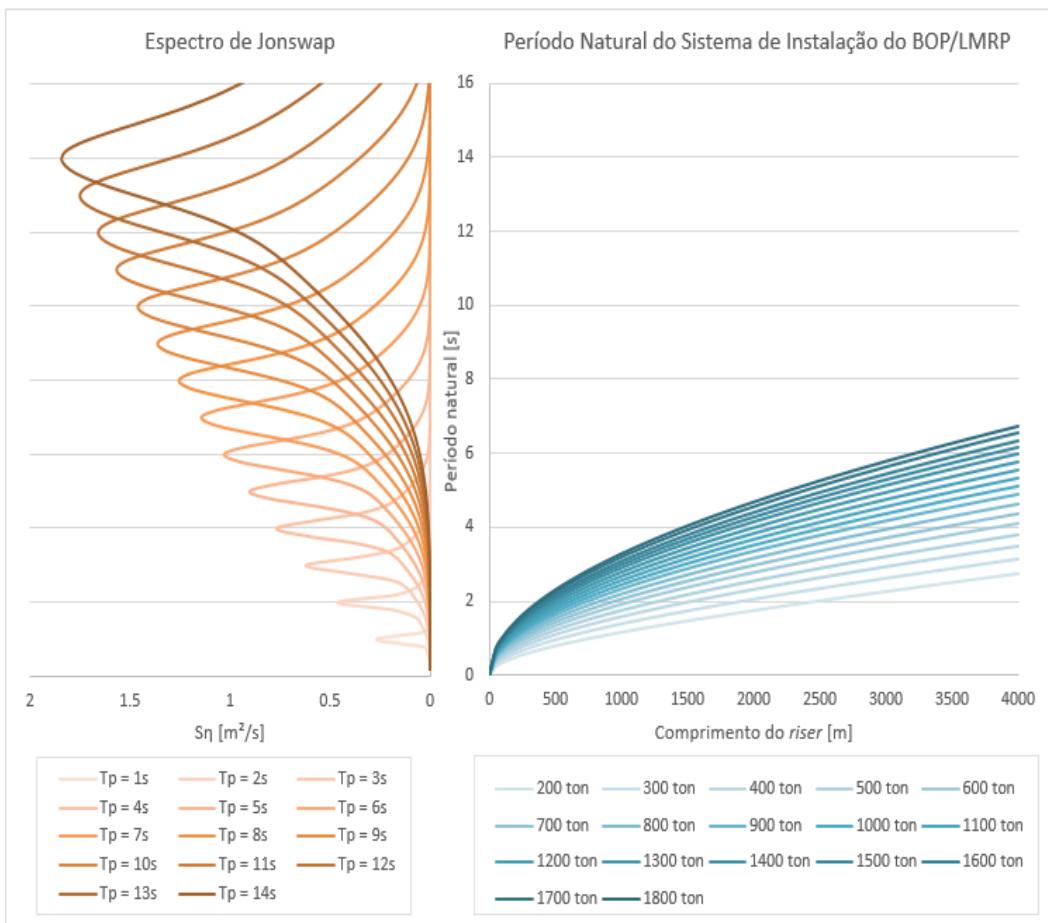


Figura 5.2 – Períodos naturais para sistemas de instalação de BOPs com diferentes profundidades e espectros de Jonswap para diferentes Tps

De acordo com os dados da Bacia de Campos pode-se constatar que os períodos de onda se encontram mais frequentemente na faixa entre 4 e 14 segundos. Sendo assim, pode-se verificar no gráfico apresentado que, segundo o estudo analítico, o sistema de lançamento de BOP/LMRP pode estar sujeito a sofrer efeitos de amplificação dinâmica devido à ocorrência de ressonância durante sua instalação em águas ultraprofundas. Por exemplo, considerando um BOP de 1800 toneladas, a profundidade crítica de ressonância poderia ocorrer a partir de 1500 metros.

Pode-se constatar também que na Bacia de Campos são encontradas ondas de até 3 metros com certa frequência, esse dado será utilizado na etapa de definição dos dados dos modelos do estudo de caso.

A Tabela 5.2 apresenta um resumo dos períodos de ressonância do sistema de instalação, ela mostra os resultados para determinados valores de comprimento de *riser* e determinadas massas dos equipamentos. Os valores destacados em vermelho representam os casos em que o período natural do sistema encontra-se dentro da faixa de períodos de pico da Bacia de Campos.

Tabela 5.2 – Resumo dos valores de período de ressonância para sistemas que utilizam a coluna de *riser*

Comprimento do <i>riser</i> (m)	Massa Total dos Equipamentos (ton)						
	600	800	1000	1200	1400	1600	1800
100	0.60	0.69	0.77	0.85	0.91	0.97	1.03
200	0.85	0.98	1.10	1.20	1.29	1.38	1.46
300	1.05	1.21	1.35	1.47	1.59	1.69	1.79
400	1.22	1.40	1.56	1.70	1.84	1.96	2.08
500	1.37	1.57	1.75	1.91	2.06	2.19	2.32
600	1.51	1.73	1.92	2.09	2.26	2.41	2.55
700	1.64	1.87	2.08	2.27	2.44	2.61	2.76
800	1.76	2.01	2.23	2.43	2.62	2.79	2.95
900	1.87	2.13	2.37	2.58	2.78	2.97	3.14
1000	1.98	2.26	2.50	2.73	2.94	3.13	3.31
1100	2.09	2.38	2.63	2.87	3.09	3.29	3.48
1200	2.19	2.49	2.76	3.00	3.23	3.44	3.64
1300	2.29	2.60	2.88	3.13	3.37	3.59	3.80
1400	2.22	2.57	2.87	3.14	3.39	3.63	3.85
1500	2.30	2.66	2.97	3.25	3.51	3.76	3.98
1600	2.38	2.74	3.07	3.36	3.63	3.88	4.12
1700	2.45	2.83	3.16	3.46	3.74	4.00	4.24
1800	2.52	2.91	3.25	3.56	3.85	4.12	4.36
1900	2.59	2.99	3.34	3.66	3.96	4.23	4.48
2000	2.66	3.07	3.43	3.76	4.06	4.34	4.60
2100	2.72	3.14	3.51	3.85	4.16	4.45	4.71
2200	2.79	3.22	3.60	3.94	4.26	4.55	4.83
2300	2.85	3.29	3.68	4.03	4.35	4.65	4.93
2400	2.91	3.36	3.76	4.12	4.45	4.75	5.04
2500	2.97	3.43	3.83	4.20	4.54	4.85	5.14
2600	3.03	3.50	3.91	4.28	4.63	4.95	5.25
2700	3.09	3.56	3.98	4.36	4.71	5.04	5.35
2800	3.14	3.63	4.06	4.45	4.80	5.13	5.44
2900	3.20	3.69	4.13	4.52	4.89	5.22	5.54
3000	3.25	3.76	4.20	4.60	4.97	5.31	5.64
3100	3.31	3.82	4.27	4.68	5.05	5.40	5.73
3200	3.36	3.88	4.34	4.75	5.13	5.49	5.82
3300	3.41	3.94	4.41	4.83	5.21	5.57	5.91
3400	3.46	4.00	4.47	4.90	5.29	5.66	6.00
3500	3.51	4.06	4.54	4.97	5.37	5.74	6.09
3600	3.56	4.12	4.60	5.04	5.44	5.82	6.17
3700	3.61	4.17	4.66	5.11	5.52	5.90	6.26
3800	3.66	4.23	4.73	5.18	5.59	5.98	6.34
3900	3.71	4.28	4.79	5.25	5.67	6.06	6.43
4000	3.76	4.34	4.85	5.31	5.74	6.13	6.51

5.5 Identificação dos RAOs de Movimento

A movimentação da unidade flutuante em resposta aos carregamentos ambientais de onda que atuam sobre seu casco pode ser verificada através de seus gráficos de RAO de movimento.

Os gráficos de RAO 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.

No estudo de caso deste trabalho o ponto de referência dos RAOs equivale à localização da mesa rotativa, que como pode ser verificado no Item 6.1.1, encontra-se posicionada no centro de movimento da embarcação, porém a uma distância de 37 metros em relação a sua extremidade inferior.

Sendo assim é necessário que se faça uma mudança no ponto de referência dos gráficos, já que inicialmente eles apontam para o centro de movimento da embarcação.

Os RAOs dos movimentos de *heave* relativos ao centro de movimento da embarcação e ao ponto equivalente à mesa rotativa, para ondas com incidência de 0° e 30° são apresentados nas Figuras 5.3 e 5.4 respectivamente.

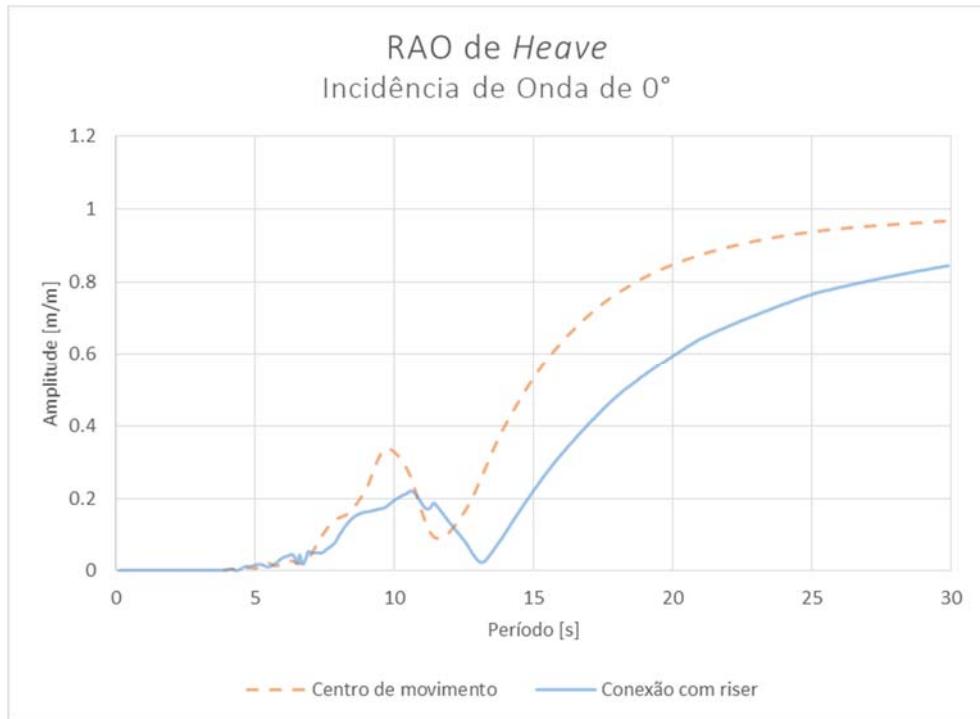


Figura 5.3 – RAOs de *heave* da sonda de perfuração para incidência de onda de 0°

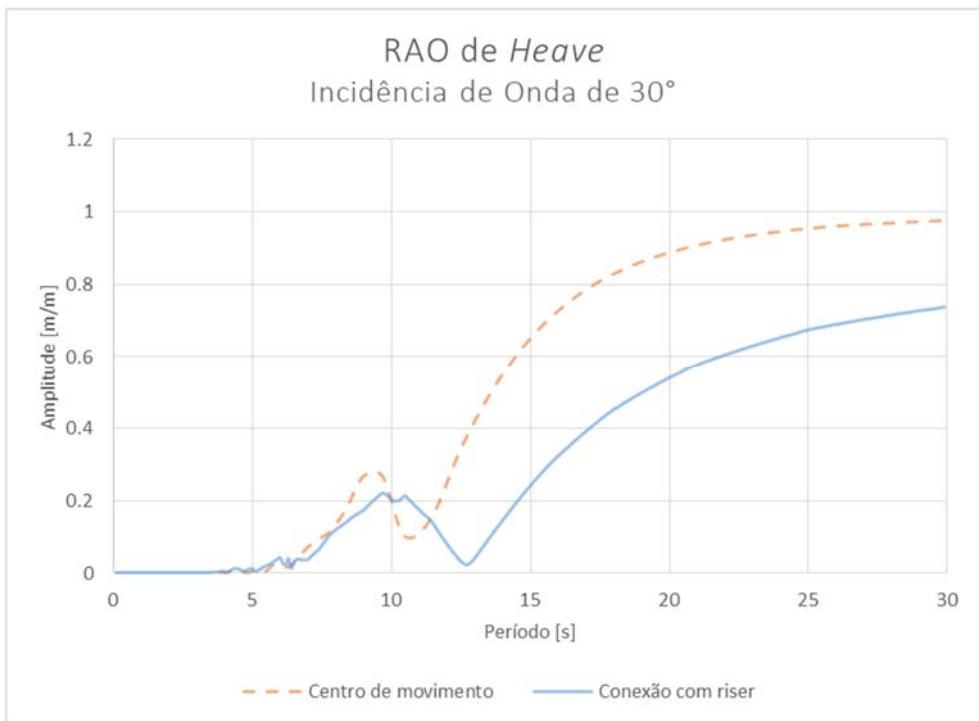


Figura 5.4 - RAOs de *heave* da sonda de perfuração para incidência de onda de 30°

5.6 Critérios para a Verificação do Processo de Instalação e Transporte do BOP/LMRP

Como já mencionado no Item 3.7, a instalação do conjunto BOP/LMRP é feita com a utilização da coluna de *riser*, assim como o transporte dos equipamentos. Tal procedimento é executado com o objetivo de reduzir o tempo de operação, já que, desta forma, ao final da instalação, o *riser* já se encontra posicionado e pronto para dar prosseguimento à perfuração do poço.

Outra vantagem da utilização da coluna de *riser* na instalação de equipamentos é sua elevada capacidade de carga, trata-se de um duto rígido, com 21 polegadas de diâmetro externo, composto por aço grau X65, que possui elevada tensão de escoamento, o que possibilita a instalação dos equipamentos em grandes profundidades.

Segundo a norma API 16Q [4] alguns critérios relacionados aos esforços atuantes na coluna de *riser* e aos deslocamentos verticais, que ocorrem nos equipamentos devido à influência de carregamentos ambientais, devem ser verificados para garantir que os procedimentos de instalação e transporte sejam executados sem riscos operacionais.

Não foi encontrada nenhuma norma que fornecesse os critérios específicos para o processo de instalação de equipamentos de perfuração, por isso foram utilizados os valores fornecidos pela norma API 16Q [4], que são referentes ao design, seleção, operação e manutenção de sistemas de perfuração.

Os itens desta seção têm o objetivo de apresentar os critérios de verificação da coluna de *riser* durante os procedimentos de instalação e transporte do BOP/LMRP.

5.6.1 Tensão Máxima Atuante no Riser

Por se tratar de *riser* do tipo rígido, que possui rigidez à flexão, a verificação do carregamento ao longo de seu comprimento deve levar em consideração esforços de tração e de momento, já que ambos geram esforços internos na linha. Além disso, deve-se notar que a tração efetiva não inclui os efeitos da pressão gerada devido à presença de fluido interno no *riser*, sendo assim, os cálculos de tensão devem levar em consideração a tração real, cujo valor é obtido através da Expressão (5.4).

$$T_r = T_{ef} - p_e A_e + p_i A_i \quad (5.4)$$

Onde T_r é a tração real, T_{ef} é a tração efetiva, 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*. Sendo assim, o valor da tensão máxima na seção de *riser* pode ser obtido por meio da Equação (5.5).

$$\sigma_{máx} = \frac{T_r}{A} + \frac{M D_e}{I} \frac{2}{2} \quad (5.5)$$

Onde T_r é a tração real, M é o momento fletor, A é a área da seção transversal, I é o momento de inércia e D_e é o diâmetro externo.

Para obter o valor máximo de tensão, a Equação (5.5) foi aplicada em todos os intervalos de tempo da análise dinâmica, possibilitando obter a relação mais desfavorável de tração e momento atuando de forma concomitante no *riser*.

Pôde-se constatar que, no caso da instalação os esforços máximos ocorrem no topo do *riser*, devido à inclusão da carga de peso próprio da linha, e por isso foi definido que os resultados a serem utilizados nesse estudo serão referentes a esse ponto.

Já no caso do transporte dos equipamentos o ponto de esforços máximos pode variar, podendo estar localizado no topo da coluna de riser ou no ponto em que ela atravessa a

superfície da água, sendo assim, nessa etapa serão analisados os esforços ao longo de todo comprimento do *riser*.

A tensão de escoamento do aço utilizado em colunas de *riser* de perfuração é de 448000 kN/m² e, segundo a norma API 16Q [4], a tensão máxima permitida durante qualquer tipo de operação com o *riser* é equivalente a 67% da tensão de escoamento do material, portanto o limite de tensão na coluna de *riser* deve respeitar as Expressões (5.7) e (5.8).

$$\sigma_y = 448000 \text{ kN/m}^2 \quad (5.6)$$

$$\sigma_{máx} \leq 0.67\sigma_y \quad (5.7)$$

$$\sigma_{máx} \leq 300160 \text{ kN/m}^2 \quad (5.8)$$

5.6.2 Verificação de Compressão na Coluna de *Riser*

Outro critério que deve ser verificado na etapa de instalação dos equipamentos é a ocorrência de esforços de compressão ao longo da linha durante o procedimento de instalação, o que pode ocorrer devido ao excesso de deslocamento dos equipamentos em zonas de ressonância. Para isso foram obtidos os esforços mínimos atuantes na parte mais inferior da linha, mais especificamente na conexão do *riser* com o LMRP, e foi verificado se tais esforços seriam de tração ou compressão.

5.6.3 Ângulo Máximo da *Lower Flex Joint*

Segundo a norma API 16Q [4] o ângulo máximo da *Lower Flex Joint* também deve ser verificado durante o procedimento de instalação, limitando-se ao valor de 3.6 graus em situações em que o *riser* está conectado ao LMRP porém a operação de perfuração não está sendo executada.

5.6.4 Deslocamento do BOP/LMRP

O critério de deslocamentos máximos dos equipamentos está diretamente relacionado com os critérios de esforços. Seus casos mais críticos ocorrem nas chamadas zonas de ressonância, trechos de descida em que o estado de mar atuante na embarcação pode apresentar período equivalente ao período de ressonância do sistema de instalação, o que pode causar uma amplificação dos movimentos verticais do conjunto de equipamentos pendurado.

Outra situação que pode apresentar resultados críticos relacionados ao deslocamento dos equipamentos ocorre quando o período das ondas é equivalente ao período em que ocorre maior amplificação dos movimentos de *heave* da embarcação. Essa informação pode ser obtida através dos gráficos de RAO apresentados na Seção 5.5. Neste caso a amplificação dos movimentos da sonda pode resultar na ocorrência de deslocamentos elevados nos equipamentos conectados à coluna de *riser*.

5.6.5 Limitações Operacionais no Processo de Transporte do BOP/LMRP

No caso do processo de transporte do BOP/LMRP, a recomendação prática [41] define ainda limitações operacionais para o processo de movimentação com BOP suspenso, sendo elas:

- O ângulo no topo do *riser* deve ser limitado a 2.5 graus para evitar que equipamentos como a *flexjoint* superem seu limite angular;
- Durante a movimentação da sonda, a velocidade do *riser* deve se manter abaixo de 0.3 nós (0.56 km/h) em relação à velocidade da maior parte do perfil de corrente atuante;

Deve-se ressaltar que o objetivo deste trabalho é fazer o estudo do procedimento de transporte do BOP/LMRP com a utilização de velocidades superiores à recomendada.

5.7 Construção do Modelo de Instalação do BOP/LMRP

Os modelos do estudo de caso foram feitos de forma a representar todos os componentes do sistema de instalação de BOP/LMRP e assim gerar resultados que simulem de forma satisfatória o cenário real.

A embarcação foi modelada com a utilização dos gráficos de RAO apresentados no Item 5.5 e com dados de massa estrutural obtidos de sondas de perfuração usualmente utilizadas nesse tipo de procedimento. O modelo da embarcação utilizado no estudo de caso pode ser verificado na Figura 5.5.

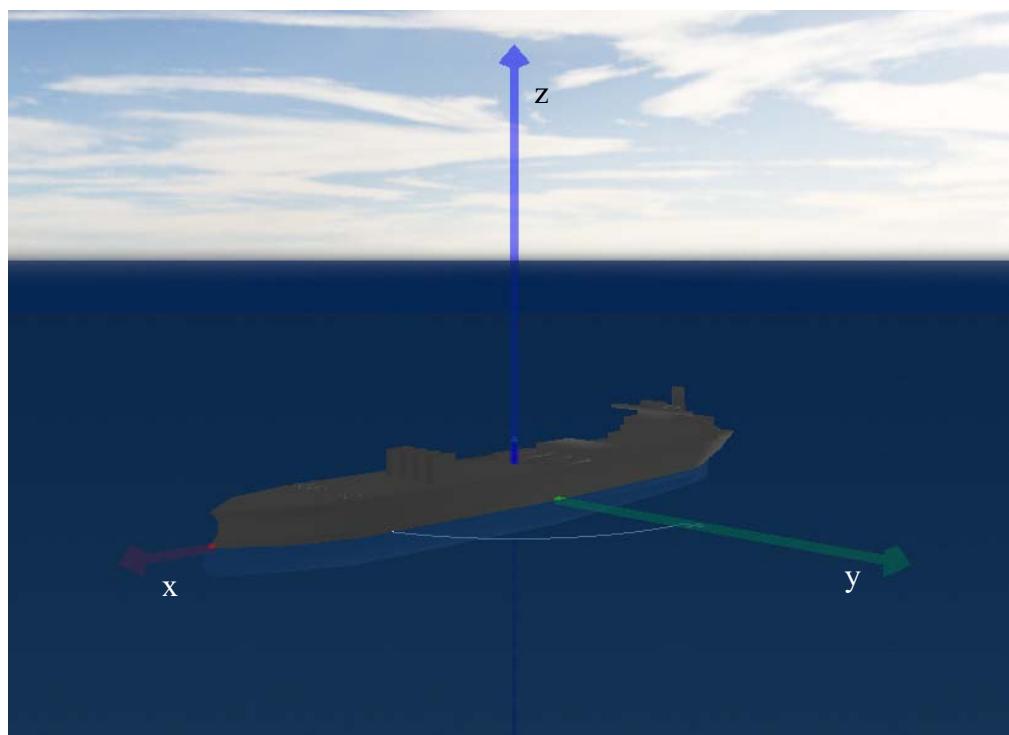


Figura 5.5 – Modelo no software SITUA da embarcação de lançamento utilizada no estudo de caso

A conexão da coluna de *riser* com a embarcação foi feita de forma a representar o apoio do *riser* na mesa rotativa. Para isso foi modelado um conector posicionado no centro da embarcação, onde o *riser* foi conectado com seus movimentos de translação e rotação em z fixados e seus movimentos de rotação em x e y livres (de acordo com o sistema de coordenadas apresentado na Figura 5.5). Esta aproximação foi feita pois a ligação entre o *riser* e a mesa rotativa não possui rigidez suficiente para ser considerada um engaste.

Os flutuadores da coluna de *riser* foram modelados com diâmetro constante ao longo de todo seu comprimento. O valor do diâmetro utilizado foi definido a partir dos casos obtidos na literatura, tomando sua média aproximada. Esta simplificação pode ser aplicada pois o estudo do projeto otimizado do conjunto de flutuadores não é o foco do trabalho.

Os conjuntos BOP/LMRP foram modelados como corpo rígido no formato de um paralelepípedo e conectados ao trecho final da linha de instalação, a Figura 5.6 apresenta o modelo dos equipamentos no SITUA 2. O centro de gravidade foi considerado como

equivalente ao centro geométrico do paralelepípedo (a meia altura, meia largura e meio comprimento). Os coeficientes hidrodinâmicos foram definidos de acordo com as Tabelas 5.3 e 5.4, fornecidas por [43] para prismas com base quadrada.

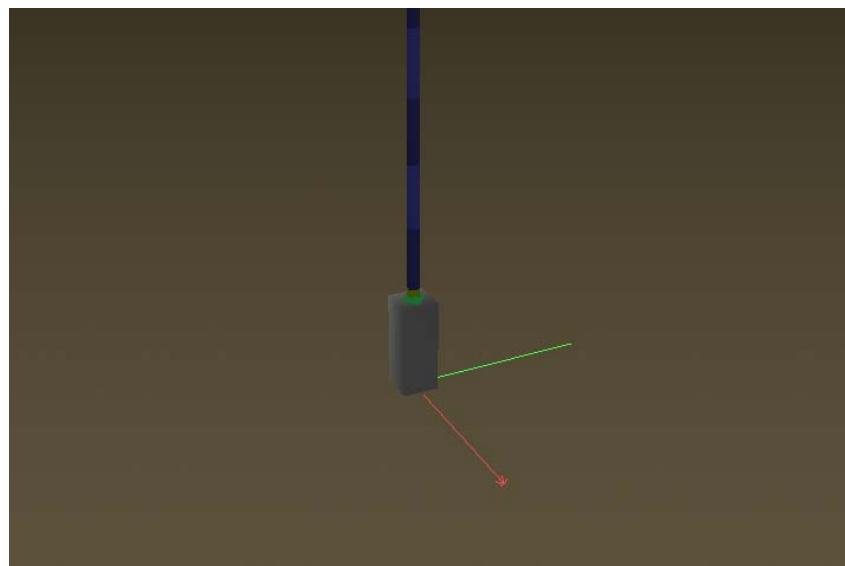
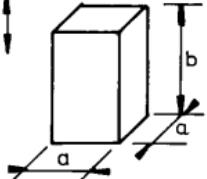


Figura 5.6 - Modelo no software SITUA do conjunto de equipamentos utilizado no estudo de caso

Tabela 5.3 - Valores de coeficiente de arrasto para prismas com base quadrada [43]

Table B-2		
Drag coefficient on three-dimensional objects for steady flow C_{DS} . Drag force is defined as $F_D = \frac{1}{2}\rho C_{DS} S u^2$.		
Geometry	Dimensions	C_{DS}
Square rod parallel to flow	L/D	
	1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 4.0 5.0	1.15 0.97 0.87 0.90 0.93 0.95 0.95
		$R_e = 1.7 \cdot 10^5$

Tabela 5.4 – Valores de coeficiente de massa adicionada para prismas com base quadrada [43]

Table A-2 Analytical added mass coefficient for three-dimensional bodies in infinite fluid (far from boundaries). Added mass is $A_{ij} = \rho C_A V_R$ [kg] where V_R [m ³] is reference volume					
Body shape		Direction of motion	C_A		V_R
Square prisms		Vertical	b/a		
			1.0	0.68	$a^2 b$
			2.0	0.36	
			3.0	0.24	
			4.0	0.19	
			5.0	0.15	
			6.0	0.13	
			7.0	0.11	
			10.0	0.08	

A massa adicionada foi calculada a partir de (5.9).

$$m_{adic} = C_A \rho_w V_{eq} \quad (5.9)$$

Onde ρ_w representa a massa específica da água do mar e V_{eq} representa o volume total do equipamento em questão.

Os raios de giração foram calculados considerando as dimensões utilizadas nos equipamentos a partir de expressões para paralelepípedo fechado, como pode ser verificado nas expressões (5.10), (5.11) e (5.12).

$$RG_{xx} = \sqrt{\frac{y^2 + z^2}{12}} \quad (5.10)$$

$$RG_{yy} = \sqrt{\frac{x^2 + z^2}{12}} \quad (5.11)$$

$$RG_{zz} = \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{12}} \quad (5.12)$$

A simulação do procedimento de instalação, conta com modelos desacoplados, com comprimento da coluna de *riser* fixo durante todo o processo de análise estática e dinâmica. Este procedimento é o mais apropriado pois fornece resultados para uma situação crítica de instalação, a interrupção do procedimento de descida em uma profundidade crítica. Esta situação que pode ocorrer devido a uma pane em algum equipamento, ou por outros problemas no processo de instalação. Sendo assim, para um

mesmo caso serão feitos diversos modelos, variando o comprimento do *riser* entre eles de forma que cada um represente uma etapa da descida dos equipamentos.

Os carregamentos ambientais serão compostos por ondas irregulares com altura e períodos de pico comuns para a Bacia de Campos. Carregamentos de vento e correnteza não serão verificados nessa etapa do projeto por terem pouca ou nenhuma influência na operação.

5.8 Construção do Modelo de Transporte do BOP/LMRP

O modelo do estudo de transporte do BOP/LMRP foi feito de forma similar ao modelo de instalação dos equipamentos apresentado na Seção 5.7. Nota-se que em ambos os casos os equipamentos estão conectados apenas à coluna de *riser* e não possuem nenhum outro tipo de apoio, ou seja transferem toda sua carga para a linha, que a transfere para a unidade flutuante. A Figura 5.7 apresenta o modelo do sistema completo de transporte e instalação utilizado no estudo de caso.

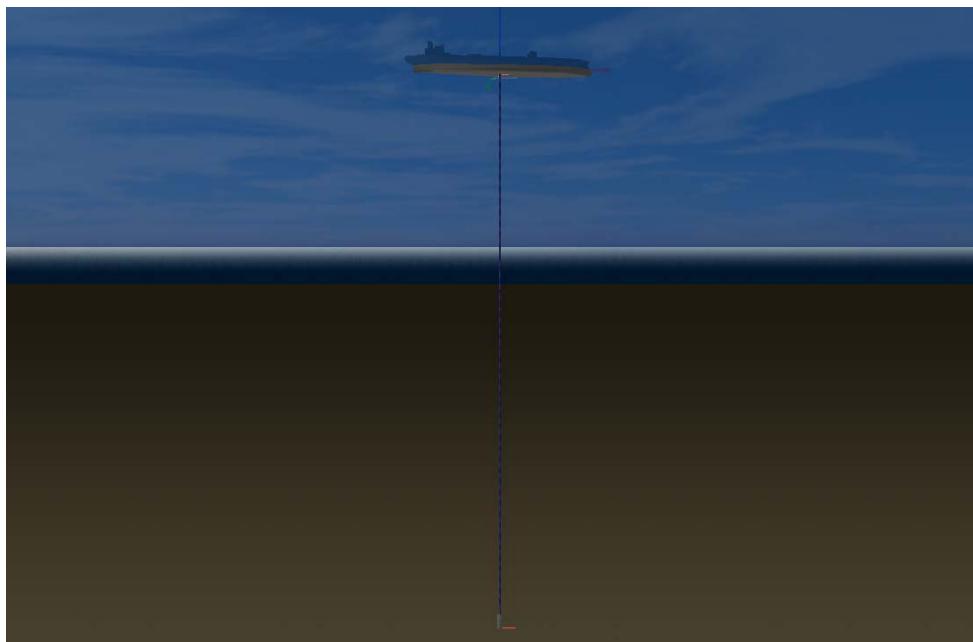


Figura 5.7 – Modelo no software SITUA do sistema de instalação e transporte do BOP/LMRP

A embarcação, o *riser* e os equipamentos utilizados nessa etapa do estudo são os mesmos selecionados para a etapa de instalação e seus dados encontram-se apresentados no Capítulo 6.

Em um cenário real, a extremidade da coluna de *riser* que está conectada à sonda (nó 1), através de uma *hydraulic spider*, pode exercer movimentos limitados de translação horizontal durante o transporte do BOP/LMRP suspenso, porém para representar essa conexão de forma apropriada seria necessária a modelagem de molas não lineares, capazes de exercer deformação até um valor determinado [38]. Para simplificar os estudos, foi definido que os movimentos de translação (horizontal e vertical) não serão permitidos nesse ponto da coluna de *riser*.

Os graus de liberdade de rotação não serão restringidos. Essa definição também é uma aproximação do cenário real, já que, devido à conexão com a *hydraulic spider*, os movimentos de rotação também são limitados a um ângulo máximo.

Na extremidade inferior da coluna de *riser* (nó 2) a *lower flex joint* foi modelada como *riser* flexível, sendo assim, as condições de contorno na conexão do *riser* com o LMRP são todas fixas, tanto para translação, quanto para rotação.

A Tabela 5.5 apresenta as condições de contorno utilizadas no modelo do SITUA2-Prosim. O sistema de coordenadas utilizado pode ser verificado na Figura 5.5.

Tabela 5.5 – Condições de contorno nas extremidades da coluna de *riser*

Condição de Contorno	Nó 1	Nó 2
X	Fixo	Fixo
Y	Fixo	Fixo
Z	Fixo	Fixo
RX	Livre	Fixo
RY	Livre	Fixo
RZ	Fixo	Fixo

Nessa etapa é importante que sejam analisados os esforços provenientes da ação das ondas na embarcação e também devido à ação da correnteza na coluna de *riser*.

A atuação das ondas no casco pode gerar movimentos verticais acentuados nos equipamentos, o que pode resultar no surgimento de esforços excessivos que podem causar danos na linha.

A correnteza influencia no surgimento de momentos fletores ao longo da coluna de *riser*, estes momentos podem resultar num aumento significativo da tensão máxima atuante no *riser* e pode levar o sistema a ultrapassar os limites impostos pela norma.

Sendo assim, essa etapa do estudo irá contar com casos de carregamento que incluem a atuação de ondas irregulares, com altura e período variados, e correnteza aplicada ao longo do *riser*.

Foi constatado que a melhor forma de simular o deslocamento da sonda de perfuração é através da inserção de um perfil de corrente uniforme ao longo do *riser* com velocidade equivalente à velocidade de movimentação da sonda. Pode-se notar que, no transporte dos equipamentos suspensos, o caso mais crítico ocorre quando a movimentação da sonda é contrária à correnteza que está sendo aplicada no *riser*, por isso foi definido que esse será o cenário estudado.

Os valores definidos para correnteza e velocidade da sonda podem ser verificados nas Seções 6.4 e 6.5.

6 ESTUDO DE CASO

6.1 Dados dos Componentes do Sistema de Perfuração

Nesta seção são apresentados os dados que foram utilizados na elaboração dos modelos que irão compor o estudo de caso.

Os principais elementos a serem modelados são: a sonda de perfuração; o *riser* de perfuração; e o equipamento BOP/LMRP. Suas características físicas e hidrodinâmicas estão apresentadas nos Itens 6.1.1, 6.1.2 e 6.1.3 respectivamente.

6.1.1 Sonda de Perfuração

Para o estudo de caso foi utilizado um navio sonda. Esse tipo de embarcação foi escolhido devido à sua capacidade de executar a instalação de equipamentos submarinos em lâminas d'água ultraprofundas, assim como já mencionado no Item 2.2.3.

Os dados fornecidos pelas Tabelas 6.1 e 6.2 estão de acordo com as coordenadas locais da sonda de perfuração, respeitando o sistema de coordenadas apresentado na Figura 6.1, estando a origem posicionada no centro de gravidade da sonda.

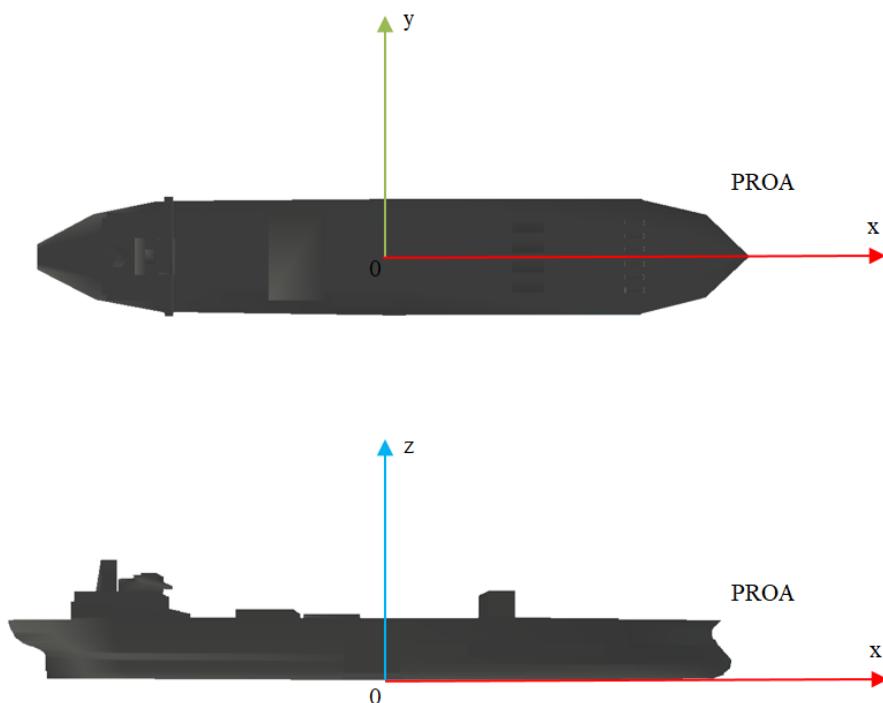


Figura 6.1 – Sistema de coordenadas utilizado para a definição dos dados da sonda de perfuração

A Tabela 6.1 apresenta os principais dados da plataforma

Tabela 6.1 – Dados da sonda de perfuração

Dados da Sonda de Perfuração		
Volume (m ³)		88453.7
Calado (m)		12.0
Coordenadas do centro de gravidade (m)	X	-3.05
	Y	0.0
	Z	16.03
Coordenadas do centro de empuxo (m)	X	-6.1
	Y	0.0
	Z	6.0

Durante a operação de instalação de BOP o *riser* de perfuração fica apoiado na mesa rotativa, localizada na torre de lançamento da embarcação. O conjunto torre/mesa rotativa será representado no modelo de instalação através do ponto de conexão do *riser* com a sonda, por isso é necessário que sejam definidas as coordenadas deste ponto, assim como apresentado na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Dados do posicionamento da mesa rotativa na sonda de perfuração

Localização da Mesa Rotativa		
Coordenadas locais do ponto de conexão (m)	X	0.0
	Y	0.0
	Z	37.0

6.1.2 *Riser* de Perfuração

De acordo com [8], as características do *riser* de perfuração, assim como seus valores de tração de topo, devem ser definidas de forma que, durante todo o procedimento de perfuração do poço, sua resposta aos carregamentos ambientais aplicados seja satisfatória em relação aos fatores explicitados pela norma. Os critérios a serem considerados são:

- valores dos ângulos da junta flexível inferior e da junta telescópica do sistema de perfuração;
- valores das trações obtidas ao longo do *riser* durante a operação;

- resistência do *riser* à flexão e ao colapso hidrostático;
- esforços transmitidos pelo *riser* para o BOP e para a cabeça de poço.

O *riser* de perfuração pode operar em três modos distintos [8]:

- Modo de perfuração – situação em que as condições ambientais e do poço são tais que as operações usuais de perfuração podem ser conduzidas de forma segura.
- Modo conectado sem perfuração – neste caso apenas as operações de circulação podem ser executadas, visto que o *riser* está impedido de ser rotacionado e deve estar preparado para a necessidade de uma eventual desconexão.
- Modo desconectado – ocorre nos casos em que as condições ambientais excedem os limites definidos por norma para a execução de operações com segurança.

Os dados do *riser* que será utilizado nos modelos do estudo de caso (Tabela 6.3) foram definidos de acordo com valores usualmente utilizados em operações de perfuração, para que a princípio não haja violação de nenhum dos parâmetros especificados pela norma.

Durante os procedimentos que serão estudados, o *riser* de perfuração deve se encontrar preenchido com água do mar, sendo assim, no modelo estudado, foi adicionado fluido interno com peso específico de 10.025 kN/m³ em seu interior.

A coluna de *riser* foi modelada com dois trechos. O trecho inferior, com comprimento de 425 metros, não faz utilização de flutuadores, sendo assim seu peso submerso equivale apenas ao peso do duto, como pode ser verificado na Tabela 6.3. Já o trecho superior foi modelado com a utilização de flutuadores, baseada em modelos reais encontrados na literatura. Como o estudo do projeto otimizado do conjunto de flutuadores não é o foco deste trabalho foi definida uma configuração com dados constantes ao longo de todo o trecho da coluna de *riser*.

Na modelagem também será incluído um trecho equivalente à *lower flex joint*, dispositivo que, como citado no Item 2.4.3, possui o objetivo de permitir o desalinhamento angular entre dois trechos do sistema. No modelo o dispositivo será representado por um segmento de linha flexível inserido no ponto de conexão do *riser*.

de perfuração com equipamento LMRP. O segmento possui propriedades equivalentes às do dispositivo. Tais propriedades podem ser verificadas na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Dados da Coluna de Riser

Coluna de Riser	
Segmento 1 (<i>lower flex joint</i>)	
Comprimento (m)	2.067
Diâmetro Externo (m)	1.4732
Diâmetro Interno (m)	0.4763
Coeficiente de Poisson	0.3
Peso no Ar (kN/m)	69.455
Peso na Água (kN/m)	58.4922
Rigidez à Flexão [EI] (kN.m ²)	976.8
Rigidez à Torção [GJ] (kN.m ²)	36942248.4
Rigidez Axial [EA] (kN)	320549168.4
Peso específico do Fluido Interno (kN/m ³)	10.25
Segmento 2 (trecho inferior da coluna de riser)	
Comprimento (m)	425
Diâmetro Externo (m)	0.533
Diâmetro Interno (m)	0.492
Coeficiente de Poisson	0.3
Peso no ar (kN/m)	2.5415
Peso na água (kN/m)	0.2987
Rigidez à Flexão [EI] (kN.m ²)	220336
Rigidez à Torção [GJ] (kN.m ²)	176269
Rigidez Axial [EA] (kN)	6700290
Peso específico do Fluido Interno (kN/m ³)	10.25
Segmento 3 (trecho superior da coluna de riser)	
Comprimento (m)	Varia de acordo com a profundidade de instalação
Diâmetro Externo (m)	0.533
Diâmetro Interno (m)	0.492
Coeficiente de Poisson	0.3
Peso no ar (kN/m)	2.5415
Peso na água (kN/m)	-1.5
Rigidez à Flexão [EI] (kN.m ²)	220336
Rigidez à Torção [GJ] (kN.m ²)	176269
Rigidez Axial [EA] (kN)	6700290
Peso específico do Fluido Interno (kN/m ³)	10.25

A Figura 6.2 apresenta um desenho esquemático dos trechos da coluna de riser cujos dados estão demonstrados na Tabela 6.3.

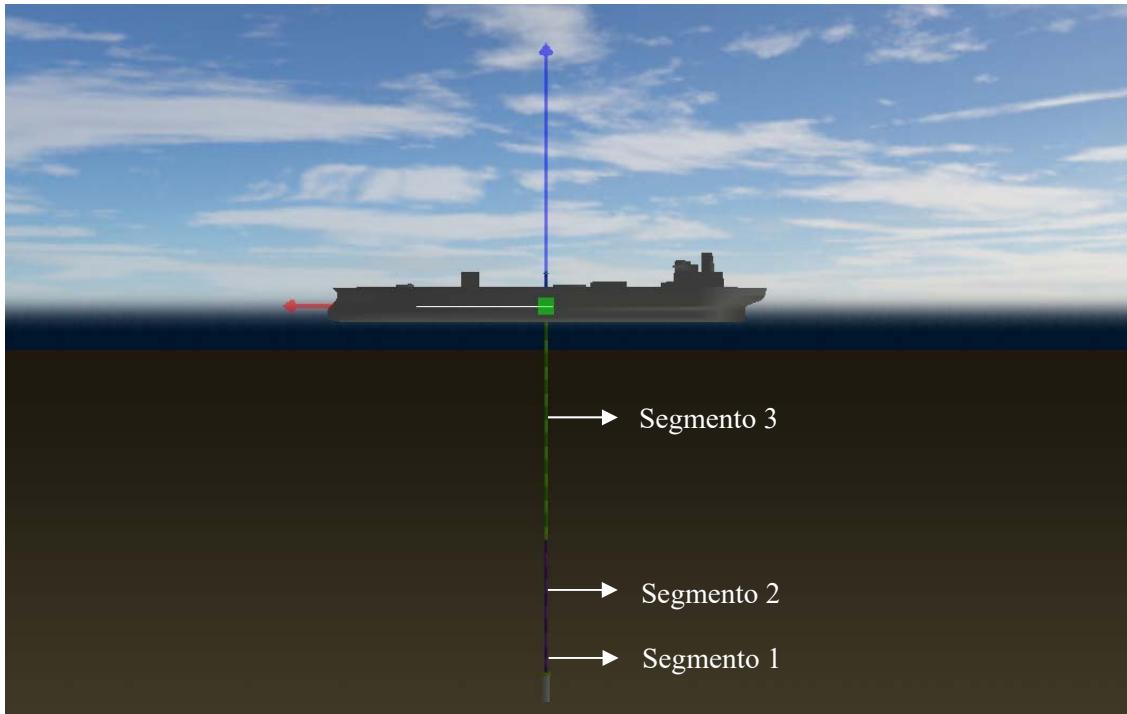


Figura 6.2 – Desenho representativo dos trechos da coluna de *riser* com diferentes materiais

6.1.3 BOP/LMRP

Para o estudo da instalação dos equipamentos serão utilizados dois conjuntos BOP/LMRP, um com dimensões medianas (Conjunto 1) e um com dimensões equivalentes às maiores obtidas na literatura (Conjunto 2), de acordo com [44]. Já para o estudo de transporte será utilizado apenas o conjunto de equipamentos com dimensões medianas (Conjunto 1).

Os dados fornecidos pelas Tabelas 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9 estão de acordo com as coordenadas locais do conjunto BOP/LMRP, respeitando o sistema de coordenadas apresentado na Figura 6.3. A origem do sistema está posicionada na base do BOP, à meia largura e meio comprimento do corpo rígido que representa o conjunto de equipamentos.

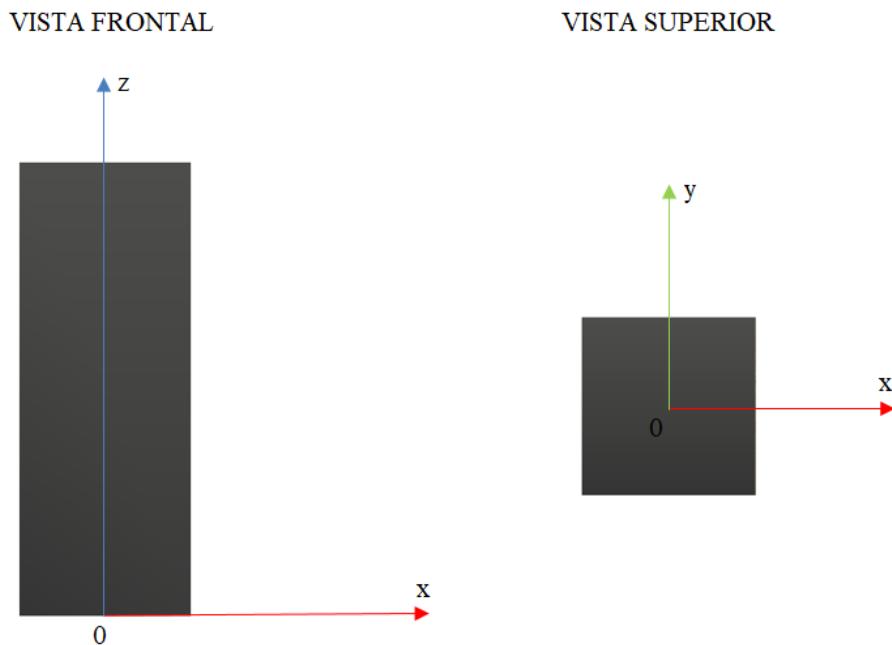


Figura 6.3 – Sistema de coordenadas utilizado para a definição dos dados do BOP e do LMRP

O conjunto de equipamentos 1 possui dimensões e massa equivalentes a equipamentos usualmente utilizados em projetos atuais para a perfuração de poços no Brasil, são equipamentos que podem ser utilizados na perfuração da camada pré-sal e que contam com um BOP de 6 gavetas. Os dados relativos a esses equipamentos podem ser verificados nas Tabelas 6.4 e 6.5.

Tabela 6.4 – Dados do BOP do primeiro conjunto de equipamentos

Dados do BOP		
Peso no Ar (kN)		2446.52
Peso na Água (kN)		2123.58
Dimensões (m)	Comprimento	5.90
	Largura	5.90
	Altura	8.03
Coordenadas do Centro de Gravidade (m)	X	2.95
	Y	2.95
	Z	4.02

Tabela 6.5 – Dados do LMRP do primeiro conjunto de equipamentos

Dados do LMRP		
Peso no Ar (kN)		1578.67
Peso na Água (kN)		1370.05
Dimensões (m)	Comprimento	5.90
	Largura	5.90
	Altura	7.29
Coordenadas do Centro de Gravidade (m)	X	2.95
	Y	2.95
	Z	11.68

Com o objetivo de representar os maiores equipamentos BOP e LMRP já projetados foi definido o conjunto de equipamentos 2. As dimensões e peso desse conjunto foram escolhidas de acordo com [44] e representam uma nova geração de equipamentos de perfuração capazes de operar submetidos a pressões de até 130000 kN/m².

As Tabelas 6.6 e 6.7 representam os dados obtidos em [44] para o BOP e LMRP respectivamente.

Tabela 6.6 - Dados do BOP do segundo conjunto de equipamentos

Dados do BOP		
Peso no Ar (kN)		3696
Peso na Água (kN)		3252.48
Dimensões (m)	Comprimento	6.1
	Largura	6.1
	Altura	12.1
Coordenadas do Centro de Gravidade (m)	X	3.05
	Y	3.05
	Z	6.05

Tabela 6.7 - Dados do LMRP do segundo conjunto de equipamentos

Dados do LMRP		
Peso no Ar (kN)		2309
Peso na Água (kN)		2031.92
Dimensões (m)	Comprimento	6.1
	Largura	6.1
	Altura	7.6
Coordenadas do Centro de Gravidade (m)	X	2.813
	Y	2.813
	Z	15.9

A modelagem dos equipamentos no software de análise estrutural SITUA-Prosim foi feita com a utilização de um só corpo rígido representando o BOP e o LMRP, tal adaptação pôde ser feita pois, como pode ser verificado na Figura 2.16, ambos os equipamentos estão totalmente acoplados durante sua instalação e, devido a isso, seus coeficientes hidrodinâmicos devem ser calculados em conjunto, além disso o objetivo deste trabalho não é obter as tensões nos equipamentos, mas na coluna de *riser*, o que permite que essa simplificação seja utilizada.

Sendo assim, as Tabelas 6.8 e 6.9 representam os dados referentes a cada um dos conjuntos de equipamentos estudados, de acordo com o que foi modelado no programa.

Tabela 6.8 – Dados do conjunto 1 de equipamentos modelado no software SITUA para o estudo de caso

Dados do Conjunto 1 de BOP/LMRP		
Peso no Ar (kN)		4025.19
Peso na Água (kN)		3493.63
Dimensões (m)	Comprimento	5.90
	Largura	5.90
	Altura	15.32
Coordenadas do Centro de Gravidade (m)	X	2.95
	Y	2.95
	Z	6.61
Raio de Giração (m)	XX	4.739
	YY	4.739
	ZZ	2.409
Coeficiente de Arrasto Longitudinal (Cd)		0.903
Coeficiente de Massa Adicional Longitudinal (Ca)		0.28
Massa Adicional Longitudinal (ton)		152.936

Tabela 6.9 - Dados do conjunto 2 de equipamentos modelado no software SITUA para o estudo de caso

Dados do Conjunto 2 de BOP/LMRP		
Peso no Ar (kN)		6005
Peso na Água (kN)		5284.4
Dimensões (m)	Comprimento	6.1
	Largura	6.1
	Altura	19.7
Coordenadas do Centro de Gravidade (m)	X	3.05
	Y	3.05
	Z	9.83
Raio de Giração (m)	XX	5.953
	YY	5.953
	ZZ	2.49
Coeficiente de Arrasto Longitudinal (Cd)		0.942
Coeficiente de Massa Adicional Longitudinal (Ca)		0.228
Massa Adicional Longitudinal (ton)		171.585

As Figuras 6.4 (a) e 6.4 (b) apresentam as modelagens dos equipamentos no SITUA. O trecho de linha conectado ao equipamento na cor verde representa a *lower flex joint* e o trecho em azul equivale ao *riser* de perfuração.

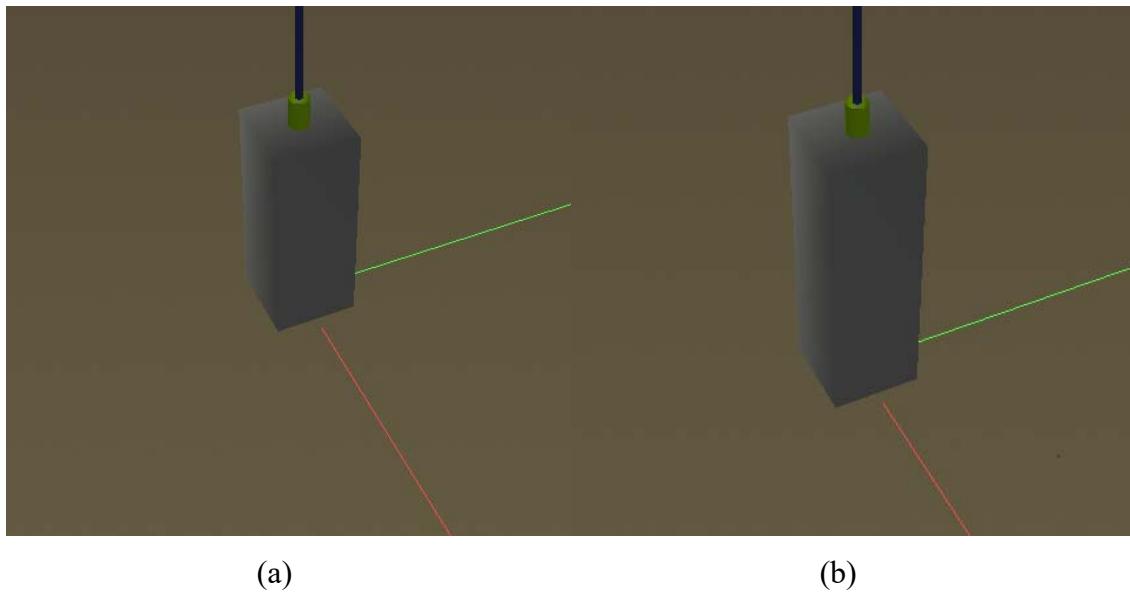


Figura 6.4 – (a) Modelo no software SITUA do conjunto 1 (b) Modelo no software SITUA do conjunto 2

6.2 Profundidades Estudadas na Instalação dos Equipamentos

Como já mencionado na Seção 5.7 as análises do processo de instalação do BOP/LMRP foram executadas em etapas. Cada etapa do processo corresponde a um modelo onde o comprimento da coluna de *riser* é definido e se mantém fixo durante todo o período de análise.

A profundidade máxima de estudo foi definida com base no recorde de perfuração já registrado mundialmente, trata-se do poço Raya-1, localizado em zona de águas ultra-profundas, a 250km da costa do Uruguai. O poço possui lâmina d'água de 3400 metros e, segundo [23 e 24], é esperado que entre em operação no ano de 2021.

Sendo assim, foram definidas sete profundidades de estudo, cada uma correspondente a um determinado valor de comprimento da coluna de *riser*. As profundidades estudadas são iguais para os dois modelos de sistema de instalação, seus valores variam entre 1000 e 4000 metros, a cada 500 metros. Os valores das profundidades, assim como dos comprimentos de *riser* equivalentes podem ser verificados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 – Valores de profundidade e comprimento de *riser* do estudo de caso de instalação

Profundidade do Topo do Equipamento (m)	Comprimento da coluna de <i>riser</i> (m)
1000	1025
1500	1525
2000	2025
2500	2525
3000	3025
3500	3525
4000	4025

6.3 Comprimento do *Riser* para Transporte do BOP

Para a execução do estudo de transporte do BOP/LMRP suspenso deve ser definido o comprimento que será adotado para o *riser* durante a operação. Nota-se que este comprimento deve se manter constante durante todo o trajeto. Devido a isso, durante o projeto do transporte do BOP/LMRP suspenso, é necessário que o trajeto a ser percorrido pela sonda seja previamente definido e deve-se ter conhecimento da batimetria exata deste percurso, além de possíveis instalações *offshore* pré existentes.

Assim, é possível definir o comprimento de *riser* necessário para que a operação seja executada com segurança.

Para o estudo de caso serão utilizadas três profundidades de posicionamento para os equipamentos, sendo elas:

- 1000 m
- 1500 m
- 3000 m

A partir destes valores é possível calcular o comprimento da coluna de *riser* em cada um dos casos através da Equação (6.1).

$$C_r = P - h_{eq} + d_m \quad (6.1)$$

Onde P é a profundidade do equipamento, h_{eq} é a altura do equipamento e d_m é a distância da lâmina d'água até a mesa rotativa

A Tabela 6.11 apresenta as profundidades estudadas e seus respectivos comprimentos de *riser*.

Tabela 6.11 - Valores de profundidade e comprimento de *riser* do estudo de caso de transporte

Profundidade do Fundo do Equipamento (m)	Comprimento da coluna de <i>riser</i> (m)
1000	1023
1500	1523
3000	3023

6.4 Casos de Carregamento

6.4.1 Procedimento de Instalação do BOP/LMRP

Segundo os itens 3.4.2.22 e 3.4.2.23 da norma DNV-RP-H103 [43], para o cálculo das solicitações atuantes na embarcação devido a forças provenientes de ondas deve ser considerada a faixa de períodos de cruzamento zero (T_z), representada pela equação (6.2). Substituindo o valor da altura de onda ($H_s = 3m$) na equação temos o intervalo (6.3).

$$8.9 \sqrt{\frac{H_s}{g}} \leq T_z \leq 13 \quad (6.2)$$

$$4.92 \leq T_z \leq 13 \quad (6.3)$$

A equação (6.4) representa a relação entre o período médio de cruzamento zero (T_z) e o período de pico (T_p) do espectro de Jonsswap.

$$T_z = T_p \sqrt{\frac{5 + \gamma}{10.89 + \gamma}} \quad (6.4)$$

$$\gamma = 6.4 T_p^{-0.491} \quad (6.5)$$

O intervalo equivalente ao representado por (6.3) para períodos de pico e com valores arredondados pode ser verificado em (6.6).

$$5 \leq T_p \leq 17 \quad (6.6)$$

Considerando que para o estudo serão utilizados dados de carregamento baseados nos encontrados na Bacia de Campos, o Item 3.4.2.23 da norma permite que esse intervalo seja reduzido, desde que o novo intervalo inclua todos os casos críticos da operação estudada. Sendo assim o intervalo considerado no estudo foi representado em (6.7).

$$5 \leq T_p \leq 14 \quad (6.7)$$

O intervalo entre os períodos considerados foi de 1 segundo, a altura das ondas foi de 3 metros e serão consideradas ondas com incidência de 0 e 30 graus em relação à proa da embarcação. Sendo assim os casos de onda podem ser verificados na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 – Estados de mar utilizados no estudo de caso de instalação do BOP/LMRP

Casos de Carregamento – Estados de Mar				
Caso	Altura (m)	Período (s)	Incidência (°)	Gama
1	3.0	5	0	2.90393
2	3.0	6	0	2.65526
3	3.0	7	0	2.46171
4	3.0	8	0	2.30549
5	3.0	9	0	2.17594
6	3.0	10	0	2.06624
7	3.0	11	0	1.97177
8	3.0	12	0	1.88930
9	3.0	13	0	1.81649
10	3.0	14	0	1.75158
11	3.0	5	30	2.90393
12	3.0	6	30	2.65526
13	3.0	7	30	2.46171
14	3.0	8	30	2.30549
15	3.0	9	30	2.17594
16	3.0	10	30	2.06624
17	3.0	11	30	1.97177
18	3.0	12	30	1.88930
19	3.0	13	30	1.81649
20	3.0	14	30	1.75158

6.4.2 Procedimento de Transporte do BOP/LMRP

A Figura 6.5 apresenta a esquematização de um sistema de transporte de BOP/LMRP e dos carregamentos ambientais que atuam sobre ele durante a operação.

Neste trabalho serão estudados os esforços provenientes dos carregamentos de onda, atuando na embarcação, e de corrente, atuando no *riser*. Nota-se que, além desses carregamentos, o sistema é submetido aos carregamentos provenientes da movimentação da sonda de perfuração. Esse tópico será abordado na Seção 6.5.

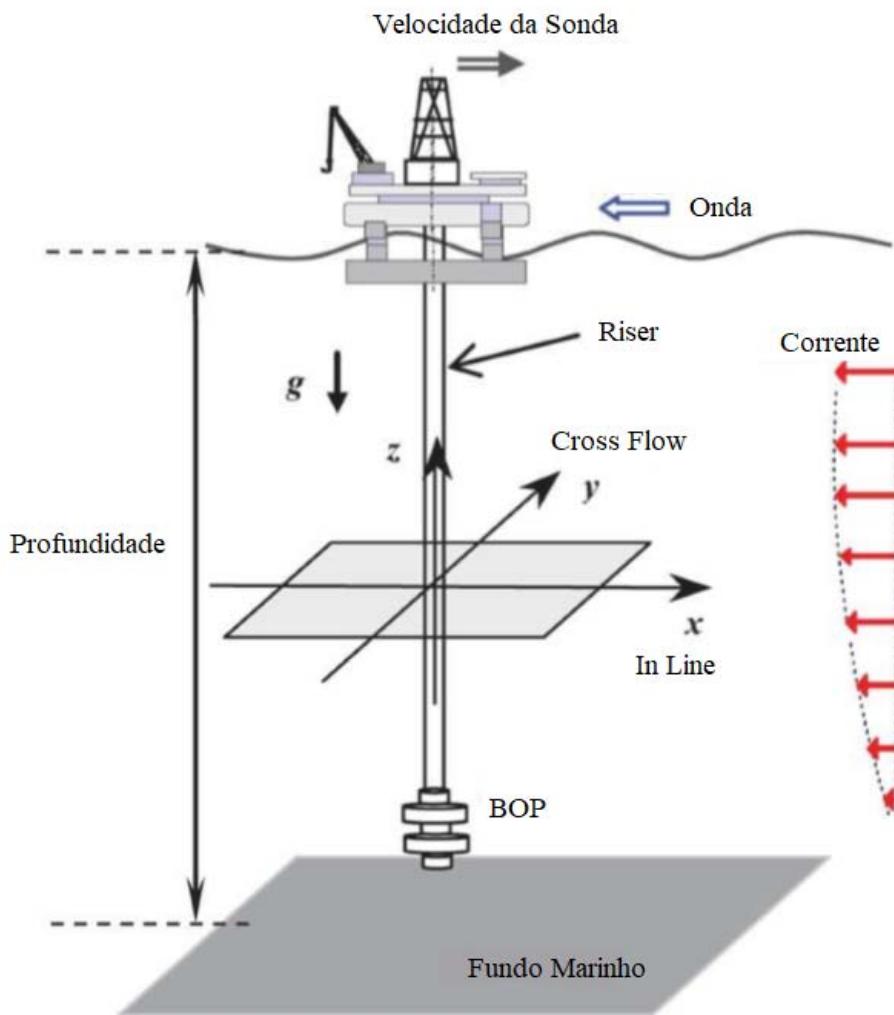


Figura 6.5 – Forças atuantes em uma sonda de perfuração durante o transporte do BOP/LMRP suspenso [38]

6.4.2.1 Onda

Nessa etapa do estudo serão utilizadas ondas irregulares com valores de Hs e Tp definidos a partir de casos com grande ocorrência na Bacia de Campos.

Foi definido então que, para o estudo de transporte do BOP/LMRP, seriam utilizadas ondas com altura de 2 e 3 metros e períodos de 7, 9 e 11 segundos, como pode ser verificado na Tabela 6.13.

Tabela 6.13 - Estados de mar utilizados no estudo de caso de transporte do BOP/LMRP

Casos de Carregamento – Estados de Mar				
Caso	Altura (m)	Período (s)	Incidência (°)	Gama
1	2.0	7	0	2.46171
2	2.0	9	0	2.17594
3	2.0	11	0	1.97177
4	3.0	7	0	2.46171
5	3.0	9	0	2.17594
6	3.0	11	0	1.97177

6.4.2.2 Corrente

A definição da corrente aplicada também foi feita a partir da seleção de um perfil usualmente atuante na região da Bacia de Campos. Para simplificar o estudo e evitar que este apresente resultados conservadores, foi utilizado um perfil piramidal, como pode ser verificado nas Figuras 6.6, 6.7 e 6.8, em que a velocidade na superfície equivale a 0.9 m/s e a velocidade na altura do equipamento é de 0.1 m/s.

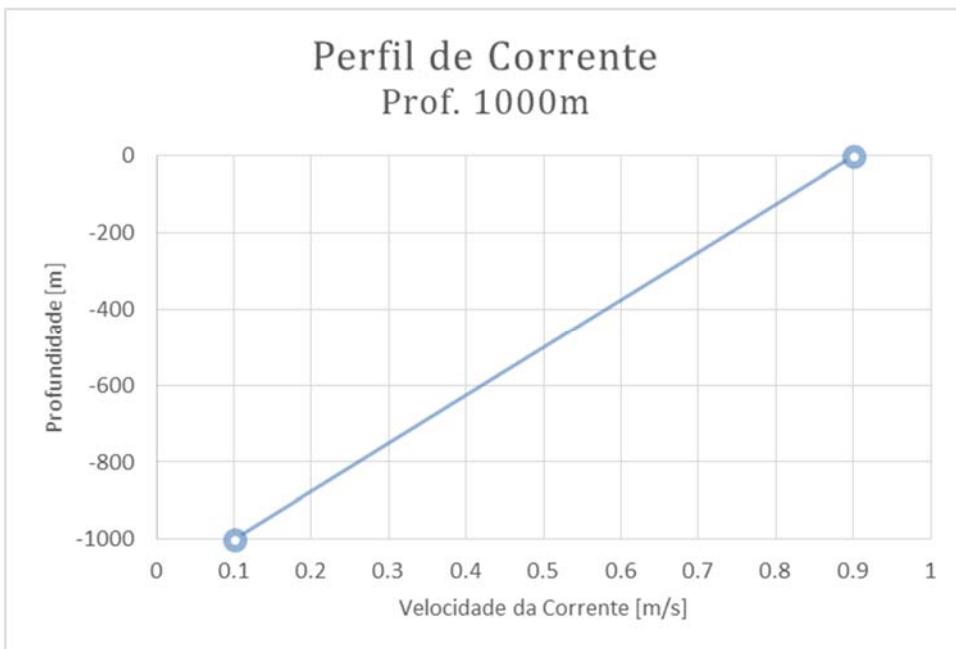


Figura 6.6 – Perfil de corrente utilizado no estudo de transporte do BOP/LMRP para a profundidade de 1000 metros

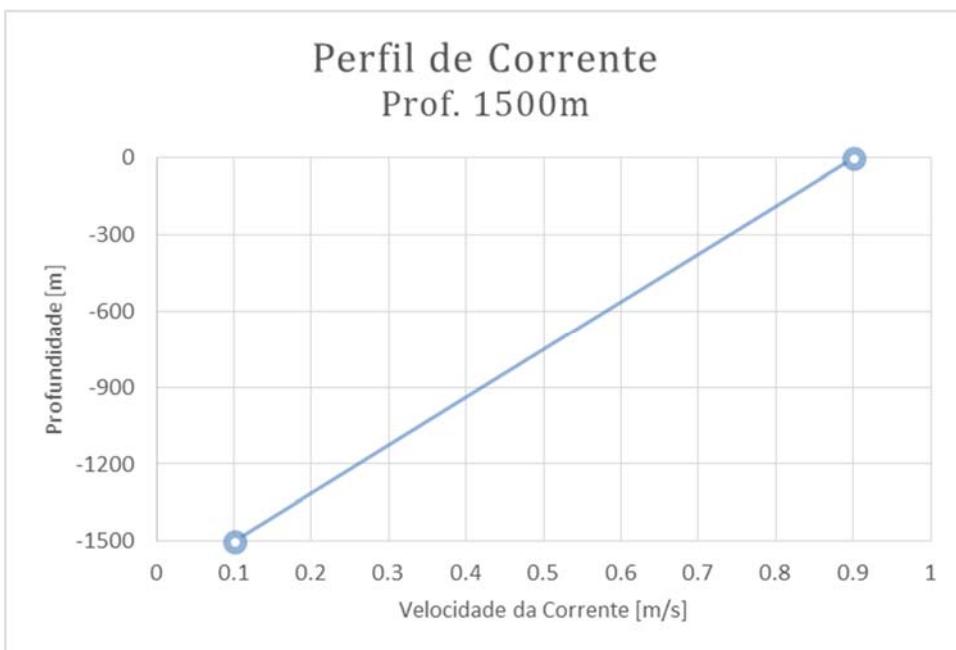


Figura 6.7 – Perfil de corrente utilizado no estudo de transporte do BOP/LMRP para a profundidade de 1500 metros

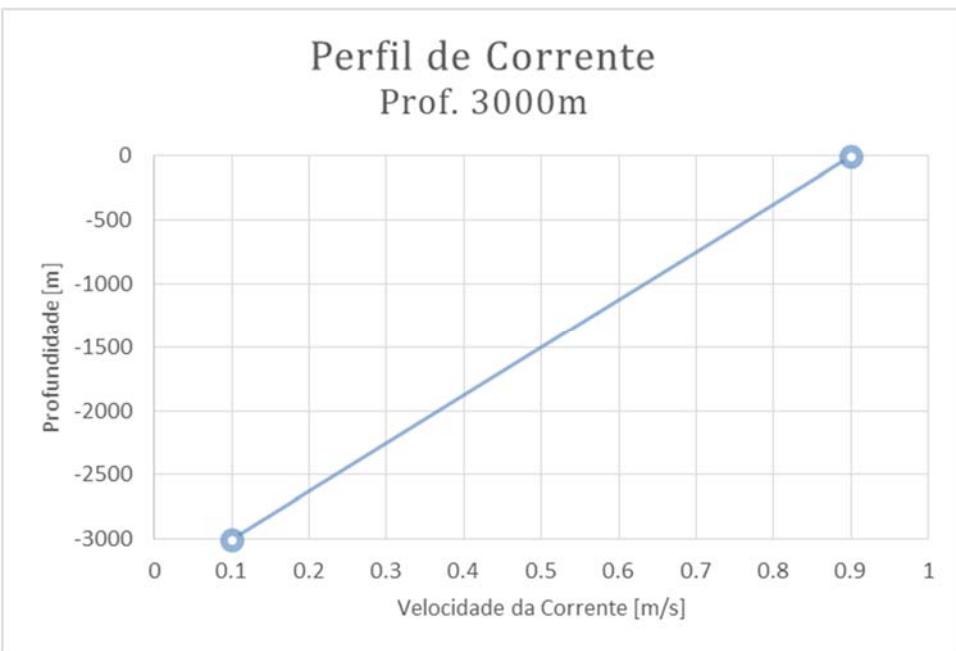


Figura 6.8 – Perfil de corrente utilizado no estudo de transporte do BOP/LMRP para a profundidade de 3000 metros

6.5 Velocidade da Sonda no Procedimento de Transporte dos Equipamentos

A velocidade da sonda de perfuração durante o processo de transporte do BOP/LMRP está diretamente relacionada aos esforços que irão surgir no *riser* ao longo da operação. Sendo assim, diversos estudos podem ser feitos com o objetivo de relacionar o tempo de operação com esses esforços, possibilitando a obtenção de um cenário com melhor custo-benefício para este processo.

Neste trabalho são apresentadas análises da operação de transporte do BOP/LMRP em duas velocidades: 1.0m/s e 1.5 m/s. O objetivo é constatar se há possibilidade de executar o procedimento nessas condições, além de fornecer a comparação dos resultados nos dois cenários.

A movimentação da sonda foi representada no modelo através da inserção de uma corrente contínua ao longo de todo *riser* com velocidade constante equivalente ao valor da velocidade da embarcação. Essa aproximação foi possível já que a velocidade de deslocamento da sonda é baixa gera efeitos e gera efeitos em seus RAOs que podem ser desconsiderados.

A Tabela 6.14 apresenta a soma das velocidades que serão utilizadas nos modelos, lembrando que a variação ao longo da profundidade é linear, assim como ocorre com a variação da corrente, já que a velocidade devida a movimentação da sonda é constante.

Tabela 6.14 – Velocidade total aplicada em cada modelo, considerando a velocidade proveniente da corrente maritma e a velocidade proveniente da movimentação da sonda

Profundidade dos equipamentos (m)	Velocidade da corrente (m/s)		Velocidade da sonda (m/s)	Velocidade total aplicada no riser (m/s)
1000	Topo	0.9	1.0	1.9
1000	Fundo	0.1	1.0	1.1
1000	Topo	0.9	1.5	2.4
1000	Fundo	0.1	1.5	1.6
1500	Topo	0.9	1.0	1.9
1500	Fundo	0.1	1.0	1.1
1500	Topo	0.9	1.5	2.4
1500	Fundo	0.1	1.5	1.6
3000	Topo	0.9	1.0	1.9
3000	Fundo	0.1	1.0	1.1
3000	Topo	0.9	1.5	2.4
3000	Fundo	0.1	1.5	1.6

Em relação aos estados de mar utilizados no estudo, é importante ressaltar que os períodos de onda apresentados no Item 6.4.2.1 estão atuando sobre a embarcação durante sua movimentação, ou seja, o valor real de período de onda para cada estado de mar atuante pode ser maior que os utilizados (caso a onda incida na proa da embarcação) ou menor (caso a onda incida na popa).

7 RESULTADOS DO PROCESSO DE INSTALAÇÃO DO BOP

7.1 Considerações Iniciais

Como já mencionado, a primeira etapa do estudo de caso conta com a execução de análises do processo de instalação do conjunto BOP/LMRP. A unidade flutuante de operação é uma sonda de perfuração cujos dados podem ser verificados no Item 6.1.1; os equipamentos são sustentados por um *riser* de perfuração com dimensões padronizadas explicitadas no Item 6.1.2; o sistema conta também com a *lower flex joint*, dispositivo responsável por fornecer ao sistema liberdade de rotação entre o *riser* e o LMRP, suas características também podem ser verificadas no Item 6.1.2; e o estudo será feito em dois conjuntos de equipamentos, cujas características foram apresentadas no Item 6.1.3.

As profundidades definidas para o estudo podem ser verificadas no Item 6.2 e os casos de carregamento no Item 6.4.

O estudo de caso conta com a execução de análises dinâmicas em cada um dos modelos e avaliação das trações máximas e mínimas e dos deslocamentos do corpo ao longo do tempo de análise.

7.2 Conjunto de Equipamentos 1

7.2.1 Resultados de Tensão por Estado de Mar em cada Profundidade

7.2.1.1 Profundidade: 1000m

A Tabela 7.1 apresenta, para a profundidade de 1000 metros, a amplitude de tensão no topo do *riser* e as tensões média e máxima na seção de duto, além do limite definido pela norma. As Figuras 7.1 e 7.2 mostram os mesmos resultados graficamente para incidências de 0° e 30° respectivamente.

Tabela 7.1 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1000m

Tp (s)	Incidência de Onda (°)	Amplitude de tensão (kN/m ²)	Tensão média (kN/m ²)	Tensão máxima (kN/m ²)	Limite normativo (kN/m ²)	Critério Normativo
5	0	3327	148624	151950	300160	OK
6	0	2817	148624	151440	300160	OK
7	0	6260	148624	154883	300160	OK
8	0	7020	148624	155643	300160	OK
9	0	8884	148624	157507	300160	OK
10	0	8291	148624	156914	300160	OK
11	0	8111	148624	156734	300160	OK
12	0	7816	148624	156439	300160	OK
13	0	8093	148624	156716	300160	OK
14	0	7952	148624	156575	300160	OK
5	30	3427	148624	152050	300160	OK
6	30	3945	148624	152568	300160	OK
7	30	6136	148624	154759	300160	OK
8	30	7523	148624	156146	300160	OK
9	30	7222	148624	155845	300160	OK
10	30	8769	148624	157392	300160	OK
11	30	7953	148624	156576	300160	OK
12	30	9188	148624	157811	300160	OK
13	30	9135	148624	157758	300160	OK
14	30	10580	148624	159203	300160	OK

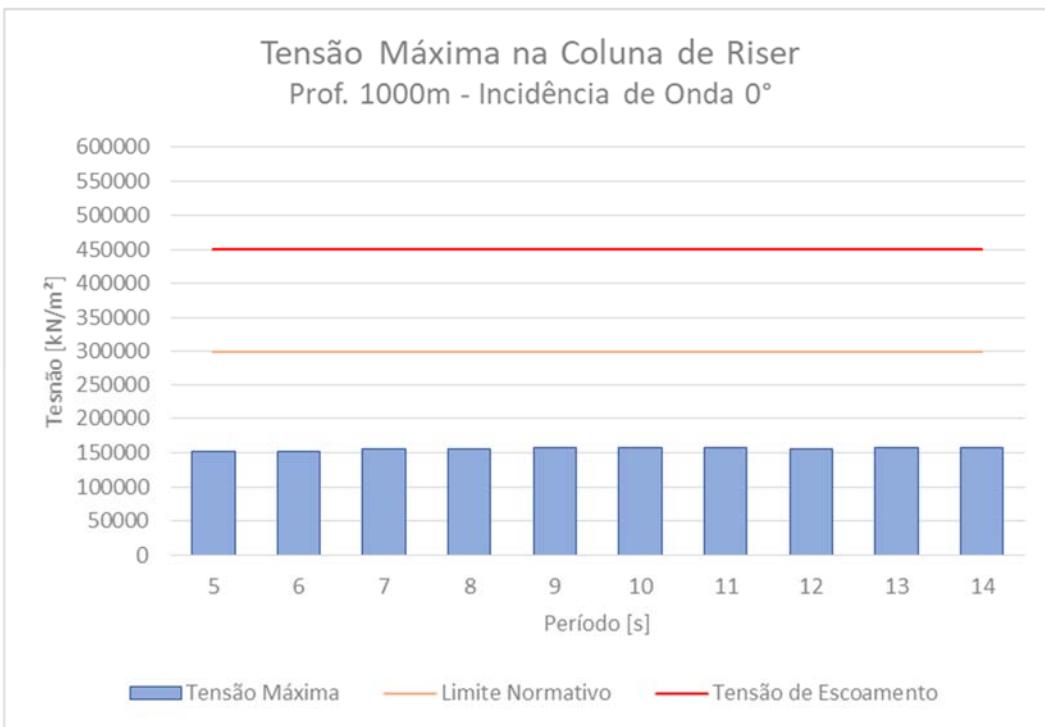


Figura 7.1 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1000m e incidência de onda de 0°

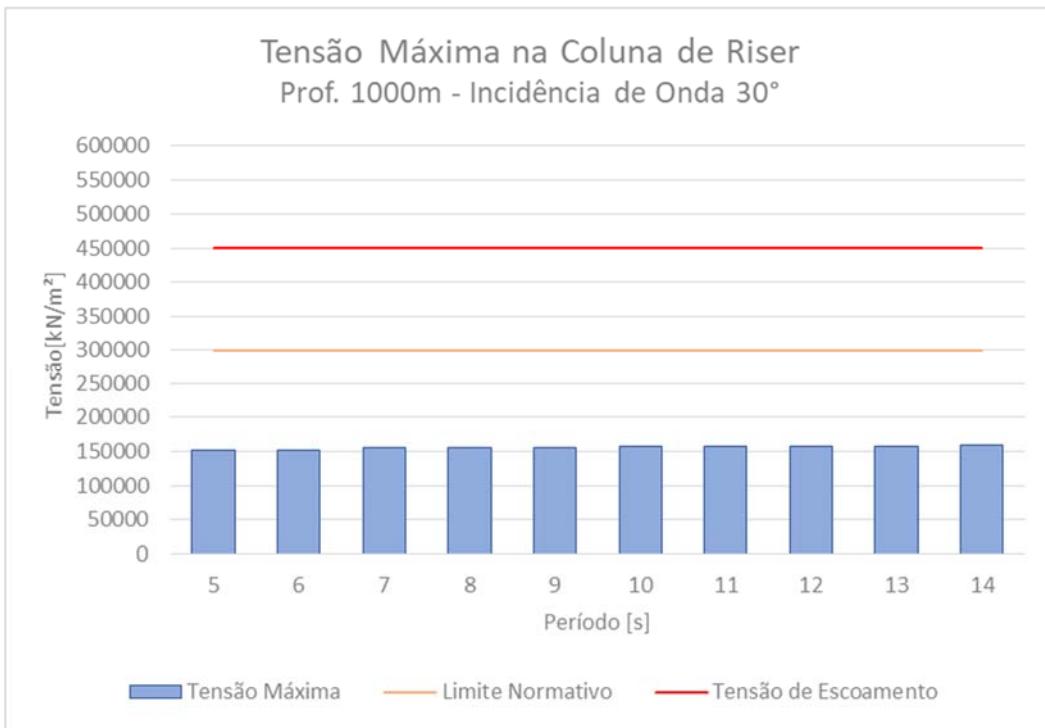


Figura 7.2 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1000m e incidência de onda de 30°

Os gráficos das Figuras 7.3 e 7.4 apresentam a amplitude de tensão no topo dos modelos para cada período de onda estudado, com incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

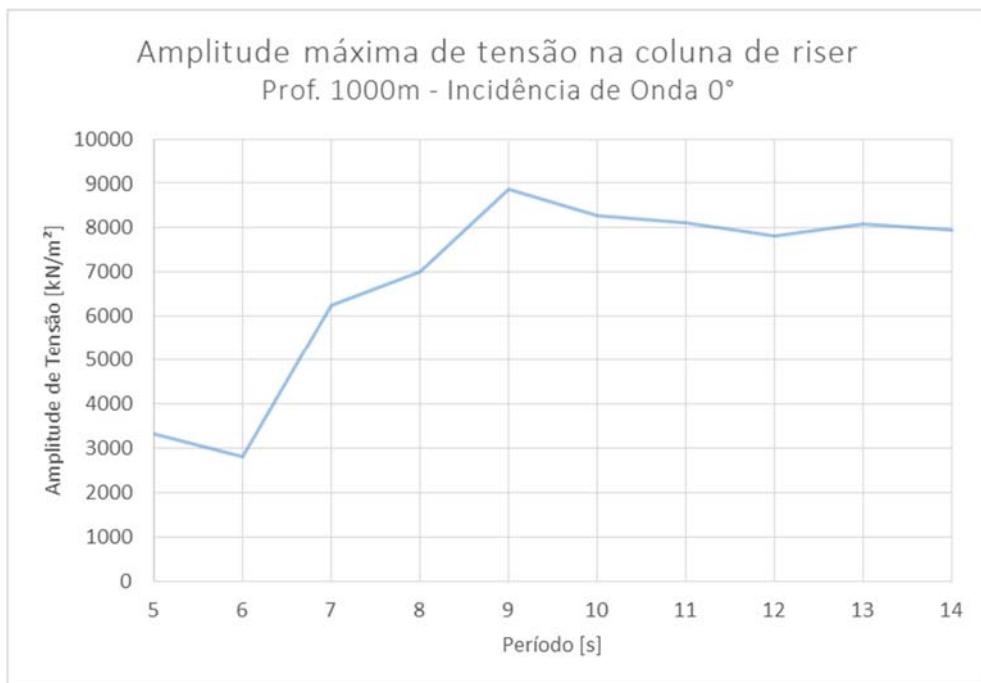


Figura 7.3 – Amplitude de tensão na coluna de riser referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1000m e incidência de onda de 0°

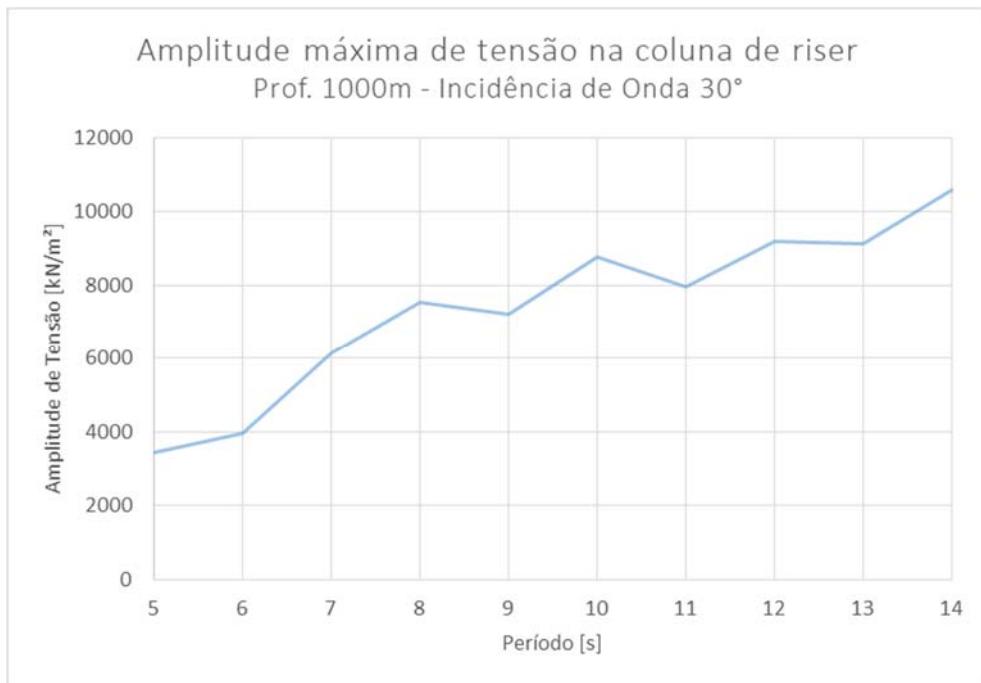


Figura 7.4 – Amplitude de tensão na coluna de riser referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1000m e incidência de onda de 30°

A Tabela 7.2 apresenta os valores mínimos dos esforços axiais ao longo da coluna de *riser*, a fim de verificar se o critério de não haver compressão é respeitado durante a instalação.

Tabela 7.2 - Esforços axiais mínimos na coluna de *riser* referentes ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1000m

Período (s)	Incidência de Onda (°)	Tração mínima no <i>riser</i> (kN)	Critério Normativo
5	0	3417.01	OK
6	0	3429.47	OK
7	0	3362.22	OK
8	0	3353.48	OK
9	0	3310.79	OK
10	0	3339.16	OK
11	0	3342.15	OK
12	0	3346.84	OK
13	0	3347.78	OK
14	0	3322.42	OK
5	30	3423.34	OK
6	30	3401.83	OK
7	30	3360.38	OK
8	30	3341.38	OK
9	30	3331.04	OK
10	30	3321.11	OK
11	30	3310.57	OK
12	30	3329.84	OK
13	30	3320.91	OK
14	30	3274.78	OK

7.2.1.2 Profundidade: 1500m

A Tabela 7.3 apresenta, para a profundidade de 1500 metros, a amplitude de tensão no topo do *riser* e as tensões média e máxima na seção de duto, além do limite definido pela norma. As Figuras 7.5 e 7.6 mostram os mesmos resultados graficamente para incidências de 0° e 30° respectivamente.

Tabela 7.3 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1500m

Tp (s)	Incidência de Onda (°)	Amplitude de tensão (kN/m ²)	Tensão média (kN/m ²)	Tensão máxima (kN/m ²)	Limite normativo (kN/m ²)	Critério Normativo
5	0	3085	154831	157915	300160	OK
6	0	3734	154831	158564	300160	OK
7	0	6375	154831	161205	300160	OK
8	0	9278	154831	164108	300160	OK
9	0	11240	154831	166070	300160	OK
10	0	10199	154831	165029	300160	OK
11	0	9913	154831	164743	300160	OK
12	0	9714	154831	164544	300160	OK
13	0	9926	154831	164756	300160	OK
14	0	9550	154831	164380	300160	OK
5	30	3380	154831	158210	300160	OK
6	30	4696	154831	159526	300160	OK
7	30	6857	154831	161687	300160	OK
8	30	9589	154831	164419	300160	OK
9	30	10603	154831	165433	300160	OK
10	30	10898	154831	165728	300160	OK
11	30	10583	154831	165413	300160	OK
12	30	9499	154831	164329	300160	OK
13	30	10304	154831	165134	300160	OK
14	30	12299	154831	167129	300160	OK

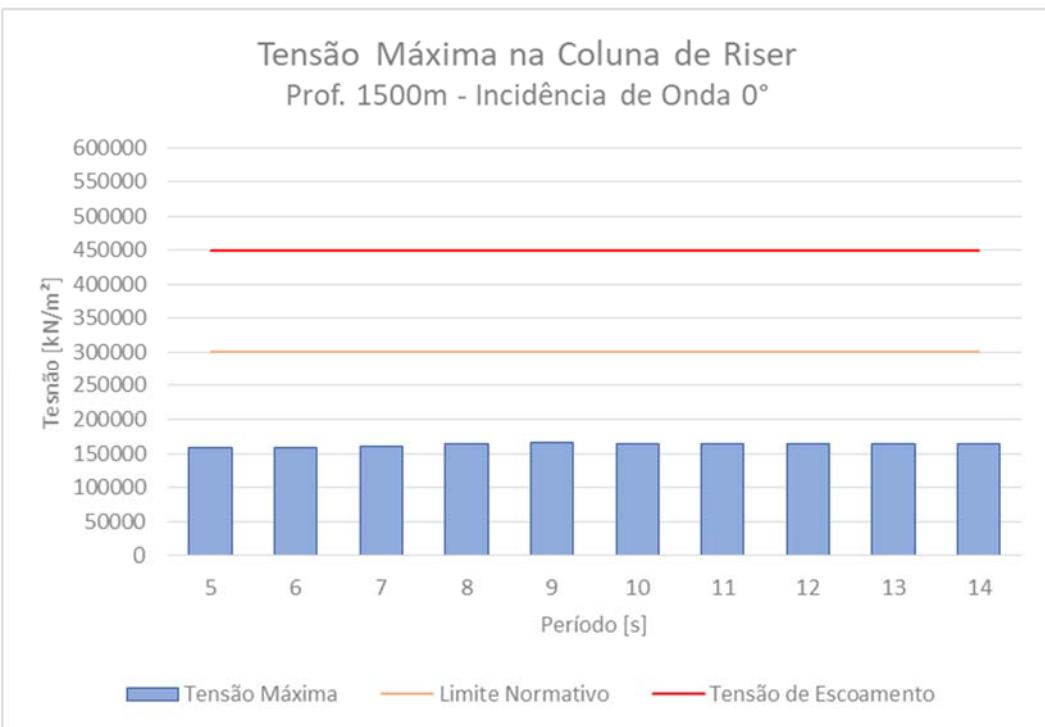


Figura 7.5 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1500m e incidência de onda de 0°

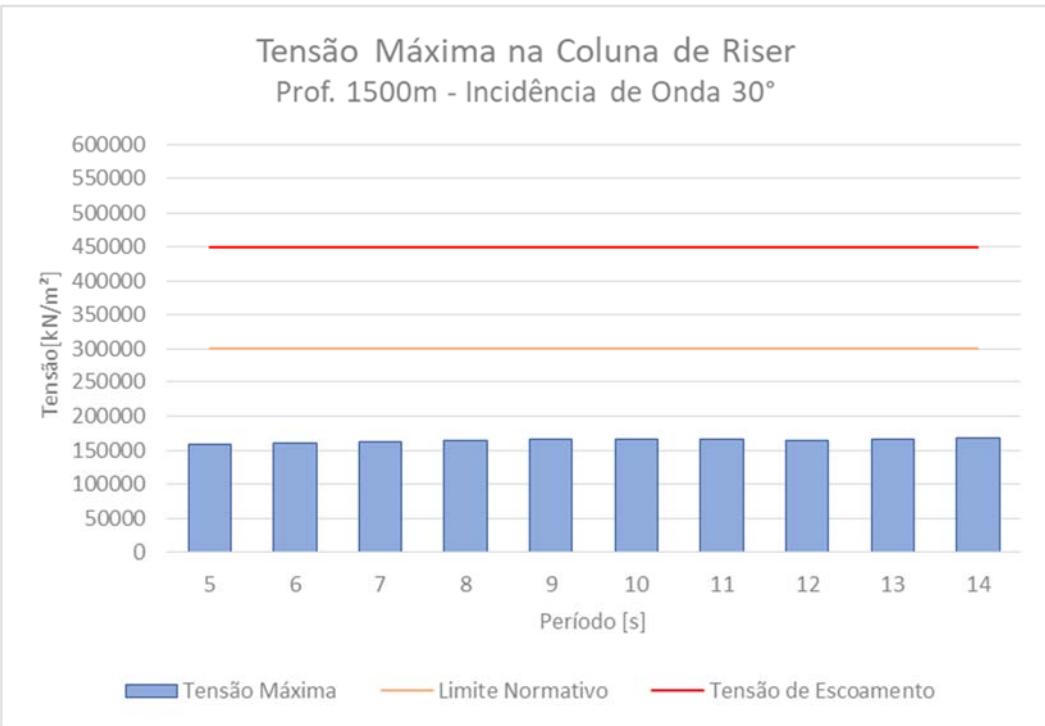


Figura 7.6 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1500m e incidência de onda de 30°

Os gráficos das Figuras 7.7 e 7.8 apresentam a amplitude de tensão no topo dos modelos para cada período de onda estudado, com incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

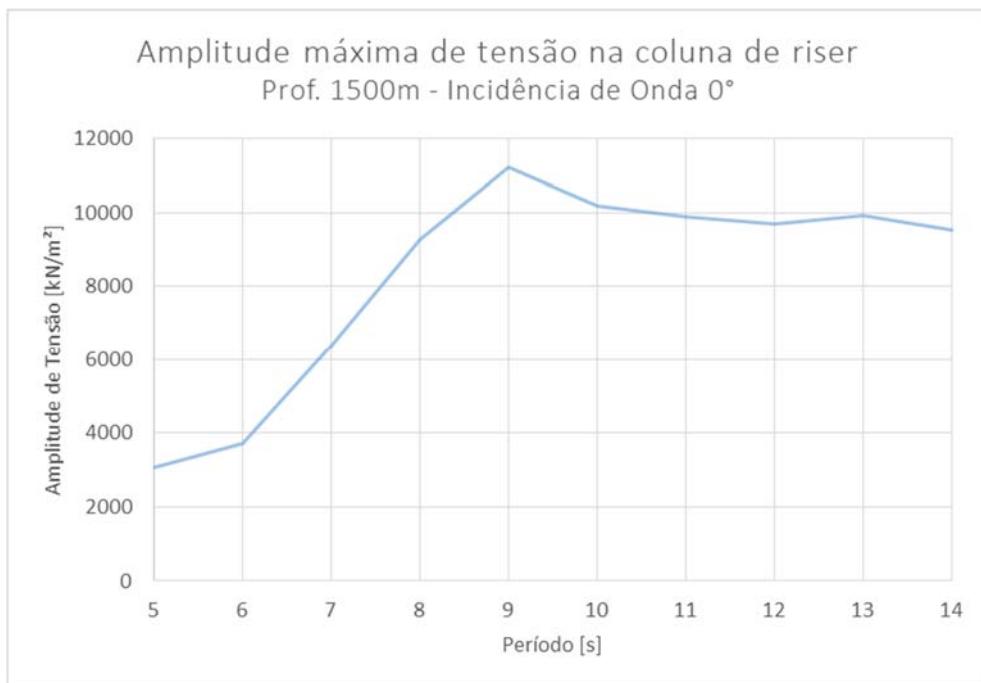


Figura 7.7 – Amplitude de tensão na coluna de riser referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1500m e incidência de onda de 0°

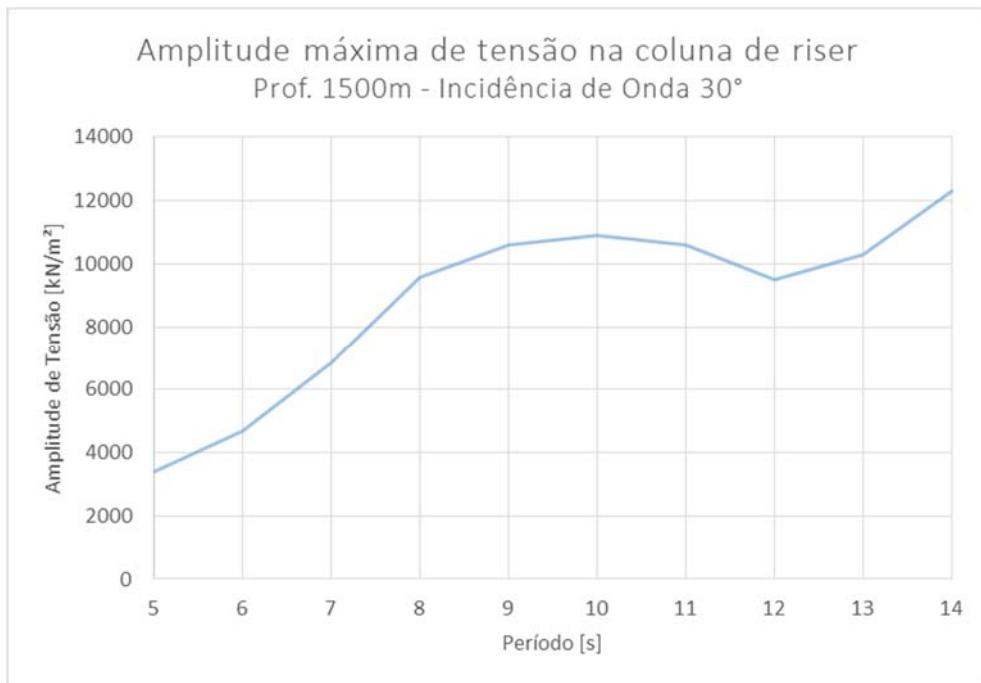


Figura 7.8 – Amplitude de tensão na coluna de riser referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1500m e incidência de onda de 30°

A Tabela 7.4 apresenta os valores mínimos dos esforços axiais ao longo da coluna de *riser*, a fim de verificar se o critério de não haver compressão é respeitado durante a instalação.

Tabela 7.4 - Esforços axiais mínimos na coluna de *riser* referentes ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1500m

Período (s)	Incidência de Onda (°)	Tração mínima no <i>riser</i> (kN)	Critério Normativo
5	0	3429.56	OK
6	0	3420.21	OK
7	0	3368.77	OK
8	0	3331.87	OK
9	0	3297.98	OK
10	0	3324.56	OK
11	0	3332.24	OK
12	0	3337.57	OK
13	0	3335.90	OK
14	0	3323.66	OK
5	30	3431.54	OK
6	30	3409.62	OK
7	30	3374.60	OK
8	30	3317.22	OK
9	30	3305.30	OK
10	30	3307.37	OK
11	30	3311.33	OK
12	30	3328.06	OK
13	30	3307.49	OK
14	30	3296.47	OK

7.2.1.3 Profundidade: 2000m

A Tabela 7.5 apresenta, para a profundidade de 2000 metros, a amplitude de tensão no topo do *riser* e as tensões média e máxima na seção de duto, além do limite definido pela norma. As Figuras 7.9 e 7.10 mostram os mesmos resultados graficamente para incidências de 0° e 30° respectivamente.

Tabela 7.5 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2000m

Tp (s)	Incidência de Onda (°)	Amplitude de tensão (kN/m ²)	Tensão média (kN/m ²)	Tensão máxima (kN/m ²)	Limite normativo (kN/m ²)	Critério Normativo
5	0	3652	161032	164684	300160	OK
6	0	4650	161032	165682	300160	OK
7	0	8670	161032	169702	300160	OK
8	0	10431	161032	171463	300160	OK
9	0	13680	161032	174712	300160	OK
10	0	12409	161032	173441	300160	OK
11	0	11807	161032	172839	300160	OK
12	0	11860	161032	172892	300160	OK
13	0	11928	161032	172960	300160	OK
14	0	11565	161032	172597	300160	OK
5	30	4621	161032	165653	300160	OK
6	30	6514	161032	167546	300160	OK
7	30	9866	161032	170898	300160	OK
8	30	11341	161032	172373	300160	OK
9	30	12096	161032	173128	300160	OK
10	30	12491	161032	173523	300160	OK
11	30	13402	161032	174434	300160	OK
12	30	12688	161032	173720	300160	OK
13	30	11969	161032	173001	300160	OK
14	30	14394	161032	175426	300160	OK

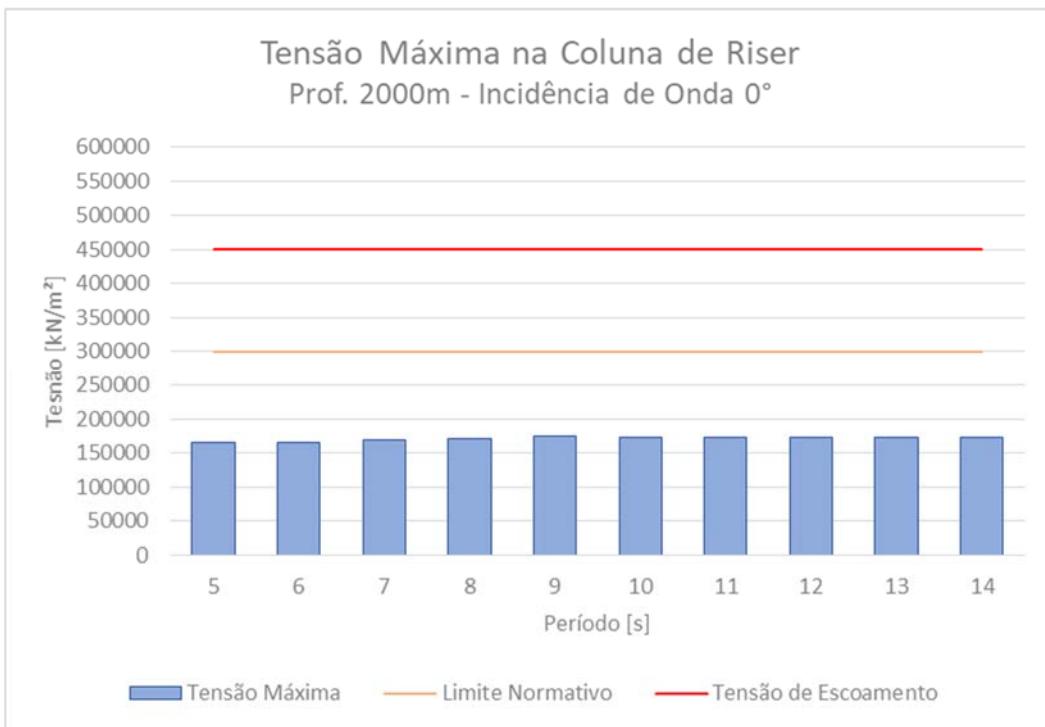


Figura 7.9 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2000m e incidência de onda de 0°

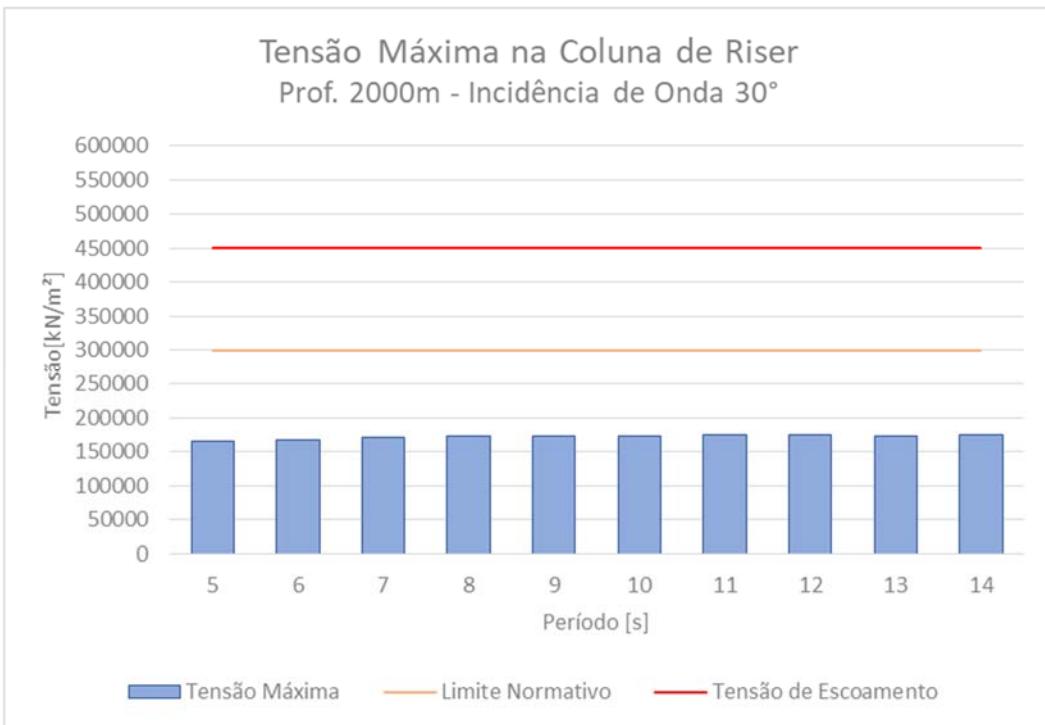


Figura 7.10 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2000m e incidência de onda de 30°

Os gráficos das Figuras 7.11 e 7.12 apresentam a amplitude de tensão no topo dos modelos para cada período de onda estudado, com incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

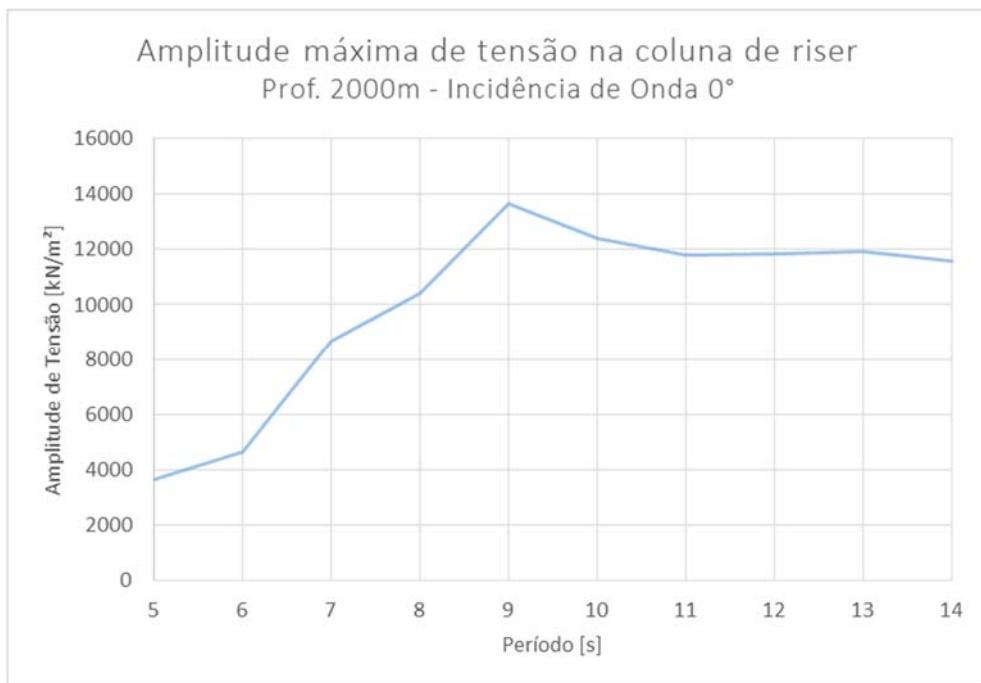


Figura 7.11 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2000m e incidência de onda de 0°

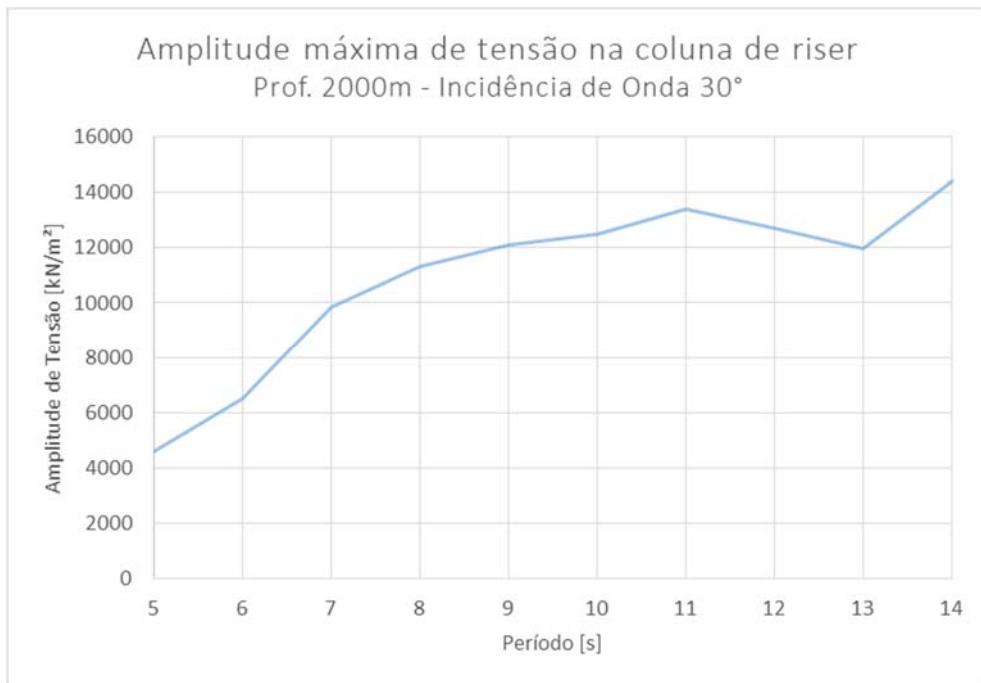


Figura 7.12 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2000m e incidência de onda de 30°

A Tabela 7.6 apresenta os valores mínimos dos esforços axiais ao longo da coluna de *riser*, a fim de verificar se o critério de não haver compressão é respeitado durante a instalação.

Tabela 7.6 - Esforços axiais mínimos na coluna de *riser* referentes ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2000m

Período (s)	Incidência de Onda (°)	Tração mínima no <i>riser</i> (kN)	Critério Normativo
5	0	3430.54	OK
6	0	3427.12	OK
7	0	3371.34	OK
8	0	3314.66	OK
9	0	3295.56	OK
10	0	3317.10	OK
11	0	3321.80	OK
12	0	3325.88	OK
13	0	3333.43	OK
14	0	3310.62	OK
5	30	3414.88	OK
6	30	3390.04	OK
7	30	3380.87	OK
8	30	3326.60	OK
9	30	3306.89	OK
10	30	3276.72	OK
11	30	3296.21	OK
12	30	3290.44	OK
13	30	3266.08	OK
14	30	3284.10	OK

7.2.1.4 Profundidade: 2500m

A Tabela 7.7 apresenta, para a profundidade de 2500 metros, a amplitude de tensão no topo do *riser* e as tensões média e máxima na seção de duto, além do limite definido pela norma. As Figuras 7.13 e 7.14 mostram os mesmos resultados graficamente para incidências de 0° e 30° respectivamente.

Tabela 7.7 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2500m

Tp (s)	Incidência de Onda (°)	Amplitude de tensão (kN/m ²)	Tensão média (kN/m ²)	Tensão máxima (kN/m ²)	Limite normativo (kN/m ²)	Critério Normativo
5	0	9442	167232	176674	300160	OK
6	0	7894	167232	175126	300160	OK
7	0	11927	167232	179159	300160	OK
8	0	13798	167232	181030	300160	OK
9	0	16074	167232	183306	300160	OK
10	0	15911	167232	183143	300160	OK
11	0	13339	167232	180571	300160	OK
12	0	14614	167232	181846	300160	OK
13	0	14866	167232	182098	300160	OK
14	0	14192	167232	181424	300160	OK
5	30	7160	167232	174392	300160	OK
6	30	8900	167232	176132	300160	OK
7	30	10965	167232	178197	300160	OK
8	30	13940	167232	181172	300160	OK
9	30	13470	167232	180702	300160	OK
10	30	15753	167232	182985	300160	OK
11	30	15204	167232	182436	300160	OK
12	30	15031	167232	182263	300160	OK
13	30	15944	167232	183176	300160	OK
14	30	18413	167232	185645	300160	OK

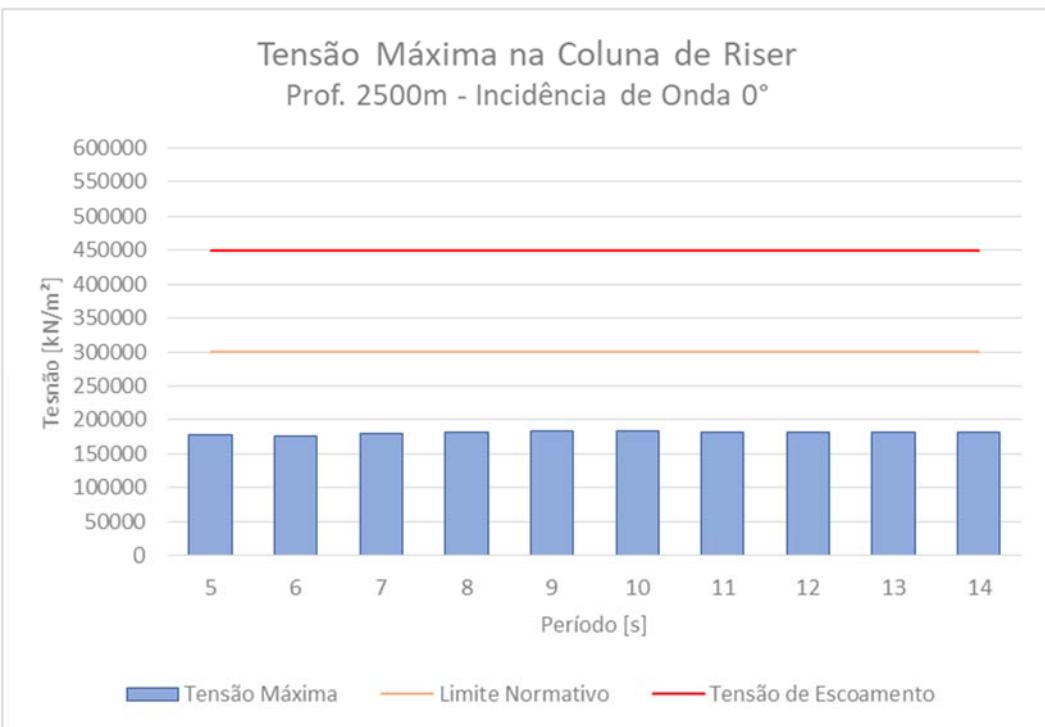


Figura 7.13 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2500m e incidência de onda de 0°

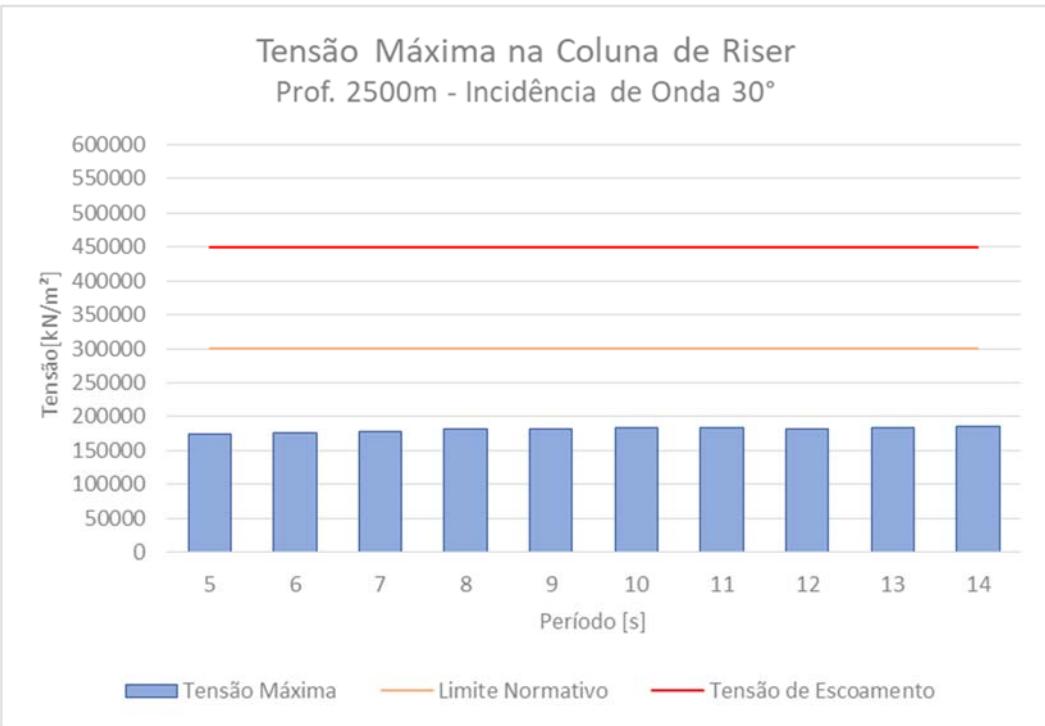


Figura 7.14 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2500m e incidência de onda de 30°

Os gráficos das Figuras 7.15 e 7.16 apresentam a amplitude de tensão no topo dos modelos para cada período de onda estudado, com incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

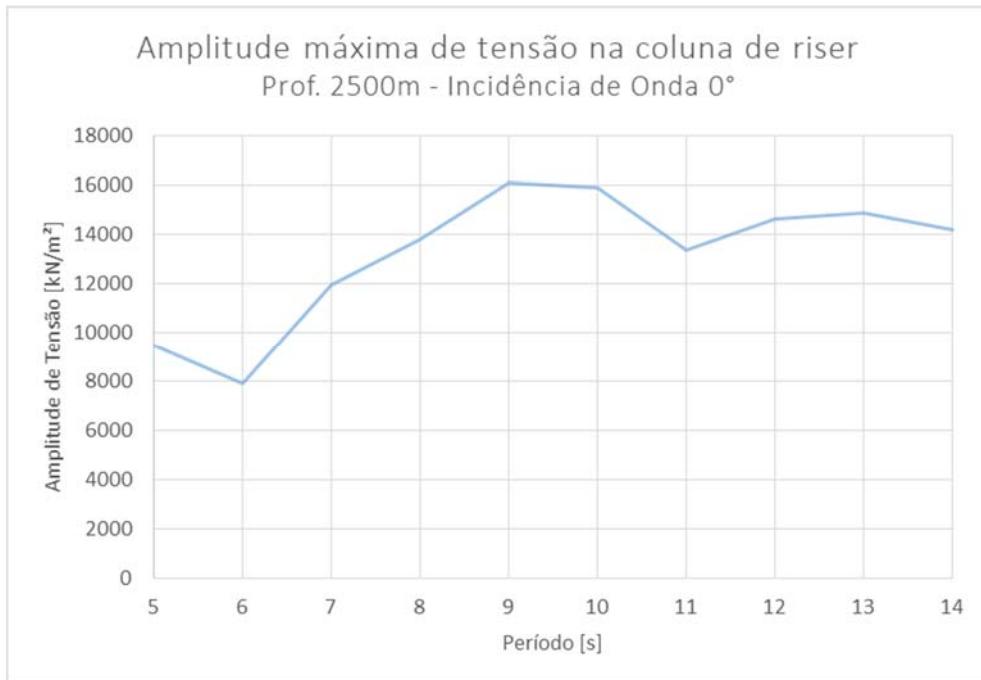


Figura 7.15 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2500m e incidência de onda de 0°

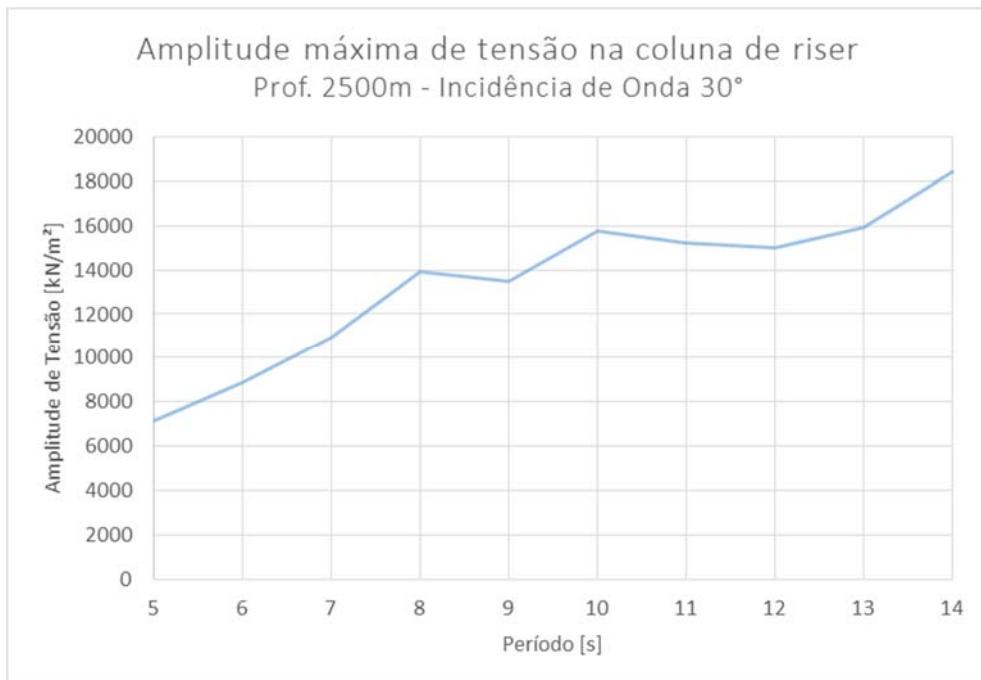


Figura 7.16 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2500m e incidência de onda de 30°

A Tabela 7.8 apresenta os valores mínimos dos esforços axiais ao longo da coluna de *riser*, a fim de verificar se o critério de não haver compressão é respeitado durante a instalação.

Tabela 7.8 - Esforços axiais mínimos na coluna de *riser* referentes ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2500m

Período (s)	Incidência de Onda (°)	Tração mínima no <i>riser</i> (kN)	Critério Normativo
5	0	3333.28	OK
6	0	3350.60	OK
7	0	3329.18	OK
8	0	3281.92	OK
9	0	3256.44	OK
10	0	3290.35	OK
11	0	3293.35	OK
12	0	3323.56	OK
13	0	3323.41	OK
14	0	3286.37	OK
5	30	3379.49	OK
6	30	3367.12	OK
7	30	3346.53	OK
8	30	3282.11	OK
9	30	3268.53	OK
10	30	3261.83	OK
11	30	3292.75	OK
12	30	3310.14	OK
13	30	3279.17	OK
14	30	3247.10	OK

7.2.1.5 Profundidade: 3000m

A Tabela 7.9 apresenta, para a profundidade de 3000 metros, a amplitude de tensão no topo do *riser* e as tensões média e máxima na seção de duto, além do limite definido pela norma. As Figuras 7.17 e 7.18 mostram os mesmos resultados graficamente para incidências de 0° e 30° respectivamente.

Tabela 7.9 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3000m

Tp (s)	Incidência de Onda (°)	Amplitude de tensão (kN/m ²)	Tensão média (kN/m ²)	Tensão máxima (kN/m ²)	Limite normativo (kN/m ²)	Critério Normativo
5	0	11950	173428	185378	300160	OK
6	0	11596	173428	185024	300160	OK
7	0	13168	173428	186596	300160	OK
8	0	19470	173428	192898	300160	OK
9	0	19776	173428	193204	300160	OK
10	0	19697	173428	193125	300160	OK
11	0	18001	173428	191429	300160	OK
12	0	17156	173428	190584	300160	OK
13	0	16343	173428	189771	300160	OK
14	0	15401	173428	188829	300160	OK
5	30	13917	173428	187345	300160	OK
6	30	12914	173428	186342	300160	OK
7	30	15595	173428	189023	300160	OK
8	30	16552	173428	189980	300160	OK
9	30	19319	173428	192747	300160	OK
10	30	21721	173428	195149	300160	OK
11	30	20479	173428	193907	300160	OK
12	30	18667	173428	192095	300160	OK
13	30	18934	173428	192362	300160	OK
14	30	20216	173428	193644	300160	OK

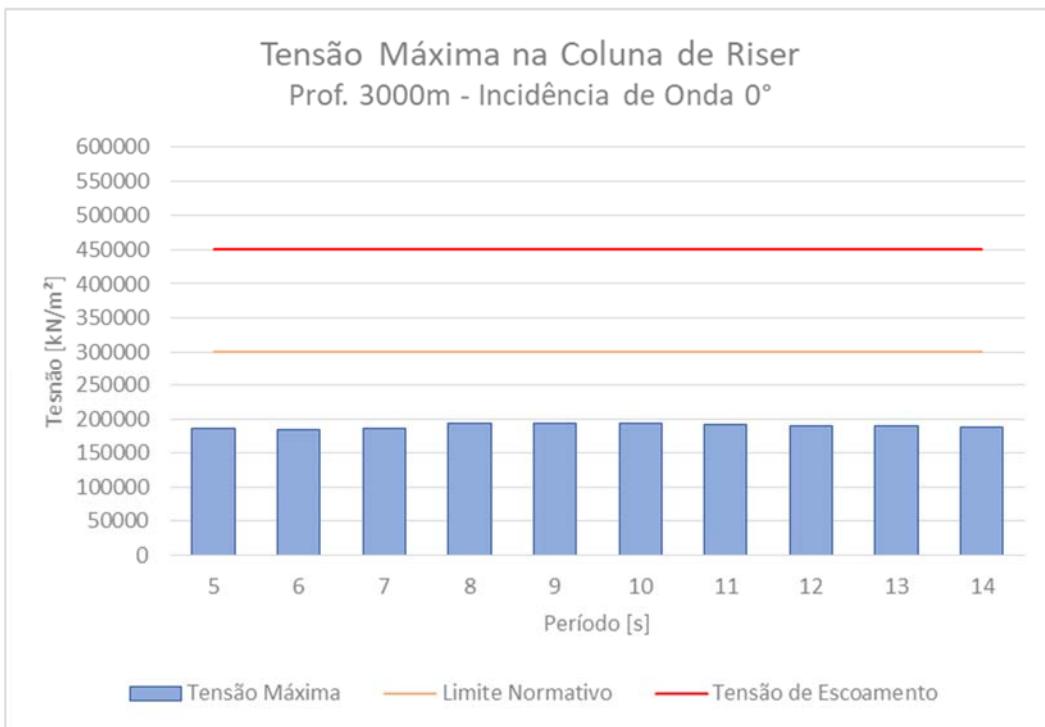


Figura 7.17 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3000m e incidência de onda de 0°

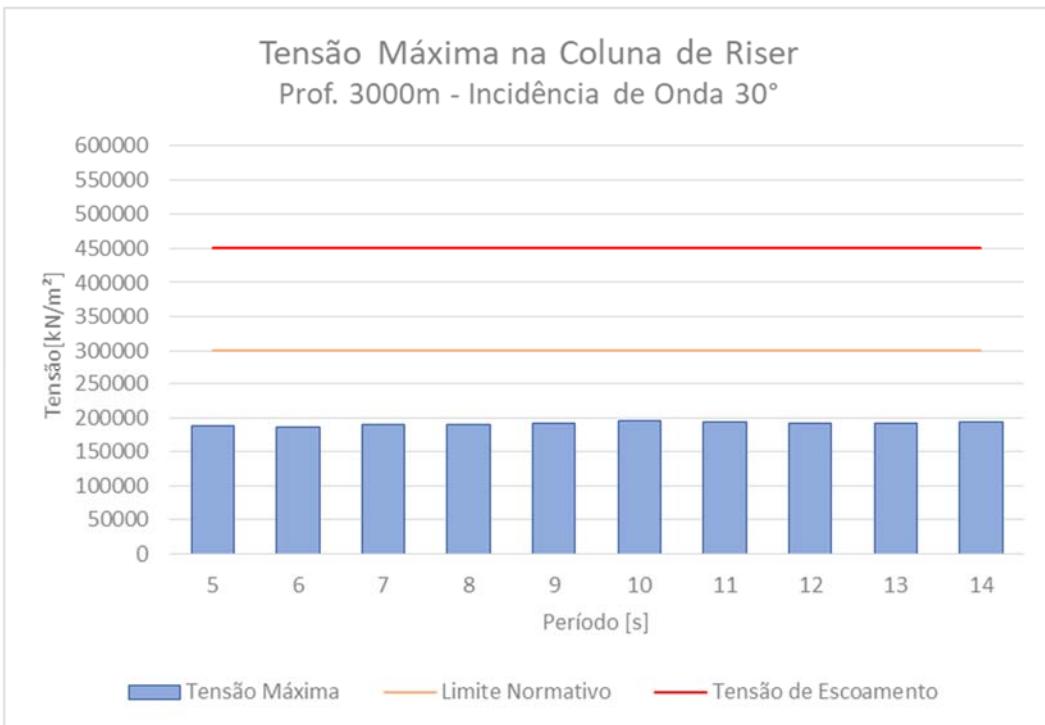


Figura 7.18 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3000m e incidência de onda de 30°

Os gráficos das Figuras 7.19 e 7.20 apresentam a amplitude de tensão no topo dos modelos para cada período de onda estudado, com incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

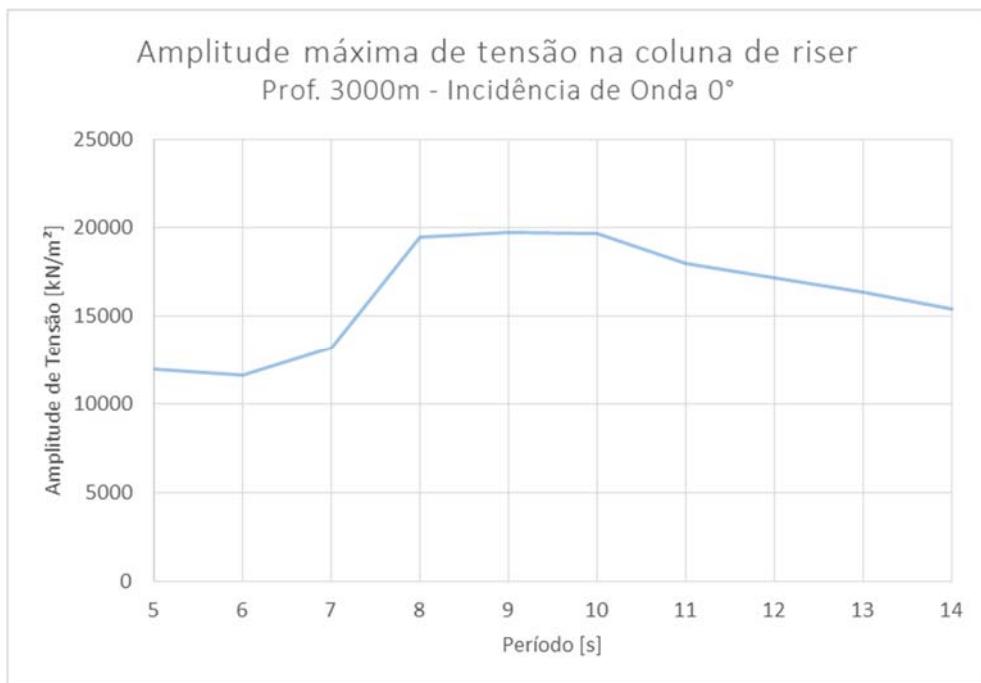


Figura 7.19 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3000m e incidência de onda de 0°

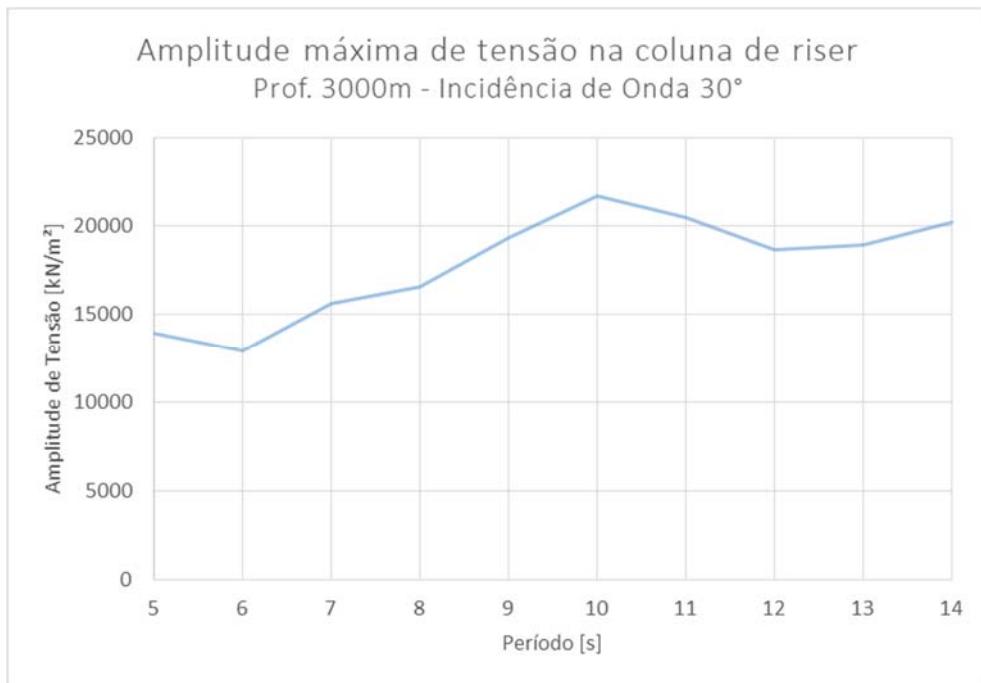


Figura 7.20 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3000m e incidência de onda de 30°

A Tabela 7.10 apresenta os valores mínimos dos esforços axiais ao longo da coluna de *riser*, a fim de verificar se o critério de não haver compressão é respeitado durante a instalação.

Tabela 7.10 - Esforços axiais mínimos na coluna de *riser* referentes ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3000m

Período (s)	Incidência de Onda (°)	Tração mínima no <i>riser</i> (kN)	Critério Normativo
5	0	3300.81	OK
6	0	3322.24	OK
7	0	3299.15	OK
8	0	3295.82	OK
9	0	3231.47	OK
10	0	3270.08	OK
11	0	3279.95	OK
12	0	3286.91	OK
13	0	3305.86	OK
14	0	3290.54	OK
5	30	3277.68	OK
6	30	3293.77	OK
7	30	3301.83	OK
8	30	3258.62	OK
9	30	3285.06	OK
10	30	3262.27	OK
11	30	3302.51	OK
12	30	3288.67	OK
13	30	3289.82	OK
14	30	3278.30	OK

7.2.1.6 Profundidade: 3500m

A Tabela 7.11 apresenta, para a profundidade de 3500 metros, a amplitude de tensão no topo do *riser* e as tensões média e máxima na seção de duto, além do limite definido pela norma. As Figuras 7.21 e 7.22 mostram os mesmos resultados graficamente para incidências de 0° e 30° respectivamente.

Tabela 7.11 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3500m

Tp (s)	Incidência de Onda (°)	Amplitude de tensão (kN/m ²)	Tensão média (kN/m ²)	Tensão máxima (kN/m ²)	Limite normativo (kN/m ²)	Critério Normativo
5	0	10299	179623	189922	300160	OK
6	0	12250	179623	191873	300160	OK
7	0	18043	179623	197666	300160	OK
8	0	23254	179623	202877	300160	OK
9	0	23824	179623	203447	300160	OK
10	0	20527	179623	200150	300160	OK
11	0	19621	179623	199244	300160	OK
12	0	18391	179623	198014	300160	OK
13	0	19567	179623	199190	300160	OK
14	0	17898	179623	197521	300160	OK
5	30	17688	179623	197311	300160	OK
6	30	22572	179623	202195	300160	OK
7	30	20312	179623	199935	300160	OK
8	30	23909	179623	203532	300160	OK
9	30	21224	179623	200847	300160	OK
10	30	23533	179623	203156	300160	OK
11	30	22318	179623	201941	300160	OK
12	30	22339	179623	201962	300160	OK
13	30	22748	179623	202371	300160	OK
14	30	25257	179623	204880	300160	OK

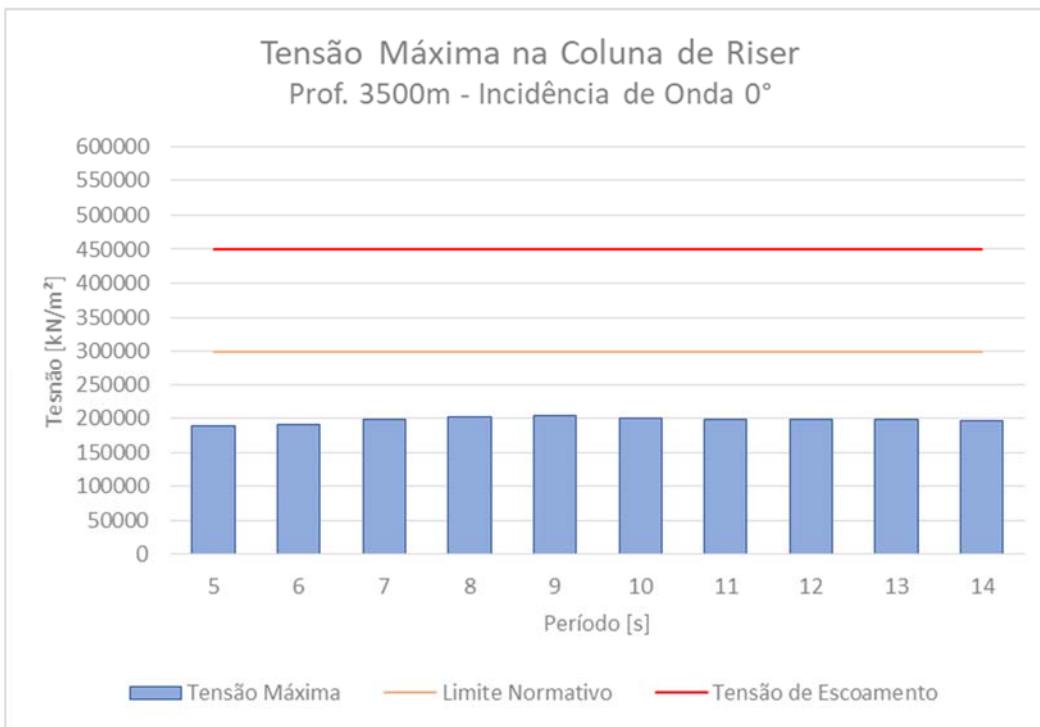


Figura 7.21 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3500m e incidência de onda de 0°

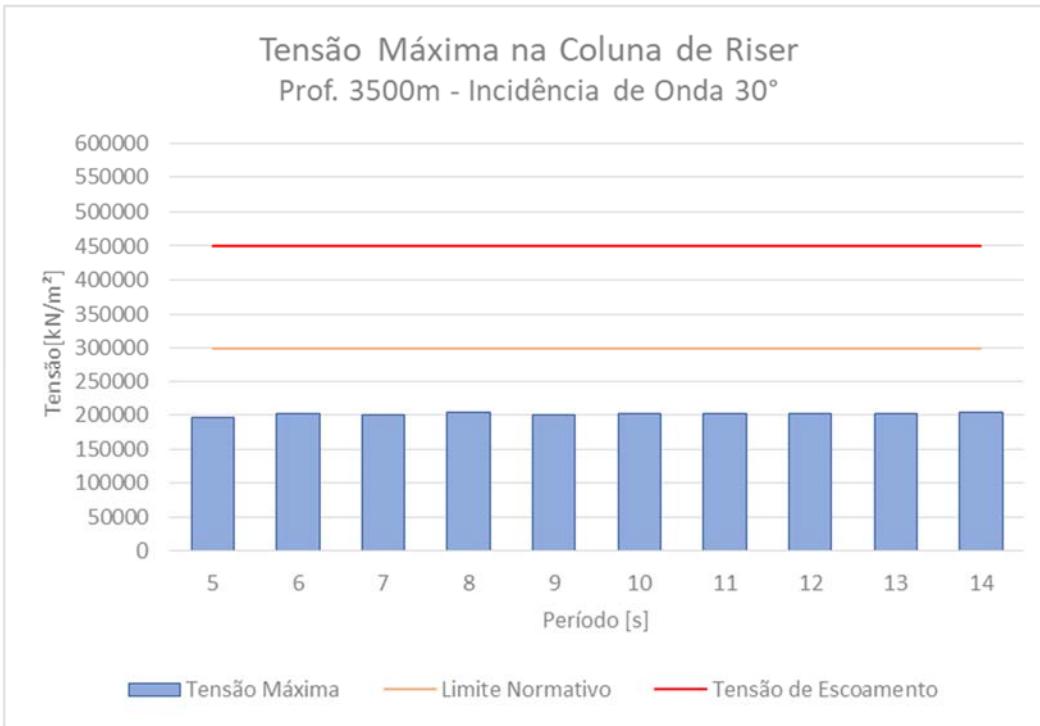


Figura 7.22 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3500m e incidência de onda de 30°

Os gráficos das Figuras 7.23 e 7.24 apresentam a amplitude de tensão no topo dos modelos para cada período de onda estudado, com incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

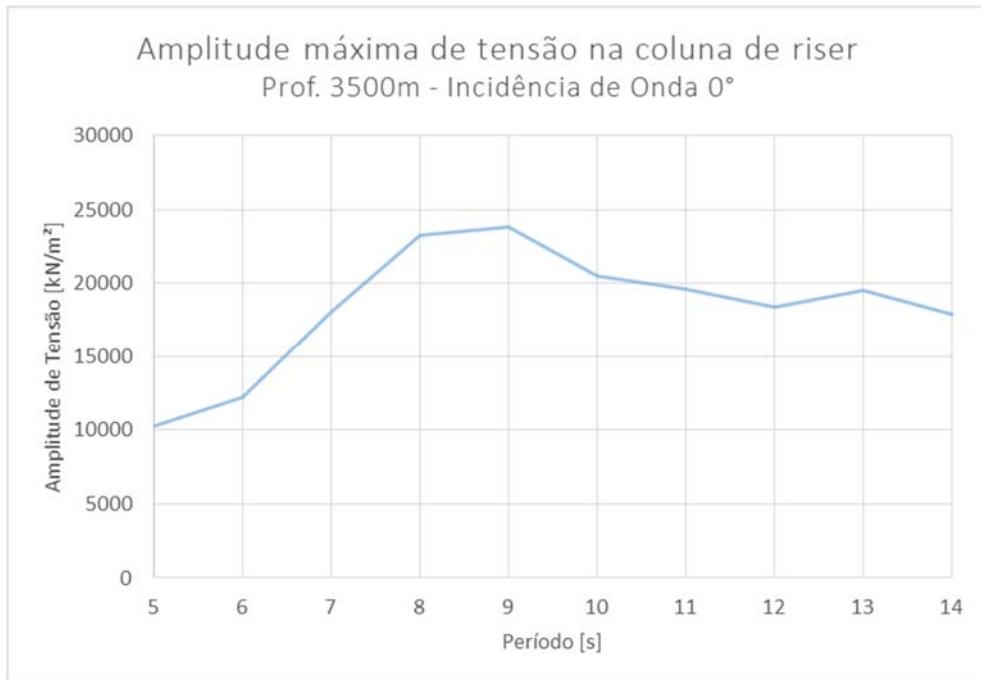


Figura 7.23 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3500m e incidência de onda de 0°

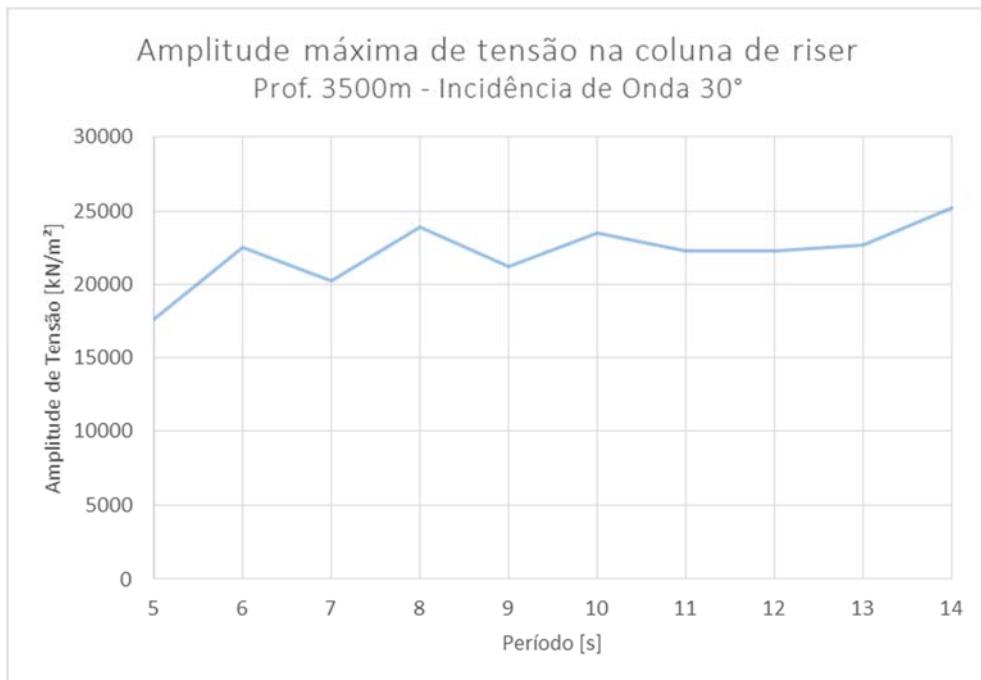


Figura 7.24 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3500m e incidência de onda de 30°

A Tabela 7.12 apresenta os valores mínimos dos esforços axiais ao longo da coluna de *riser*, a fim de verificar se o critério de não haver compressão é respeitado durante a instalação.

Tabela 7.12 - Esforços axiais mínimos na coluna de *riser* referentes ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3500m

Período (s)	Incidência de Onda (°)	Tração mínima no <i>riser</i> (kN)	Critério Normativo
5	0	3338.51	OK
6	0	3320.85	OK
7	0	3290.41	OK
8	0	3238.54	OK
9	0	3210.77	OK
10	0	3255.02	OK
11	0	3243.50	OK
12	0	3260.86	OK
13	0	3287.65	OK
14	0	3279.03	OK
5	30	3248.96	OK
6	30	3196.47	OK
7	30	3209.38	OK
8	30	3197.36	OK
9	30	3218.90	OK
10	30	3163.71	OK
11	30	3186.64	OK
12	30	3221.71	OK
13	30	3226.39	OK
14	30	3231.34	OK

7.2.1.7 Profundidade: 4000m

A Tabela 7.13 apresenta, para a profundidade de 4000 metros, a amplitude de tensão no topo do *riser* e as tensões média e máxima na seção de duto, além do limite definido pela norma. As Figuras 7.25 e 7.26 mostram os mesmos resultados graficamente para incidências de 0° e 30° respectivamente.

Tabela 7.13 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 4000m

Tp (s)	Incidência de Onda (°)	Amplitude de tensão (kN/m ²)	Tensão média (kN/m ²)	Tensão máxima (kN/m ²)	Limite normativo (kN/m ²)	Critério Normativo
5	0	10230	185816	196045	300160	OK
6	0	21694	185816	207509	300160	OK
7	0	24176	185816	209991	300160	OK
8	0	27251	185816	213066	300160	OK
9	0	29938	185816	215753	300160	OK
10	0	26848	185816	212663	300160	OK
11	0	24945	185816	210760	300160	OK
12	0	25448	185816	211263	300160	OK
13	0	26533	185816	212348	300160	OK
14	0	21504	185816	207319	300160	OK
5	30	21070	185816	206885	300160	OK
6	30	38288	185816	224103	300160	OK
7	30	31468	185816	217283	300160	OK
8	30	30441	185816	216256	300160	OK
9	30	27936	185816	213751	300160	OK
10	30	27336	185816	213151	300160	OK
11	30	26994	185816	212809	300160	OK
12	30	26212	185816	212027	300160	OK
13	30	27057	185816	212872	300160	OK
14	30	25627	185816	211442	300160	OK

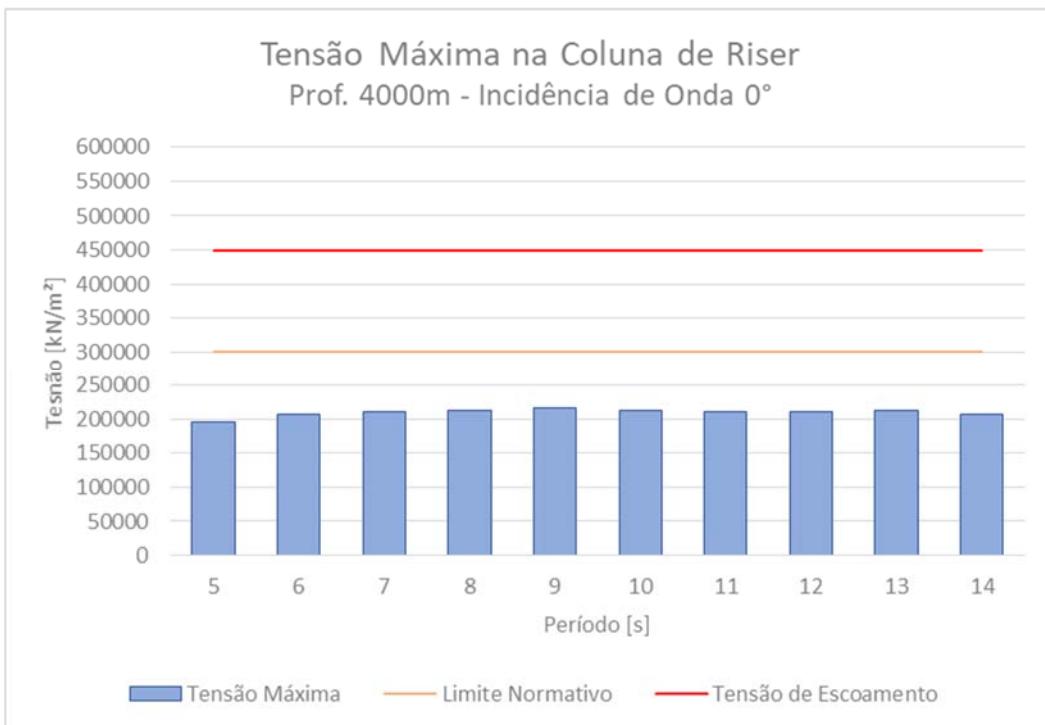


Figura 7.25 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 4000m e incidência de onda de 0°

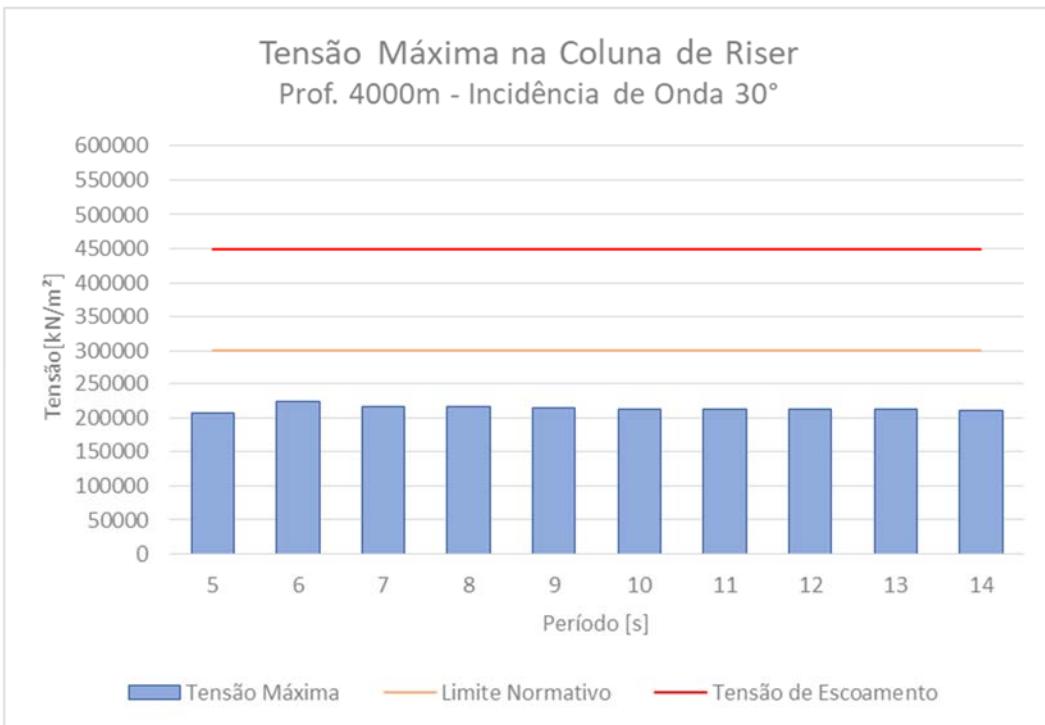


Figura 7.26 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 4000m e incidência de onda de 30°

Os gráficos das Figuras 7.27 e 7.28 apresentam a amplitude de tensão no topo dos modelos para cada período de onda estudado, com incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

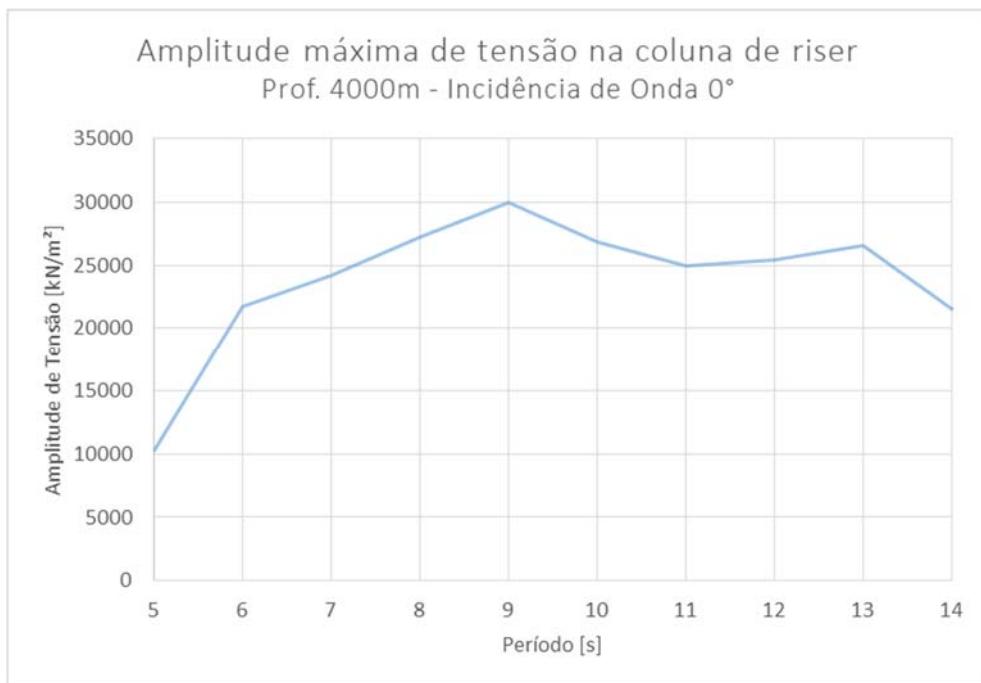


Figura 7.27 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 4000m e incidência de onda de 0°

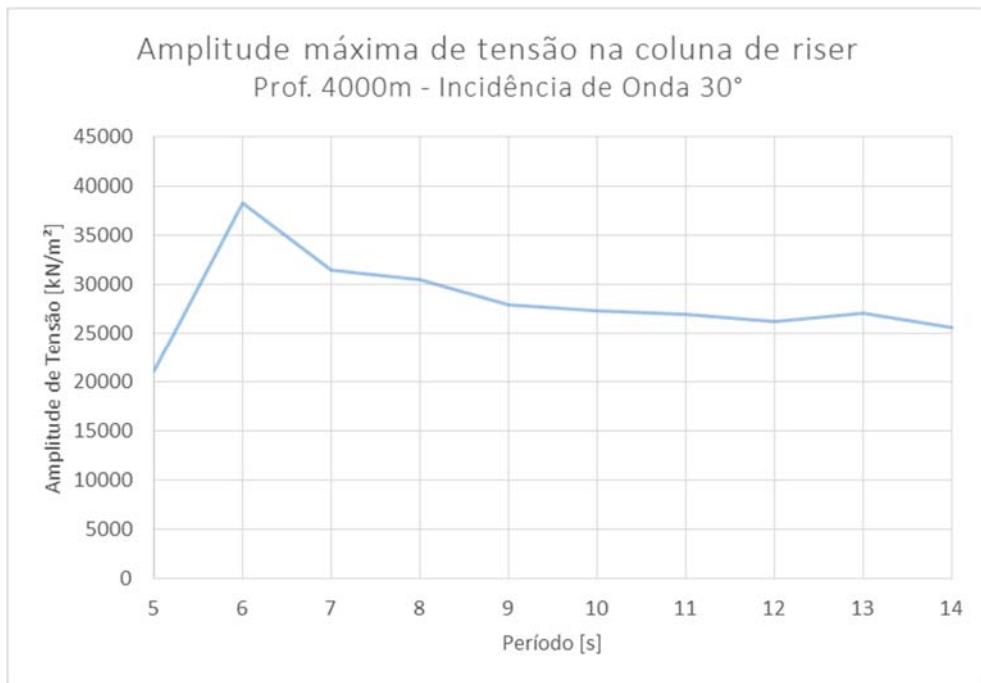


Figura 7.28 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 4000m e incidência de onda de 30°

A Tabela 7.14 apresenta os valores mínimos dos esforços axiais ao longo da coluna de *riser*, a fim de verificar se o critério de não haver compressão é respeitado durante a instalação.

Tabela 7.14 - Esforços axiais mínimos na coluna de *riser* referentes ao conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 4000m

Período (s)	Incidência de Onda (°)	Tração mínima no <i>riser</i> (kN)	Critério Normativo
5	0	3352.60	OK
6	0	3205.92	OK
7	0	3223.32	OK
8	0	3192.29	OK
9	0	3155.12	OK
10	0	3189.42	OK
11	0	3221.80	OK
12	0	3199.10	OK
13	0	3267.08	OK
14	0	3242.19	OK
5	30	3204.65	OK
6	30	2985.53	OK
7	30	3139.52	OK
8	30	3122.09	OK
9	30	3157.40	OK
10	30	3080.26	OK
11	30	3164.37	OK
12	30	3138.17	OK
13	30	3146.36	OK
14	30	3160.61	OK

7.2.2 Resultados de Deslocamento Vertical dos Equipamentos

As seções a seguir apresentam tabelas e gráficos com os valores de deslocamento em z do conjunto BOP/LMRP para cada período de pico estudado, os gráficos estão separados por profundidade e incidência de onda. O Apêndice A - apresenta os gráficos de série de movimento dos equipamentos na situação mais crítica (T_p 14s) e menos crítica (T_p 5s) e o Apêndice B - apresenta uma comparação das amplitudes máximas de deslocamento em z em cada profundidade.

7.2.2.1 Profundidade: 1000m

A Tabela 7.15 apresenta, para cada período analisado na profundidade de 1000 metros, os valores de *heave* mínimo e máximo do conjunto de equipamentos ao longo da análise dinâmica. A última coluna da tabela mostra a amplitude máxima de deslocamento em z do conjunto de equipamentos ao longo da série de movimentos.

Tabela 7.15 – Movimento em *heave* do conjunto de equipamentos 1, a uma profundidade de 1000 metros

Período (s)	<i>Heave</i> (m)		Aplitude máxima de deslocamento em z (m)
	Máximo	Mínimo	
5	-0.31	-0.38	0.07
6	-0.25	-0.44	0.19
7	-0.09	-0.59	0.50
8	0.02	-0.71	0.73
9	0.18	-0.88	1.06
10	0.17	-0.90	1.08
11	0.22	-0.92	1.14
12	0.30	-1.04	1.34
13	0.45	-1.22	1.67
14	0.59	-1.37	1.96
5	-0.30	-0.40	0.10
6	-0.22	-0.46	0.24
7	-0.14	-0.55	0.41
8	0.03	-0.72	0.75
9	0.12	-0.82	0.94
10	0.24	-0.91	1.16
11	0.31	-1.03	1.34
12	0.45	-1.13	1.58
13	0.61	-1.26	1.86
14	0.73	-1.57	2.30

As Figuras 7.29 e 7.30 fazem uma relação da amplitude máxima de movimento vertical com o período de onda de pico para cada situação estudada.

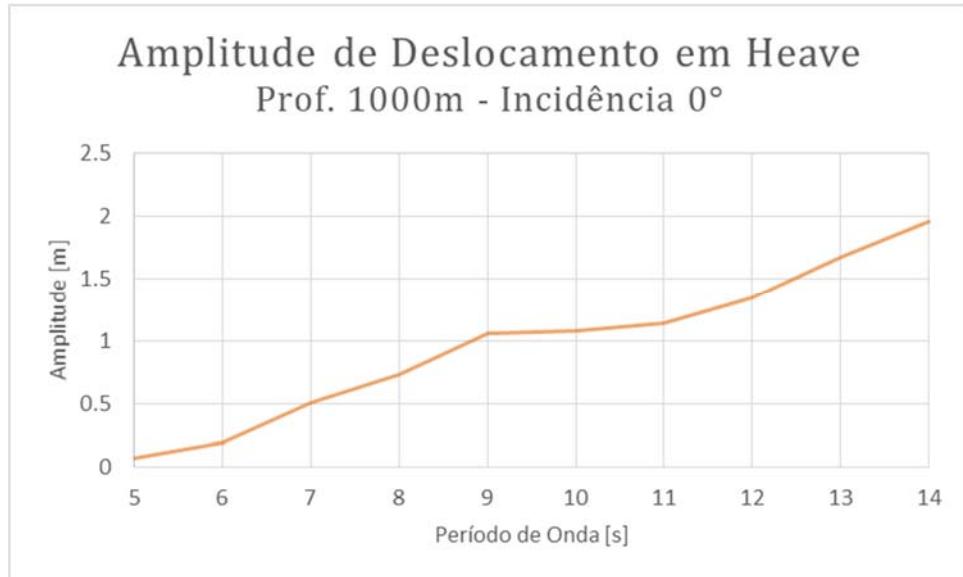


Figura 7.29 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 1 com profundidade de 1000m e incidência de 0°

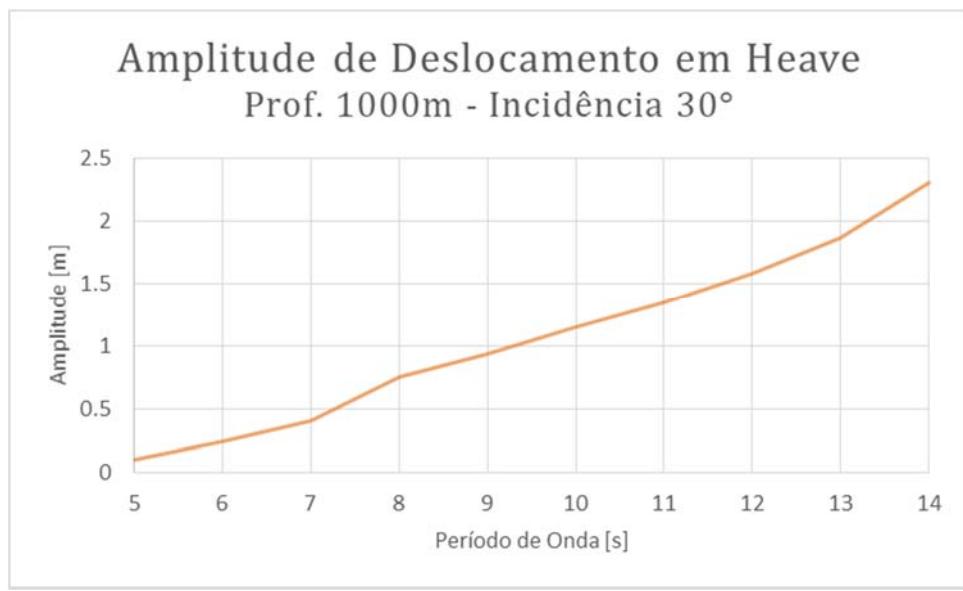


Figura 7.30 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 1 com profundidade de 1000m e incidência de 30°

7.2.2.2 Profundidade: 1500m

A Tabela 7.16 apresenta, para cada período analisado na profundidade de 1500 metros, os valores de *heave* mínimo e máximo do conjunto de equipamentos ao longo da análise dinâmica. A última coluna da tabela mostra a amplitude máxima de deslocamento em z do conjunto de equipamentos ao longo da série de movimentos.

Tabela 7.16 – Movimento em *heave* do conjunto de equipamentos 1, a uma profundidade de 1500 metros

Período (s)	<i>Heave</i> (m)		Aplitude máx de deslocamento em z (m)
	Máximo	Mínimo	
5	-0.29	-0.36	0.08
6	-0.23	-0.44	0.21
7	-0.06	-0.59	0.53
8	0.06	-0.72	0.78
9	0.23	-0.89	1.12
10	0.22	-0.91	1.13
11	0.26	-0.92	1.18
12	0.34	-1.04	1.38
13	0.48	-1.22	1.71
14	0.62	-1.37	2.00
5	-0.27	-0.39	0.11
6	-0.19	-0.45	0.26
7	-0.11	-0.55	0.44
8	0.07	-0.73	0.81
9	0.17	-0.83	1.00
10	0.29	-0.92	1.20
11	0.36	-1.03	1.39
12	0.49	-1.12	1.61
13	0.64	-1.25	1.90
14	0.77	-1.58	2.35

As Figuras 7.31 e 7.32 fazem uma relação da amplitude máxima de movimento vertical com o período de onda de pico para cada situação estudada.

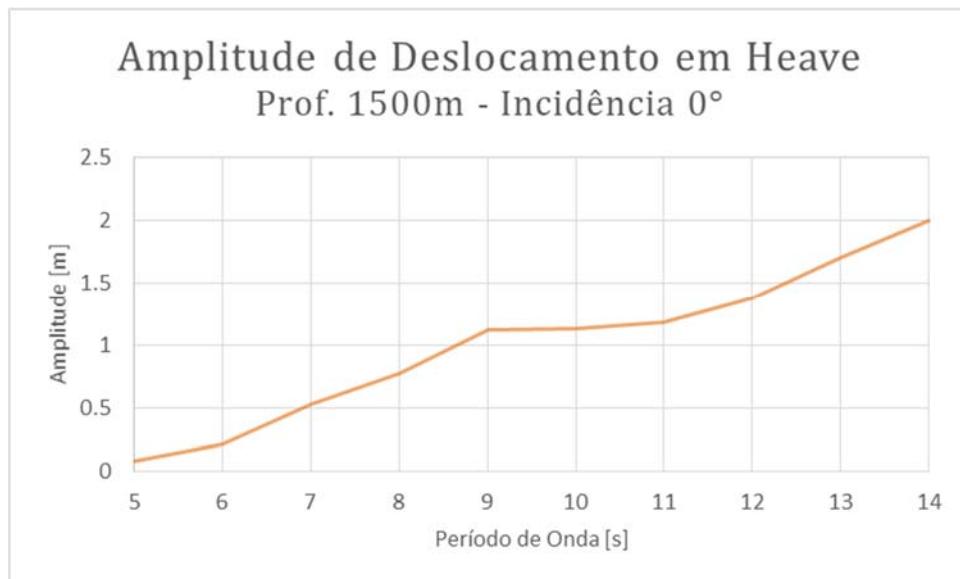


Figura 7.31 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 1 com profundidade de 1500m e incidência de 0°

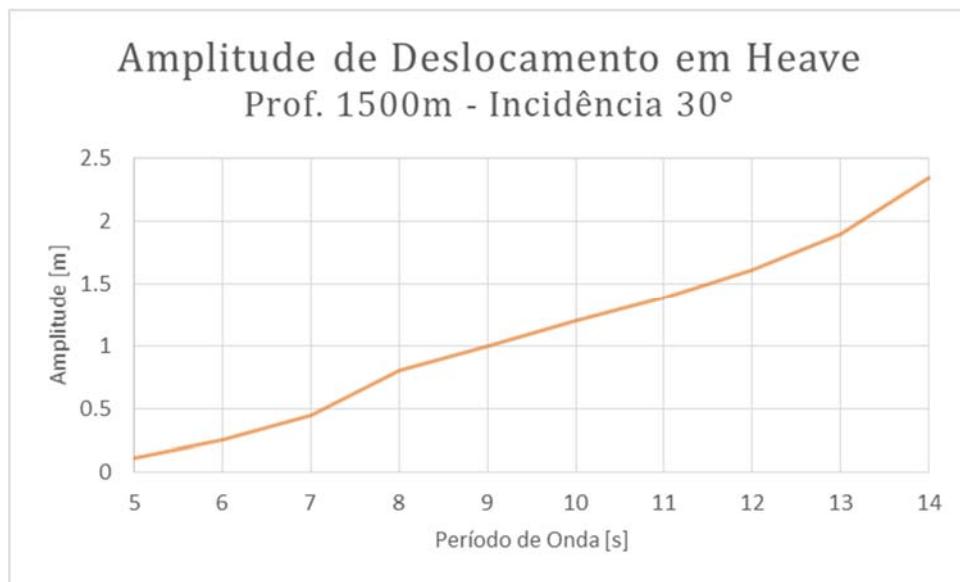


Figura 7.32 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 1 com profundidade de 1500m e incidência de 30°

7.2.2.3 Profundidade: 2000m

A Tabela 7.17 apresenta, para cada período analisado na profundidade de 2000 metros, os valores de *heave* mínimo e máximo do conjunto de equipamentos ao longo da análise dinâmica. A última coluna da tabela mostra a amplitude máxima de deslocamento em z do conjunto de equipamentos ao longo da série de movimentos.

Tabela 7.17 – Movimento em *heave* do conjunto de equipamentos 1, a uma profundidade de 2000 metros

Período (s)	<i>Heave</i> (m)		Aplitude máx de deslocamento em z (m)
	Máximo	Mínimo	
5	-0.24	-0.34	0.10
6	-0.18	-0.41	0.23
7	0.00	-0.57	0.57
8	0.13	-0.70	0.84
9	0.30	-0.88	1.18
10	0.29	-0.90	1.19
11	0.33	-0.91	1.23
12	0.40	-1.02	1.42
13	0.54	-1.22	1.76
14	0.68	-1.36	2.04
5	-0.22	-0.35	0.13
6	-0.13	-0.43	0.30
7	-0.06	-0.54	0.48
8	0.13	-0.72	0.85
9	0.24	-0.82	1.06
10	0.37	-0.92	1.29
11	0.43	-1.03	1.46
12	0.55	-1.11	1.66
13	0.71	-1.24	1.95
14	0.83	-1.57	2.40

As Figuras 7.33 e 7.34 fazem uma relação da amplitude máxima de movimento vertical com o período de onda de pico para cada situação estudada.

Amplitude de Deslocamento em Heave
Prof. 2000m - Incidência 0°

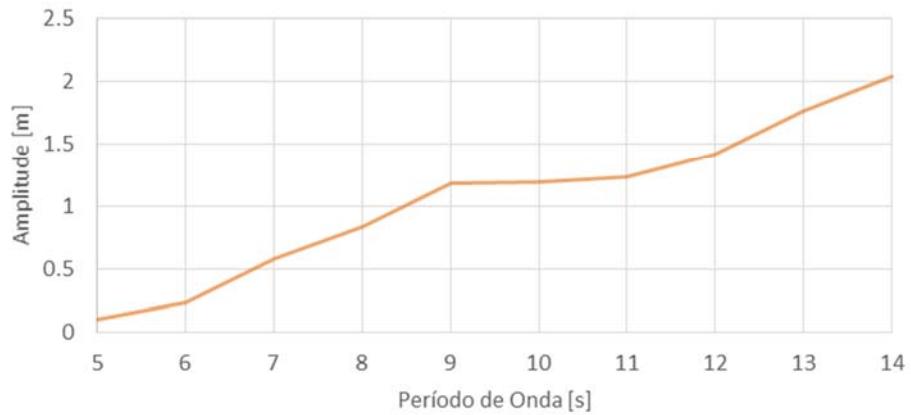


Figura 7.33 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 1 com profundidade de 2000m e incidência de 0°

Amplitude de Deslocamento em Heave
Prof. 2000m - Incidência 30°

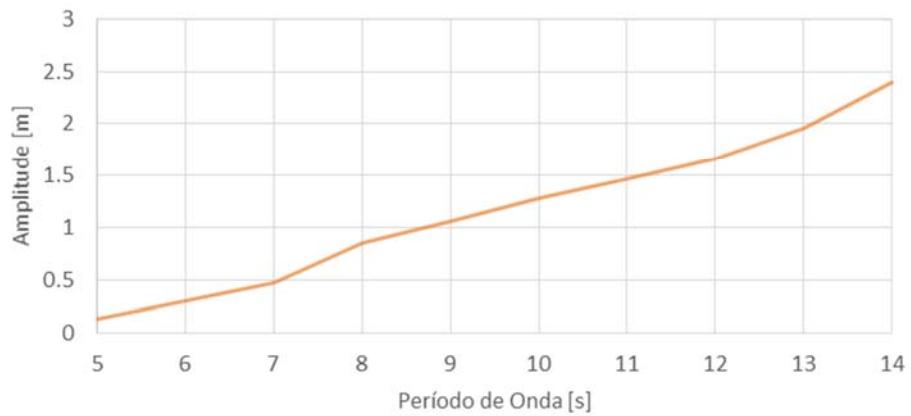


Figura 7.34 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 1 com profundidade de 2000m e incidência de 30°

7.2.2.4 Profundidade: 2500m

A Tabela 7.18 apresenta, para cada período analisado na profundidade de 2500 metros, os valores de *heave* mínimo e máximo do conjunto de equipamentos ao longo da análise dinâmica. A última coluna da tabela mostra a amplitude máxima de deslocamento em z do conjunto de equipamentos ao longo da série de movimentos.

Tabela 7.18 – Movimento em *heave* do conjunto de equipamentos 1, a uma profundidade de 2500 metros

Período (s)	<i>Heave</i> (m)		Aplitude máx de deslocamento em z (m)
	Máximo	Mínimo	
5	-0.12	-0.34	0.22
6	-0.09	-0.39	0.30
7	0.09	-0.56	0.65
8	0.23	-0.69	0.93
9	0.41	-0.88	1.29
10	0.39	-0.90	1.29
11	0.41	-0.89	1.30
12	0.47	-0.99	1.46
13	0.63	-1.20	1.82
14	0.77	-1.33	2.10
5	-0.14	-0.33	0.19
6	-0.04	-0.41	0.37
7	0.04	-0.50	0.54
8	0.23	-0.70	0.93
9	0.35	-0.79	1.13
10	0.47	-0.89	1.36
11	0.52	-1.02	1.54
12	0.65	-1.10	1.75
13	0.81	-1.22	2.02
14	0.92	-1.55	2.48

As Figuras 7.35 e 7.36 fazem uma relação da amplitude máxima de movimento vertical com o período de onda de pico para cada situação estudada.

Amplitude de Deslocamento em Heave
Prof. 2500m - Incidência 0°

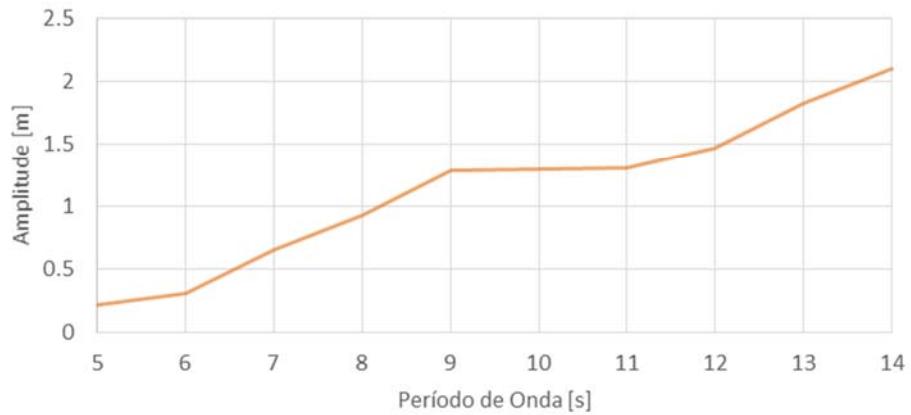


Figura 7.35 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 1 com profundidade de 2500m e incidência de 0°

Amplitude de Deslocamento em Heave
Prof. 2500m - Incidência 30°

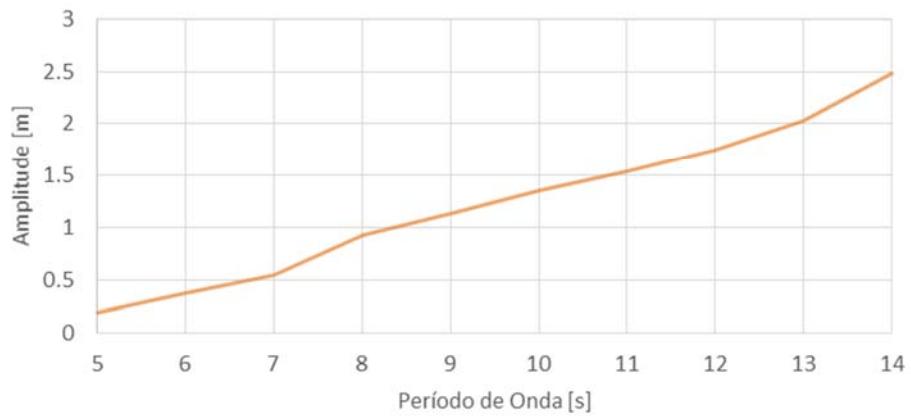


Figura 7.36 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 1 com profundidade de 2500m e incidência de 30°

7.2.2.5 Profundidade: 3000m

A Tabela 7.19 apresenta, para cada período analisado na profundidade de 3000 metros, os valores de *heave* mínimo e máximo do conjunto de equipamentos ao longo da análise dinâmica. A última coluna da tabela mostra a amplitude máxima de deslocamento em z do conjunto de equipamentos ao longo da série de movimentos.

Tabela 7.19 – Movimento em *heave* do conjunto de equipamentos 1, a uma profundidade de 3000 metros

Período (s)	<i>Heave</i> (m)		Aplitude máx de deslocamento em z (m)
	Máximo	Mínimo	
5	0.09	-0.21	0.30
6	0.14	-0.26	0.40
7	0.33	-0.39	0.72
8	0.41	-0.61	1.03
9	0.65	-0.77	1.42
10	0.60	-0.79	1.39
11	0.63	-0.78	1.41
12	0.68	-0.86	1.54
13	0.85	-1.06	1.91
14	0.97	-1.19	2.16
5	0.12	-0.23	0.35
6	0.19	-0.30	0.49
7	0.28	-0.37	0.65
8	0.46	-0.58	1.03
9	0.52	-0.71	1.23
10	0.68	-0.76	1.45
11	0.72	-0.91	1.62
12	0.86	-0.98	1.84
13	1.01	-1.08	2.09
14	1.12	-1.41	2.53

As Figuras 7.37 e 7.38 fazem uma relação da amplitude máxima de movimento vertical com o período de onda de pico para cada situação estudada.

Amplitude de Deslocamento em Heave
Prof. 3000m - Incidência 0°

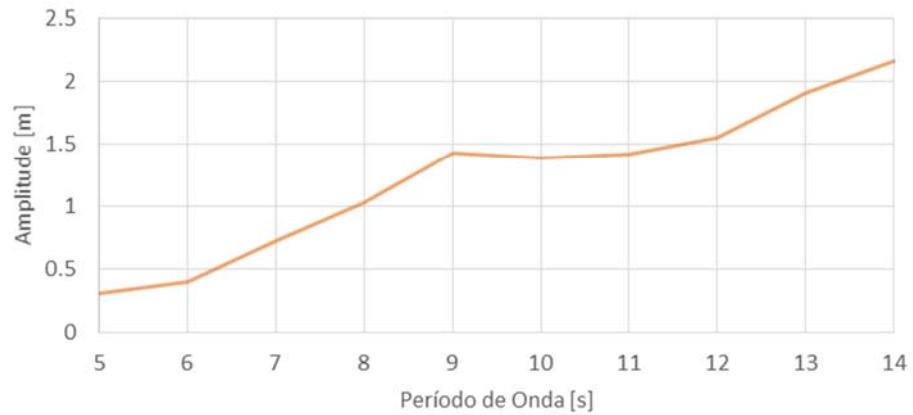


Figura 7.37 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 1 com profundidade de 3000m e incidência de 0°

Amplitude de Deslocamento em Heave
Prof. 3000m - Incidência 30°

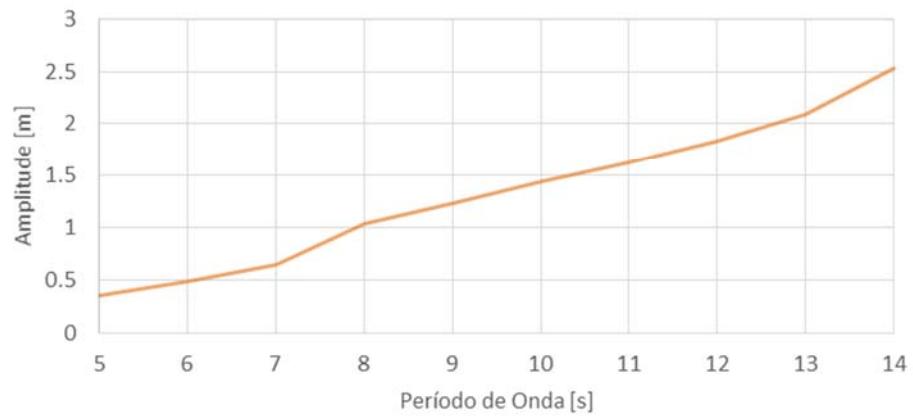


Figura 7.38 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 1 com profundidade de 3000m e incidência de 30°

7.2.2.6 Profundidade: 3500m

A Tabela 7.20 apresenta, para cada período analisado na profundidade de 3500 metros, os valores de *heave* mínimo e máximo do conjunto de equipamentos ao longo da análise dinâmica. A última coluna da tabela mostra a amplitude máxima de deslocamento em z do conjunto de equipamentos ao longo da série de movimentos.

Tabela 7.20 – Movimento em *heave* do conjunto de equipamentos 1, a uma profundidade de 3500 metros

Período (s)	<i>Heave</i> (m)		Aplitude máx de deslocamento em z (m)
	Máximo	Mínimo	
5	0.39	0.08	0.31
6	0.48	0.01	0.47
7	0.67	-0.22	0.89
8	0.83	-0.39	1.22
9	1.02	-0.55	1.57
10	0.97	-0.54	1.51
11	1.01	-0.53	1.54
12	1.04	-0.61	1.65
13	1.17	-0.84	2.01
14	1.32	-0.96	2.28
5	0.49	-0.03	0.52
6	0.60	-0.16	0.76
7	0.70	-0.18	0.88
8	0.86	-0.42	1.28
9	0.90	-0.45	1.36
10	1.12	-0.50	1.62
11	1.17	-0.67	1.85
12	1.20	-0.76	1.96
13	1.34	-0.81	2.15
14	1.50	-1.19	2.68

As Figuras 7.39 e 7.40 fazem uma relação da amplitude máxima de movimento vertical com o período de onda de pico para cada situação estudada.

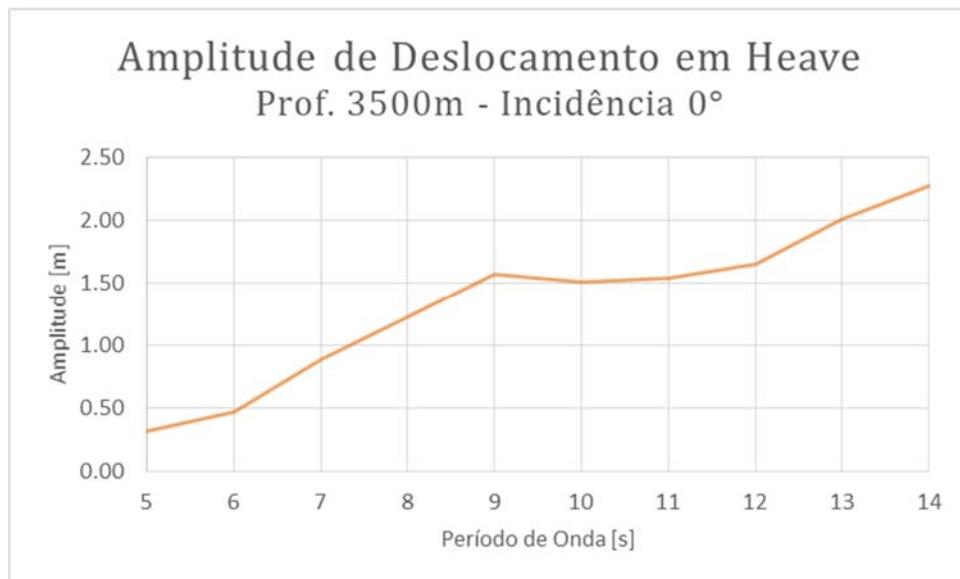


Figura 7.39 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 1 com profundidade de 3500m e incidência de 0°

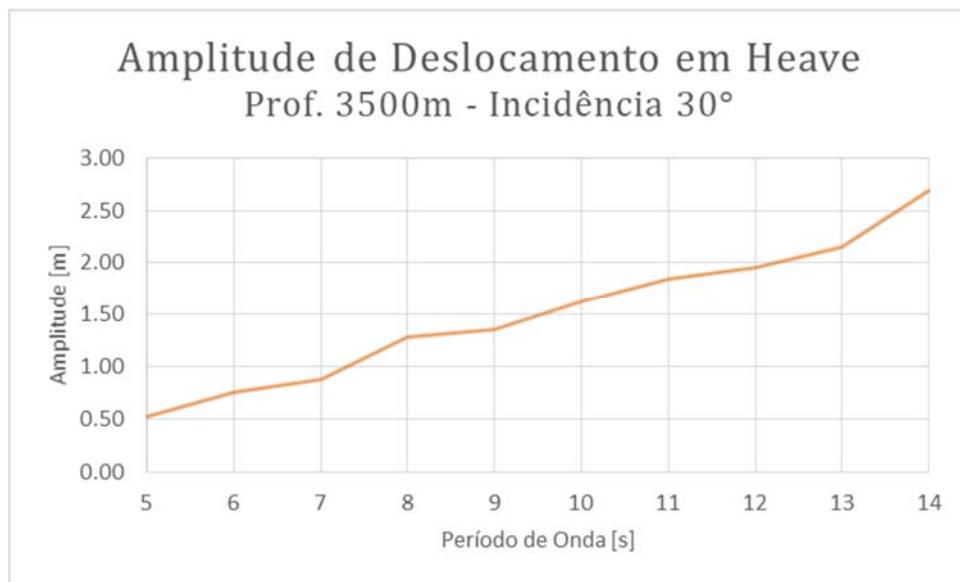


Figura 7.40 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 1 com profundidade de 3500m e incidência de 30°

7.2.2.7 Profundidade: 4000m

A Tabela 7.21 apresenta, para cada período analisado na profundidade de 4000 metros, os valores de *heave* mínimo e máximo do conjunto de equipamentos ao longo da análise dinâmica. A última coluna da tabela mostra a amplitude máxima de deslocamento em z do conjunto de equipamentos ao longo da série de movimentos.

Tabela 7.21 – Movimento em *heave* do conjunto de equipamentos 1, a uma profundidade de 4000 metros

Período (s)	<i>Heave</i> (m)		Aplitude máx de deslocamento em z (m)
	Máximo	Mínimo	
5	0.81	0.47	0.34
6	1.01	0.26	0.75
7	1.17	0.09	1.08
8	1.36	-0.08	1.44
9	1.53	-0.23	1.77
10	1.47	-0.25	1.73
11	1.50	-0.20	1.70
12	1.56	-0.29	1.86
13	1.65	-0.56	2.22
14	1.74	-0.56	2.30
5	0.98	0.30	0.69
6	1.30	0.01	1.29
7	1.24	0.00	1.24
8	1.42	-0.13	1.55
9	1.45	-0.11	1.56
10	1.70	-0.20	1.91
11	1.66	-0.28	1.94
12	1.74	-0.39	2.14
13	1.88	-0.56	2.45
14	2.07	-0.77	2.83

As Figuras 7.41 e 7.42 fazem uma relação da amplitude máxima de movimento vertical com o período de onda de pico para cada situação estudada.

Amplitude de Deslocamento em Heave
Prof. 4000m - Incidência 0°

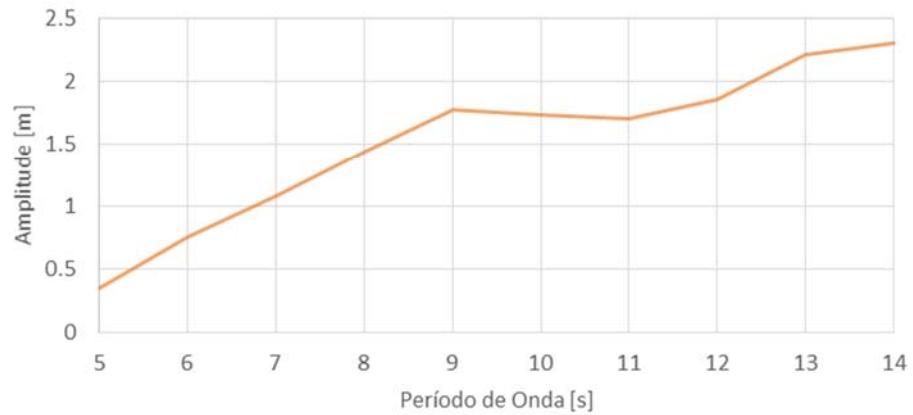


Figura 7.41 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 1 com profundidade de 4000m e incidência de 0°

Amplitude de Deslocamento em Heave
Prof. 4000m - Incidência 30°

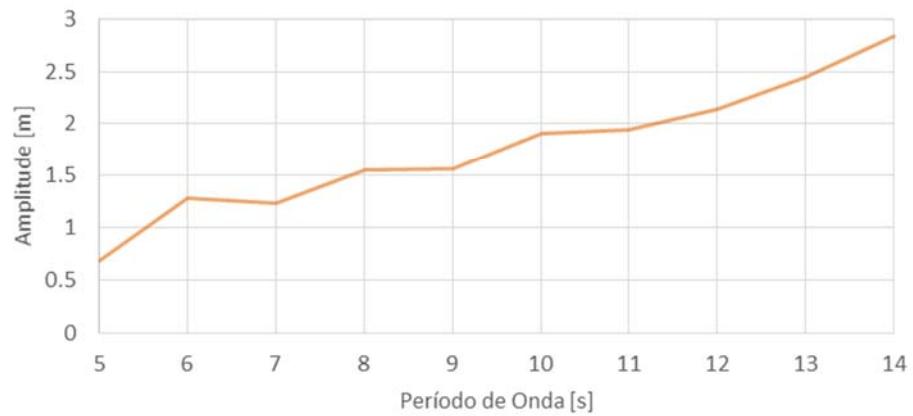


Figura 7.42 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 1 com profundidade de 4000m e incidência de 30°

7.2.3 Resultados de Ângulo Máximo da *Lower Flex Joint*

De acordo com a norma [4], o ângulo da *lower flex joint* não deve superar o valor de 3.6 graus em situações em que o *riser* está conectado ao LMRP porém a operação de perfuração não está sendo executada. A norma não especifica os critérios para casos de instalação de equipamento, por isso serão utilizados os da tabela.

Foi verificado que os ângulos obtidos nos resultados dos modelos estão muito abaixo no limite especificado na norma, por isso foi selecionada a profundidade que apresentou os valores mais críticos de amplitude de *heave* para a plotagem dos resultados. No caso do conjunto de equipamentos 1 a profundidade selecionada foi de 4000 metros e a incidência de onda de 30 graus. Os valores do ângulo máximo da *lower flex joint* para cada caso de carregamento podem ser verificados na Tabela 7.22.

Tabela 7.22 – Ângulo máximo da *lower flex joint* do conjunto 1, a uma profundidade de 4000 metros e com incidência de onda de 30°

Período (s)	Ângulo Máximo da <i>lower flex joint</i> (°)	Limite normativo (°)	Critério Normativo
5	0.004	3.6	OK
6	0.004	3.6	OK
7	0.006	3.6	OK
8	0.008	3.6	OK
9	0.007	3.6	OK
10	0.007	3.6	OK
11	0.006	3.6	OK
12	0.005	3.6	OK
13	0.005	3.6	OK
14	0.006	3.6	OK

7.3 Conjunto de Equipamentos 2

7.3.1 Resultados de Tensão por Estado de Mar em cada Profundidade

7.3.1.1 Profundidade: 1000m

A Tabela 7.23 apresenta, para a profundidade de 1000 metros, a amplitude de tensão no topo do *riser* e as tensões média e máxima na seção de duto, além do limite definido pela norma. As Figuras 7.43 e 7.44 mostram os mesmos resultados graficamente para incidências de 0° e 30° respectivamente.

Tabela 7.23 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1000m

Tp (s)	Incidência de Onda (°)	Amplitude de tensão (kN/m ²)	Tensão média (kN/m ²)	Tensão máxima (kN/m ²)	Limite normativo (kN/m ²)	Critério Normativo
5	0	3983	202848	206831	300160	OK
6	0	4723	202848	207571	300160	OK
7	0	7111	202848	209959	300160	OK
8	0	8421	202848	211269	300160	OK
9	0	10978	202848	213826	300160	OK
10	0	9906	202848	212754	300160	OK
11	0	9928	202848	212776	300160	OK
12	0	9649	202848	212497	300160	OK
13	0	10084	202848	212932	300160	OK
14	0	9322	202848	212170	300160	OK
5	30	3932	202848	206780	300160	OK
6	30	5285	202848	208133	300160	OK
7	30	7560	202848	210408	300160	OK
8	30	10419	202848	213267	300160	OK
9	30	9301	202848	212149	300160	OK
10	30	10516	202848	213364	300160	OK
11	30	10225	202848	213073	300160	OK
12	30	9670	202848	212518	300160	OK
13	30	9816	202848	212664	300160	OK
14	30	12311	202848	215159	300160	OK

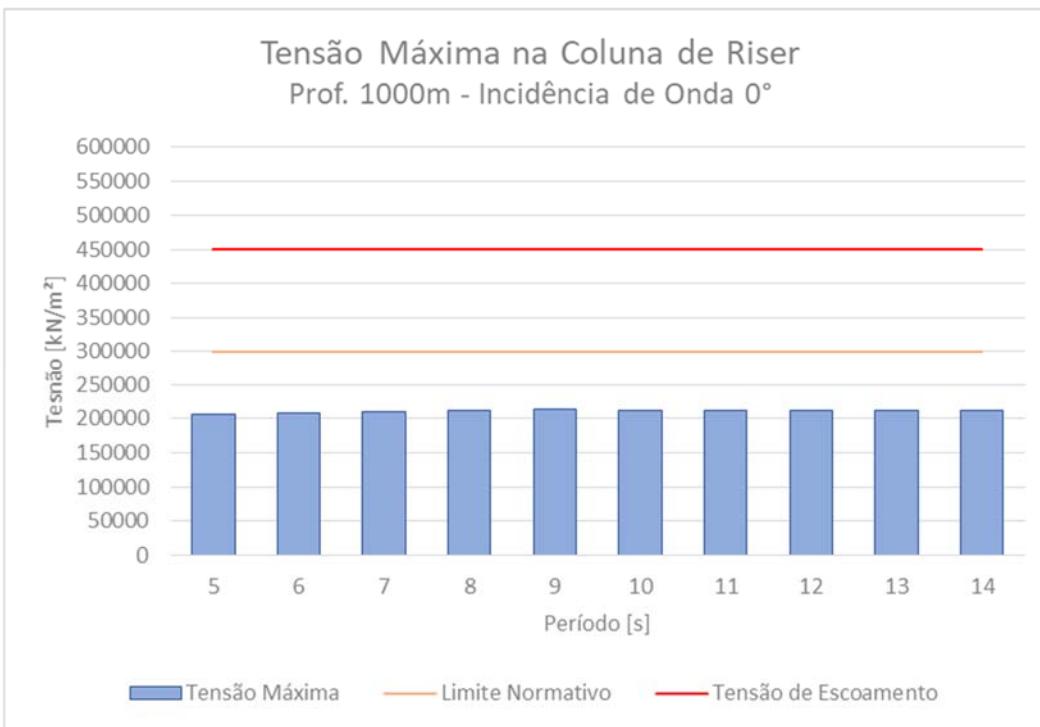


Figura 7.43 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1000m e incidência de onda de 0°

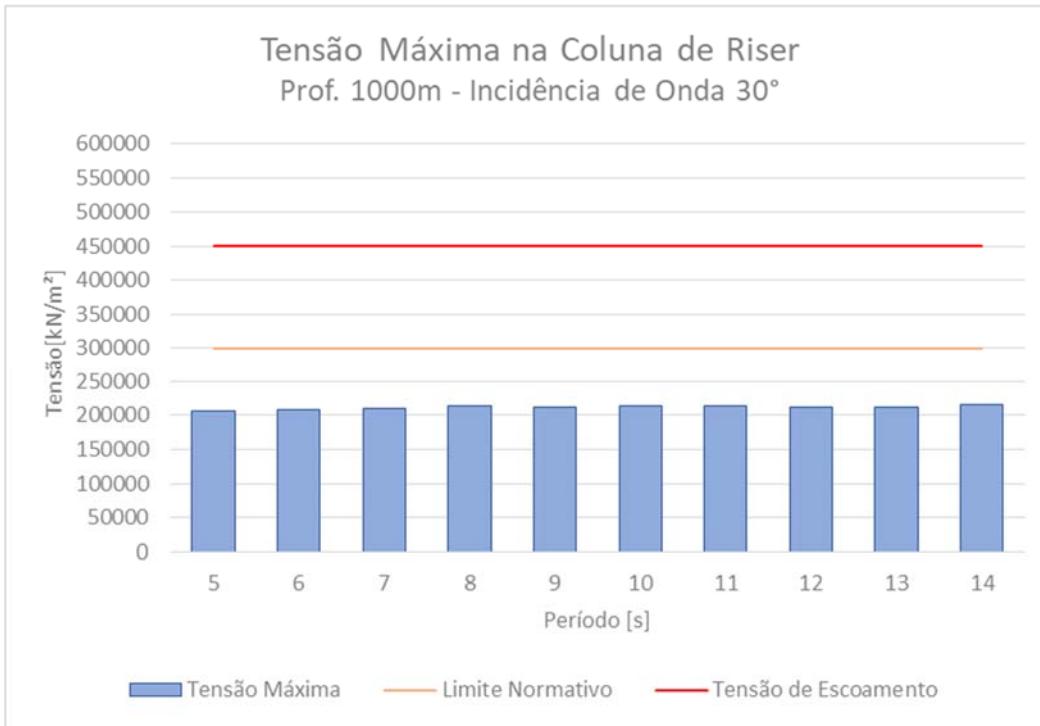


Figura 7.44 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1000m e incidência de onda de 30°

Os gráficos das Figuras 7.45 e 7.46 apresentam a amplitude de tensão no topo dos modelos para cada período de onda estudado, com incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

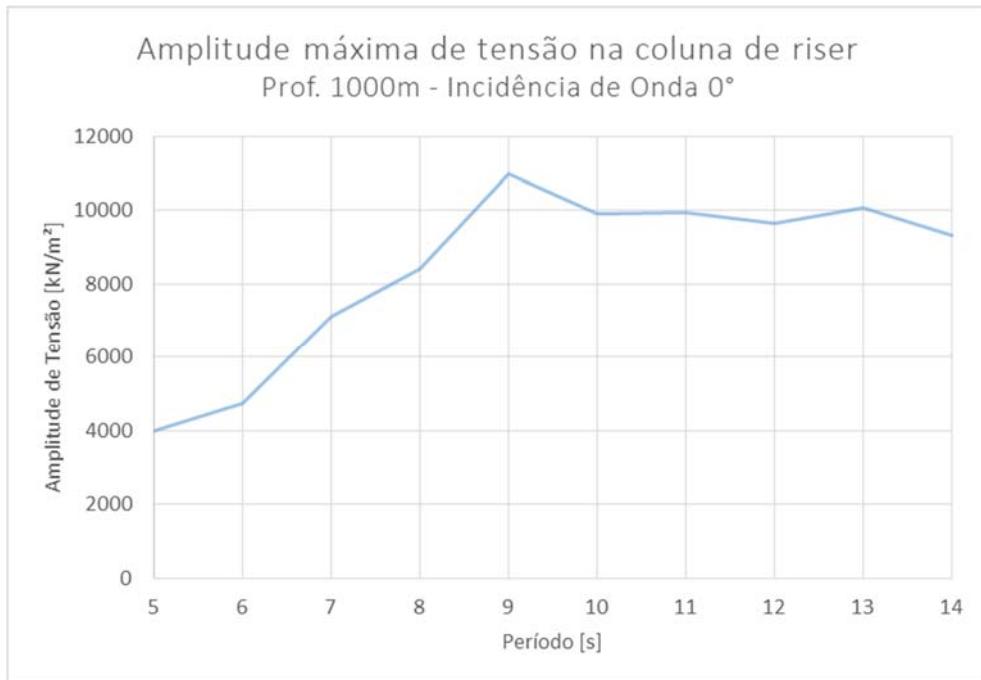


Figura 7.45 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1000m e incidência de onda de 0°

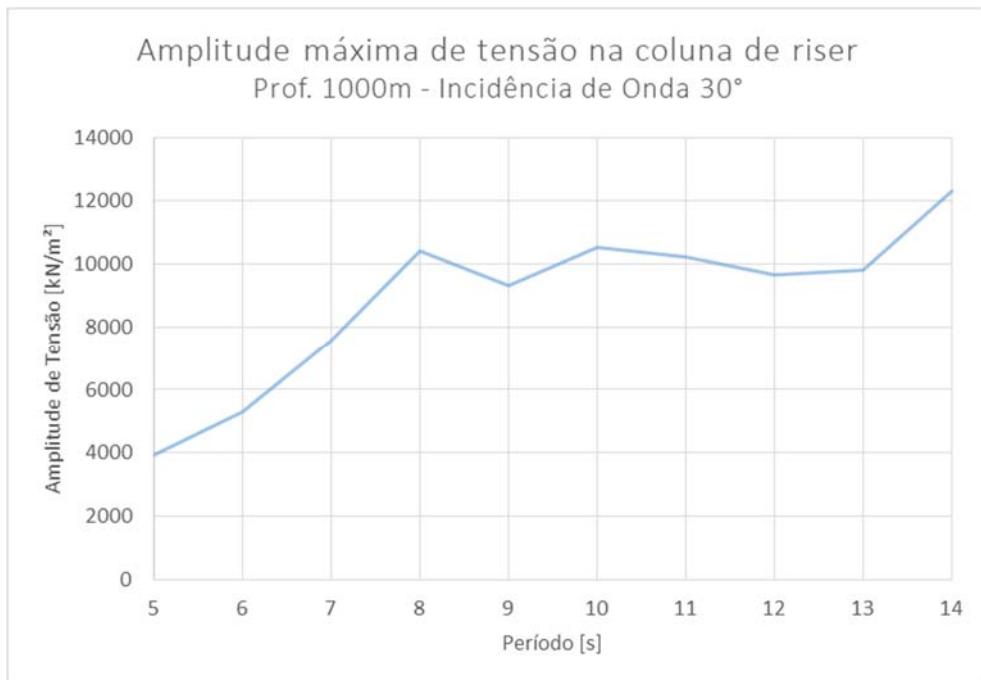


Figura 7.46 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1000m e incidência de onda de 30°

A Tabela 7.24 apresenta os valores mínimos dos esforços axiais ao longo da coluna de *riser*, a fim de verificar se o critério de não haver compressão é respeitado durante a instalação.

Tabela 7.24 - Esforços axiais mínimos na coluna de *riser* referentes ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1000m

Período (s)	Incidência de Onda (°)	Tração mínima no <i>riser</i> (kN)	Critério Normativo
5	0	5182.54	OK
6	0	5169.15	OK
7	0	5122.21	OK
8	0	5097.71	OK
9	0	5035.19	OK
10	0	5070.38	OK
11	0	5068.00	OK
12	0	5085.93	OK
13	0	5097.33	OK
14	0	5060.13	OK
5	30	5193.34	OK
6	30	5163.68	OK
7	30	5102.07	OK
8	30	5053.43	OK
9	30	5067.02	OK
10	30	5051.21	OK
11	30	5075.70	OK
12	30	5064.83	OK
13	30	5031.43	OK
14	30	5025.67	OK

7.3.1.2 Profundidade: 1500m

A Tabela 7.25 apresenta, para a profundidade de 1500 metros, a amplitude de tensão no topo do *riser* e as tensões média e máxima na seção de duto, além do limite definido pela norma. As Figuras 7.47 e 7.48 mostram os mesmos resultados graficamente para incidências de 0° e 30° respectivamente.

Tabela 7.25 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1500m

Tp (s)	Incidência de Onda (°)	Amplitude de tensão (kN/m ²)	Tensão média (kN/m ²)	Tensão máxima (kN/m ²)	Limite normativo (kN/m ²)	Critério Normativo
5	0	4150	209038	213188	300160	OK
6	0	4497	209038	213535	300160	OK
7	0	9167	209038	218205	300160	OK
8	0	10434	209038	219472	300160	OK
9	0	13264	209038	222302	300160	OK
10	0	12483	209038	221521	300160	OK
11	0	11874	209038	220912	300160	OK
12	0	11949	209038	220987	300160	OK
13	0	12070	209038	221108	300160	OK
14	0	11435	209038	220473	300160	OK
5	30	3979	209038	213017	300160	OK
6	30	6695	209038	215733	300160	OK
7	30	9063	209038	218101	300160	OK
8	30	11015	209038	220053	300160	OK
9	30	11300	209038	220338	300160	OK
10	30	12142	209038	221180	300160	OK
11	30	12174	209038	221212	300160	OK
12	30	13085	209038	222123	300160	OK
13	30	12744	209038	221782	300160	OK
14	30	14699	209038	223737	300160	OK

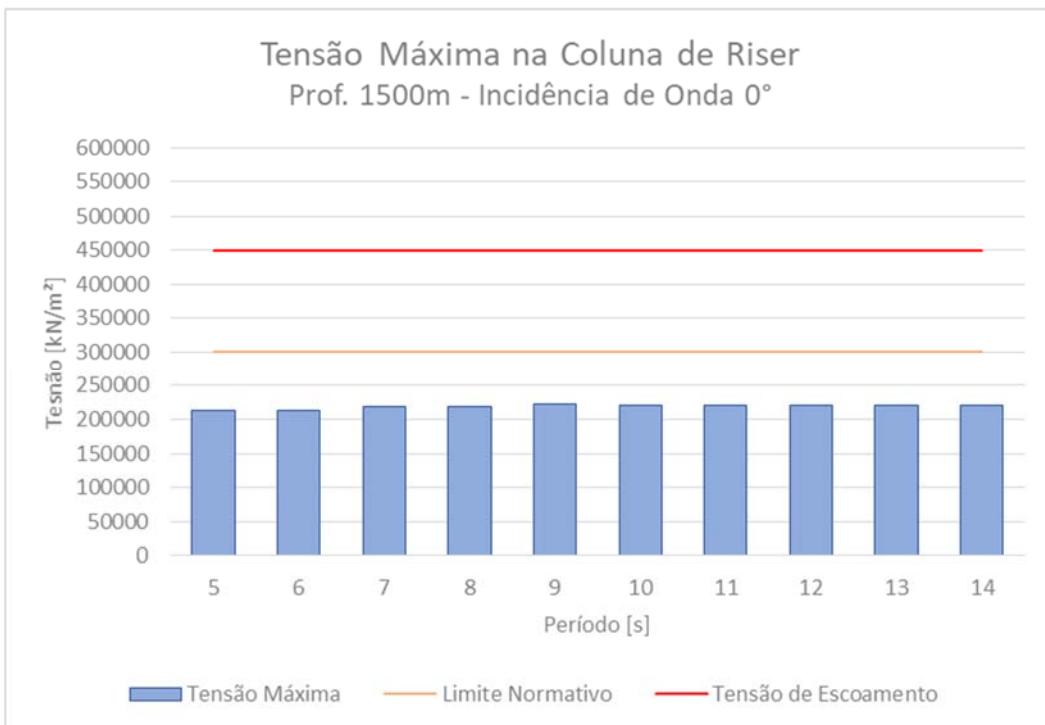


Figura 7.47 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1500m e incidência de onda de 0°

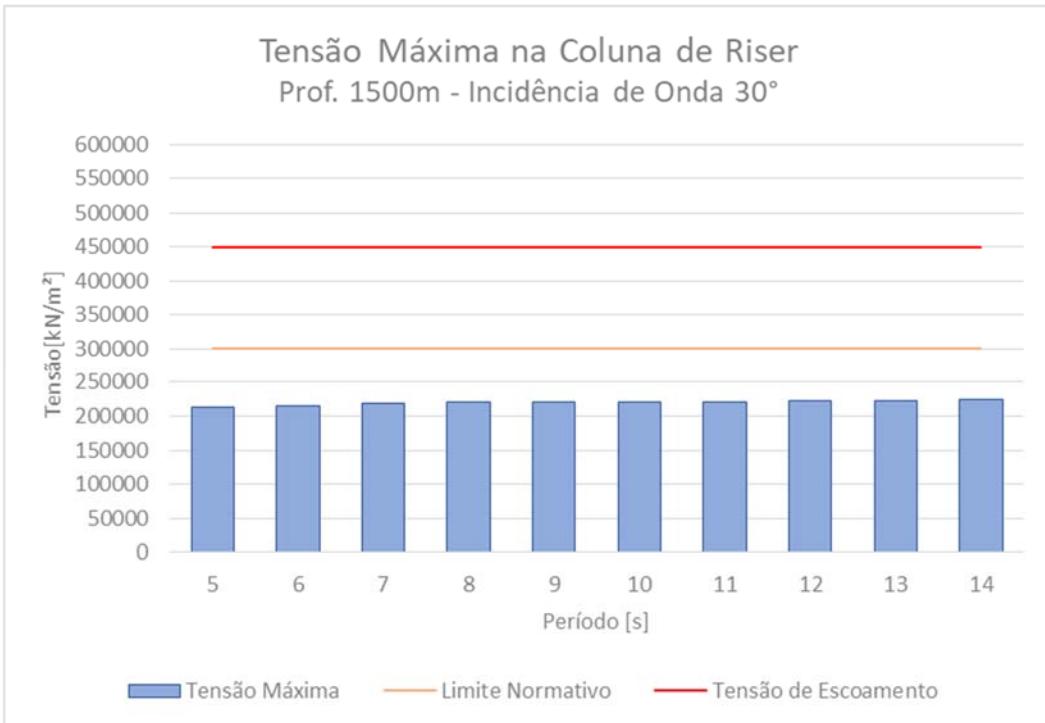


Figura 7.48 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1500m e incidência de onda de 30°

Os gráficos das Figuras 7.49 e 7.50 apresentam a amplitude de tensão no topo dos modelos para cada período de onda estudado, com incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

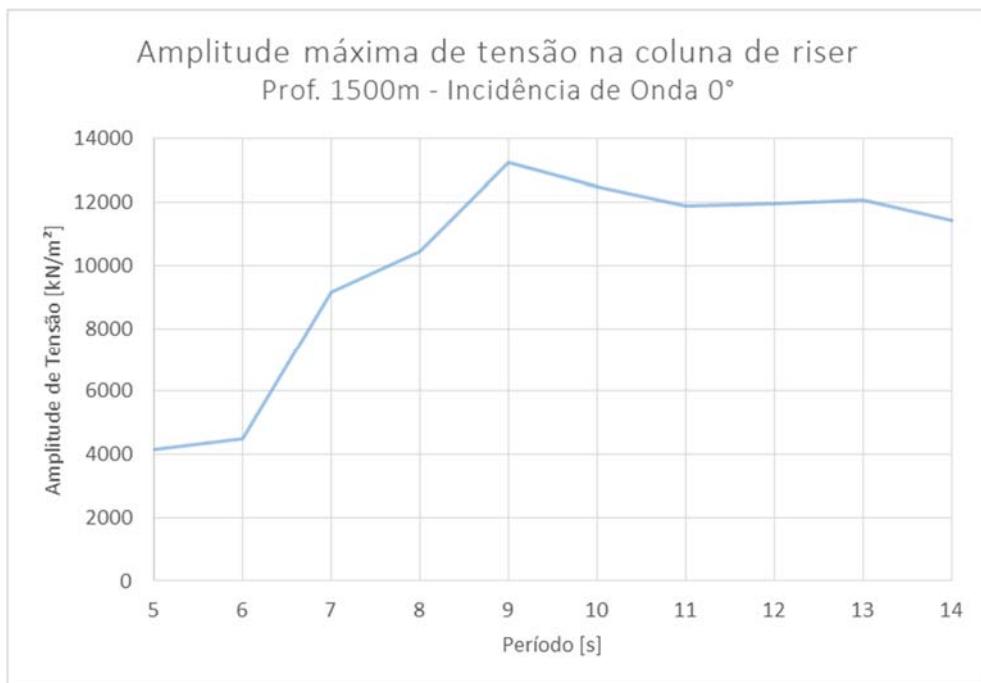


Figura 7.49 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1500m e incidência de onda de 0°

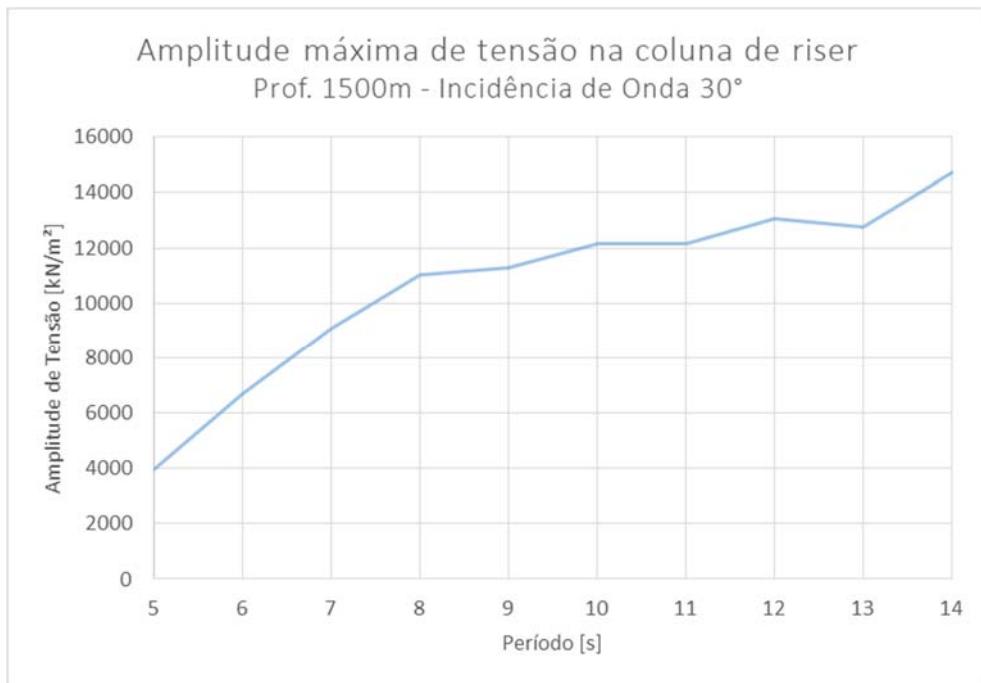


Figura 7.50 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1500m e incidência de onda de 30°

A Tabela 7.26 apresenta os valores mínimos dos esforços axiais ao longo da coluna de *riser*, a fim de verificar se o critério de não haver compressão é respeitado durante a instalação.

Tabela 7.26 - Esforços axiais mínimos na coluna de *riser* referentes ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1500m

Período (s)	Incidência de Onda (°)	Tração mínima no <i>riser</i> (kN)	Critério Normativo
5	0	5192.54	OK
6	0	5188.86	OK
7	0	5127.47	OK
8	0	5065.22	OK
9	0	5023.70	OK
10	0	5063.40	OK
11	0	5058.60	OK
12	0	5060.38	OK
13	0	5078.47	OK
14	0	5047.14	OK
5	30	5193.38	OK
6	30	5148.34	OK
7	30	5129.40	OK
8	30	5066.96	OK
9	30	5074.73	OK
10	30	5023.31	OK
11	30	5060.78	OK
12	30	5018.68	OK
13	30	5007.52	OK
14	30	5011.93	OK

7.3.1.3 Profundidade: 2000m

A Tabela 7.27 apresenta, para a profundidade de 2000 metros, a amplitude de tensão no topo do *riser* e as tensões média e máxima na seção de duto, além do limite definido pela norma. As Figuras 7.51 e 7.52 mostram os mesmos resultados graficamente para incidências de 0° e 30° respectivamente.

Tabela 7.27 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2000m

Tp (s)	Incidência de Onda (°)	Amplitude de tensão (kN/m ²)	Tensão média (kN/m ²)	Tensão máxima (kN/m ²)	Limite normativo (kN/m ²)	Critério Normativo
5	0	5898	215235	221133	300160	OK
6	0	5862	215235	221097	300160	OK
7	0	10367	215235	225602	300160	OK
8	0	12581	215235	227816	300160	OK
9	0	15987	215235	231222	300160	OK
10	0	14554	215235	229789	300160	OK
11	0	13894	215235	229129	300160	OK
12	0	14475	215235	229710	300160	OK
13	0	14324	215235	229559	300160	OK
14	0	13794	215235	229029	300160	OK
5	30	6792	215235	222027	300160	OK
6	30	7752	215235	222987	300160	OK
7	30	10182	215235	225417	300160	OK
8	30	14651	215235	229886	300160	OK
9	30	14251	215235	229486	300160	OK
10	30	15987	215235	231222	300160	OK
11	30	15751	215235	230986	300160	OK
12	30	16235	215235	231470	300160	OK
13	30	16020	215235	231255	300160	OK
14	30	19238	215235	234473	300160	OK

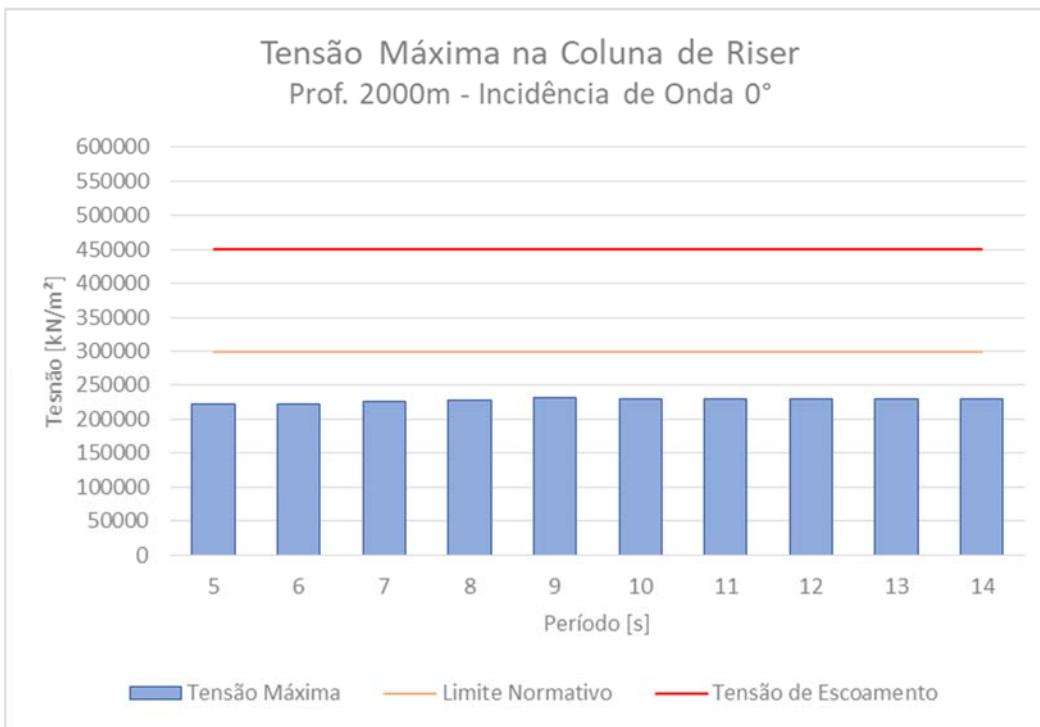


Figura 7.51 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2000m e incidência de onda de 0°

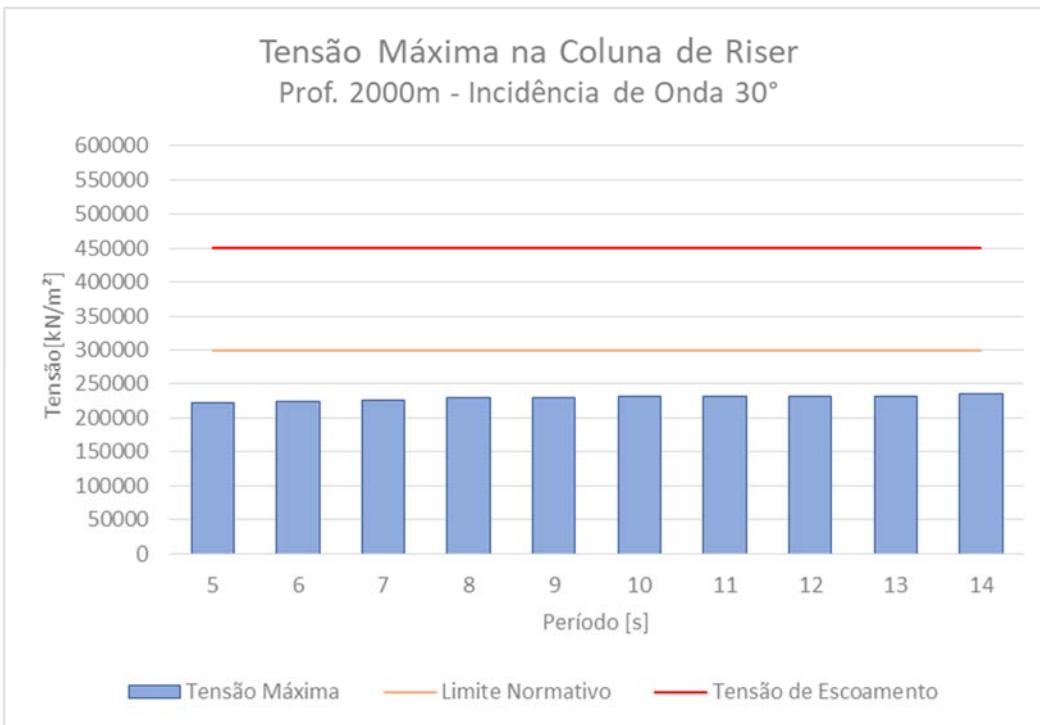


Figura 7.52 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2000m e incidência de onda de 30°

Os gráficos das Figuras 7.53 e 7.54 apresentam a amplitude de tensão no topo dos modelos para cada período de onda estudado, com incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

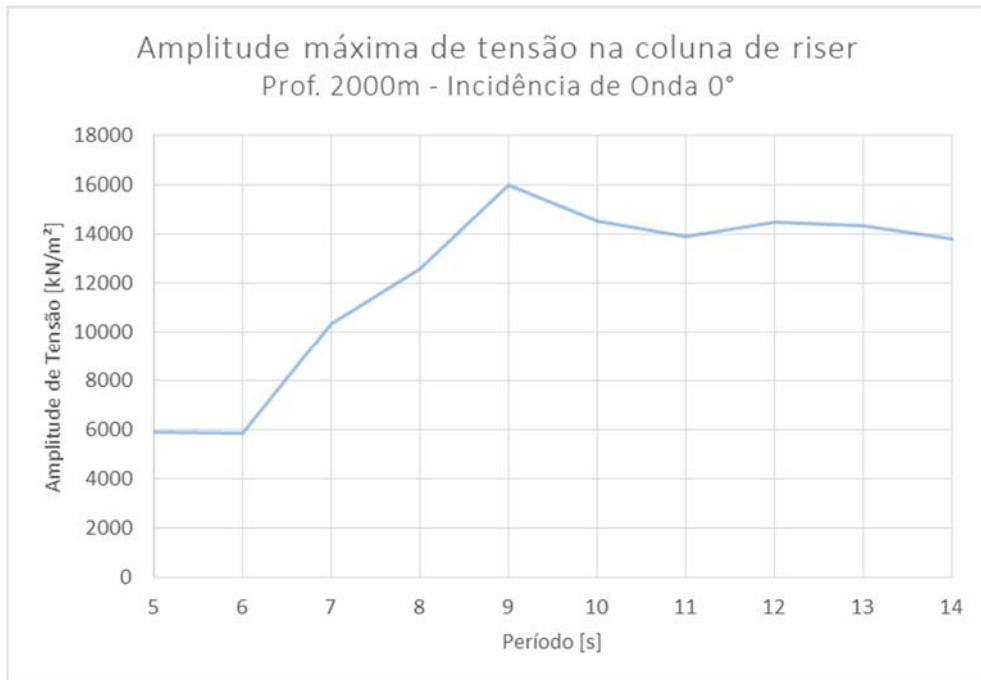


Figura 7.53 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2000m e incidência de onda de 0°

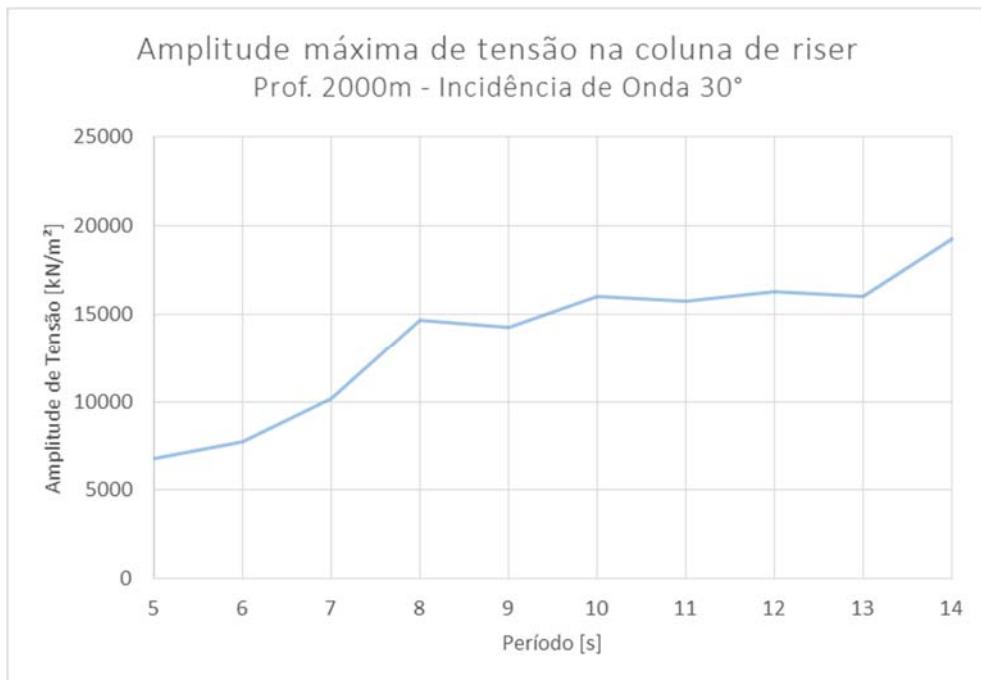


Figura 7.54 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2000m e incidência de onda de 30°

A Tabela 7.28 apresenta os valores mínimos dos esforços axiais ao longo da coluna de *riser*, a fim de verificar se o critério de não haver compressão é respeitado durante a instalação.

Tabela 7.28 - Esforços axiais mínimos na coluna de *riser* referentes ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2000m

Período (s)	Incidência de Onda (°)	Tração mínima no <i>riser</i> (kN)	Critério Normativo
5	0	5156.31	OK
6	0	5162.45	OK
7	0	5097.62	OK
8	0	5031.05	OK
9	0	5006.14	OK
10	0	5042.74	OK
11	0	5046.09	OK
12	0	5062.46	OK
13	0	5062.03	OK
14	0	5028.45	OK
5	30	5153.31	OK
6	30	5138.54	OK
7	30	5088.66	OK
8	30	5022.46	OK
9	30	5020.75	OK
10	30	4998.92	OK
11	30	5013.08	OK
12	30	5008.29	OK
13	30	4981.46	OK
14	30	4954.95	OK

7.3.1.4 Profundidade: 2500m

A Tabela 7.29 apresenta, para a profundidade de 2500 metros, a amplitude de tensão no topo do *riser* e as tensões média e máxima na seção de duto, além do limite definido pela norma. As Figuras 7.55 e 7.56 mostram os mesmos resultados graficamente para incidências de 0° e 30° respectivamente.

Tabela 7.29 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2500m

Tp (s)	Incidência de Onda (°)	Amplitude de tensão (kN/m ²)	Tensão média (kN/m ²)	Tensão máxima (kN/m ²)	Limite normativo (kN/m ²)	Critério Normativo
5	0	14242	221413	235655	300160	OK
6	0	12560	221413	233973	300160	OK
7	0	13303	221413	234716	300160	OK
8	0	18750	221413	240163	300160	OK
9	0	21128	221413	242541	300160	OK
10	0	18547	221413	239960	300160	OK
11	0	16535	221413	237948	300160	OK
12	0	17571	221413	238984	300160	OK
13	0	18071	221413	239484	300160	OK
14	0	16075	221413	237488	300160	OK
5	30	14681	221413	236094	300160	OK
6	30	15950	221413	237363	300160	OK
7	30	16517	221413	237930	300160	OK
8	30	18401	221413	239814	300160	OK
9	30	20441	221413	241854	300160	OK
10	30	22010	221413	243423	300160	OK
11	30	19592	221413	241005	300160	OK
12	30	18435	221413	239848	300160	OK
13	30	18438	221413	239851	300160	OK
14	30	21389	221413	242802	300160	OK

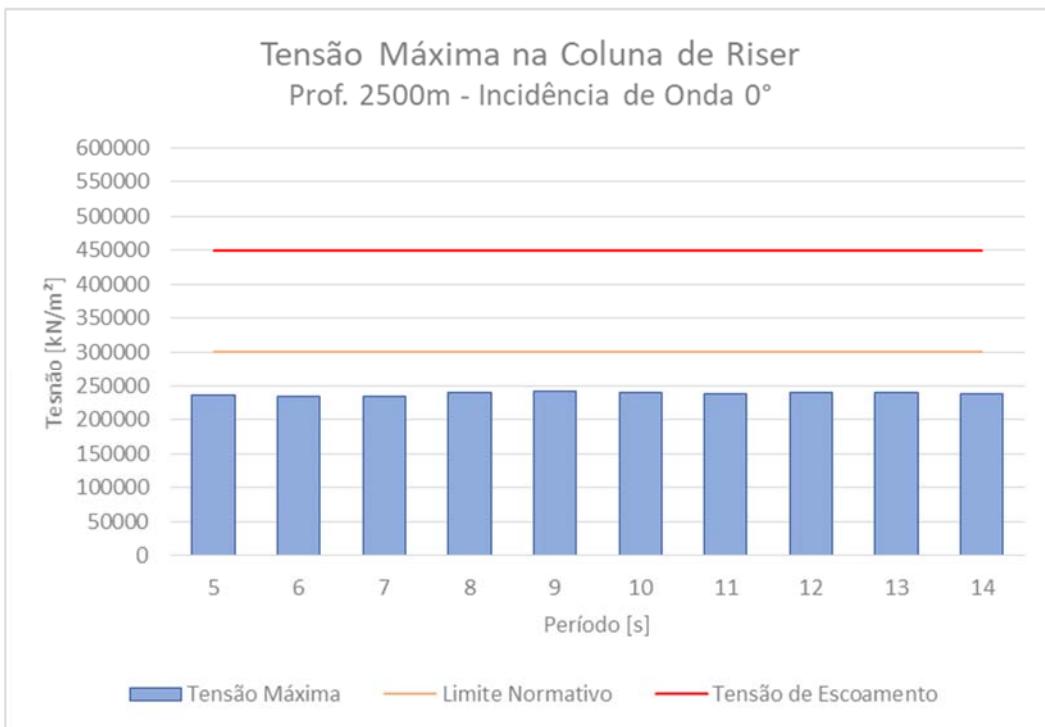


Figura 7.55 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2500m e incidência de onda de 0°

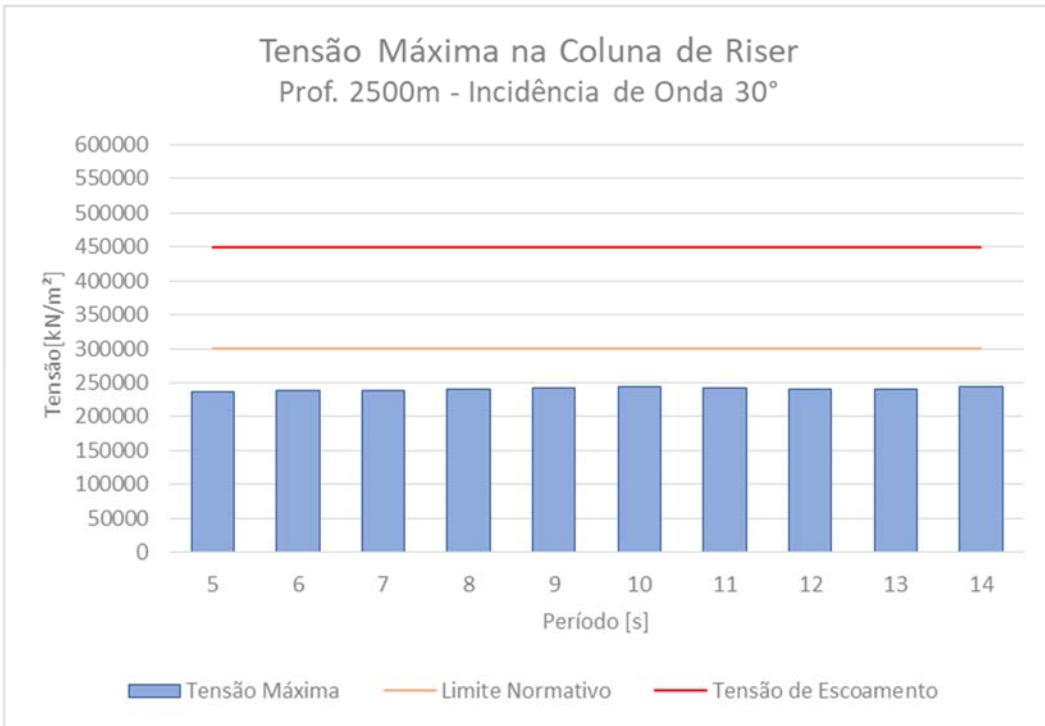


Figura 7.56 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2500m e incidência de onda de 30°

Os gráficos das Figuras 7.57 e 7.58 apresentam a amplitude de tensão no topo dos modelos para cada período de onda estudado, com incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

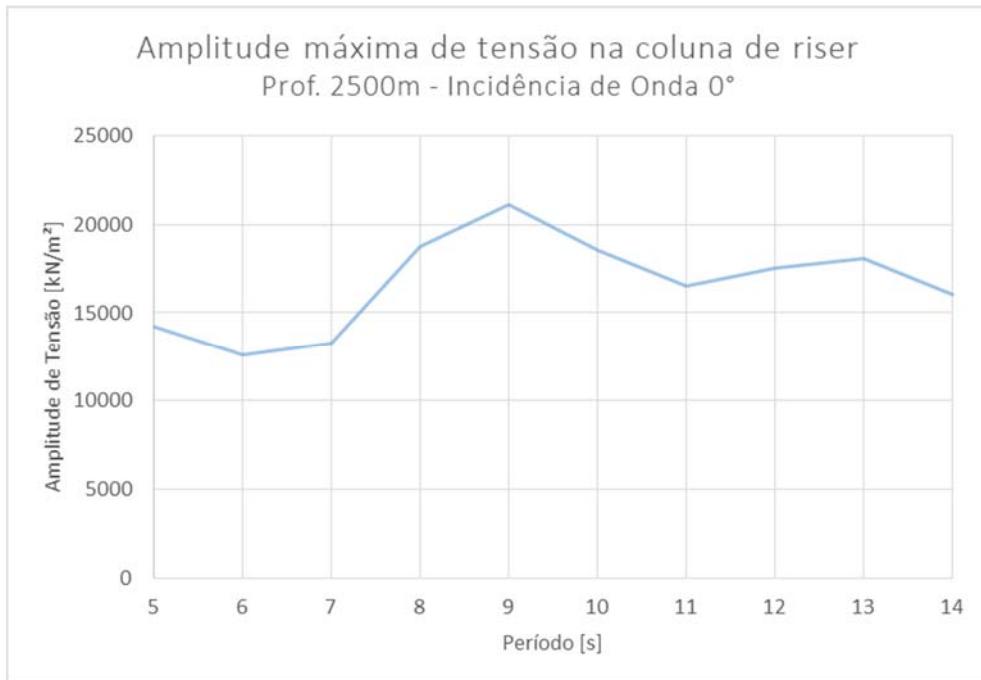


Figura 7.57 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2500m e incidência de onda de 0°

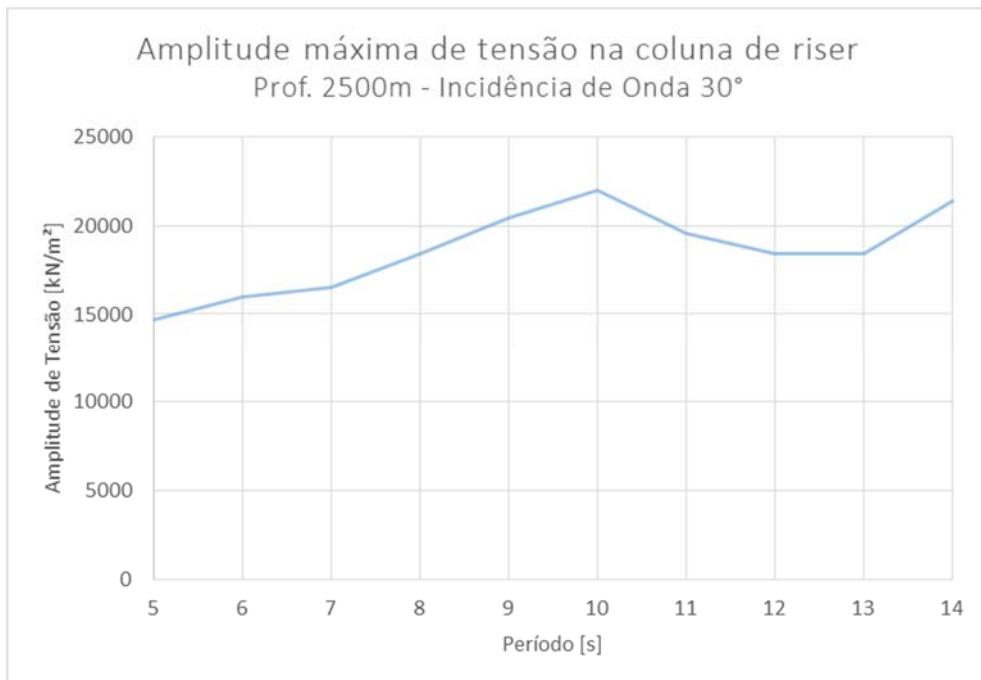


Figura 7.58 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2500m e incidência de onda de 30°

A Tabela 7.30 apresenta os valores mínimos dos esforços axiais ao longo da coluna de *riser*, a fim de verificar se o critério de não haver compressão é respeitado durante a instalação.

Tabela 7.30 - Esforços axiais mínimos na coluna de *riser* referentes ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2500m

Período (s)	Incidência de Onda (°)	Tração mínima no <i>riser</i> (kN)	Critério Normativo
5	0	4995.67	OK
6	0	5049.34	OK
7	0	5026.76	OK
8	0	5036.87	OK
9	0	4991.19	OK
10	0	5007.15	OK
11	0	5001.81	OK
12	0	5019.95	OK
13	0	5030.55	OK
14	0	5011.81	OK
5	30	4989.03	OK
6	30	4984.49	OK
7	30	4998.89	OK
8	30	4980.48	OK
9	30	4998.41	OK
10	30	5010.60	OK
11	30	5037.06	OK
12	30	5029.69	OK
13	30	4987.64	OK
14	30	4987.60	OK

7.3.1.5 Profundidade: 3000m

A Tabela 7.31 apresenta, para a profundidade de 3000 metros, a amplitude de tensão no topo do *riser* e as tensões média e máxima na seção de duto, além do limite definido pela norma. As Figuras 7.59 e 7.60 mostram os mesmos resultados graficamente para incidências de 0° e 30° respectivamente.

Tabela 7.31 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3000m

Tp (s)	Incidência de Onda (°)	Amplitude de tensão (kN/m ²)	Tensão média (kN/m ²)	Tensão máxima (kN/m ²)	Limite normativo (kN/m ²)	Critério Normativo
5	0	16176	227595	243771	300160	OK
6	0	13219	227595	240814	300160	OK
7	0	20297	227595	247892	300160	OK
8	0	22584	227595	250179	300160	OK
9	0	24872	227595	252467	300160	OK
10	0	21579	227595	249174	300160	OK
11	0	18976	227595	246571	300160	OK
12	0	19473	227595	247068	300160	OK
13	0	20264	227595	247859	300160	OK
14	0	18385	227595	245980	300160	OK
5	30	22878	227595	250473	300160	OK
6	30	22948	227595	250543	300160	OK
7	30	20773	227595	248368	300160	OK
8	30	21848	227595	249443	300160	OK
9	30	20806	227595	248401	300160	OK
10	30	25435	227595	253030	300160	OK
11	30	23987	227595	251582	300160	OK
12	30	22215	227595	249810	300160	OK
13	30	23402	227595	250997	300160	OK
14	30	24981	227595	252576	300160	OK

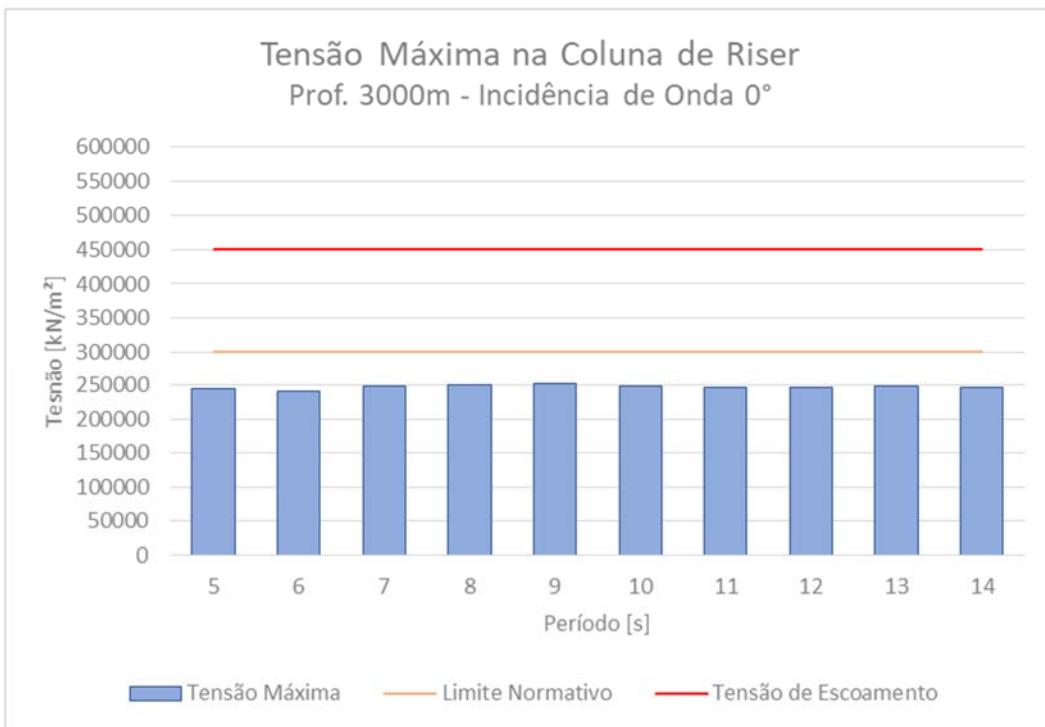


Figura 7.59 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3000m e incidência de onda de 0°

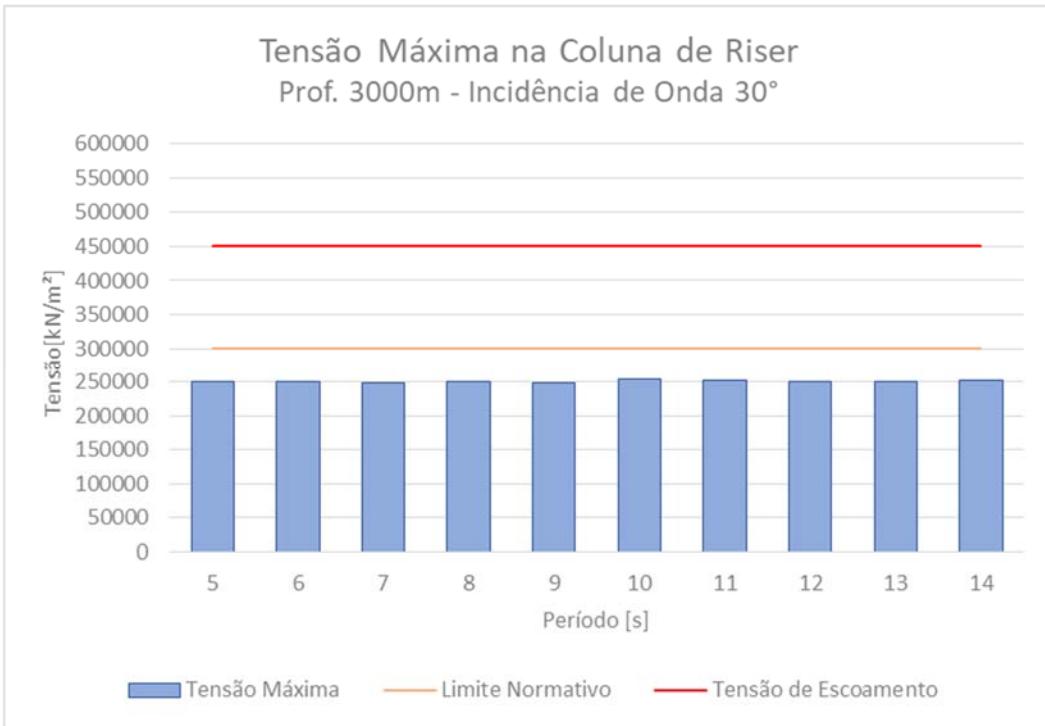


Figura 7.60 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3000m e incidência de onda de 30°

Os gráficos das Figuras 7.61 e 7.62 apresentam a amplitude de tensão no topo dos modelos para cada período de onda estudado, com incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

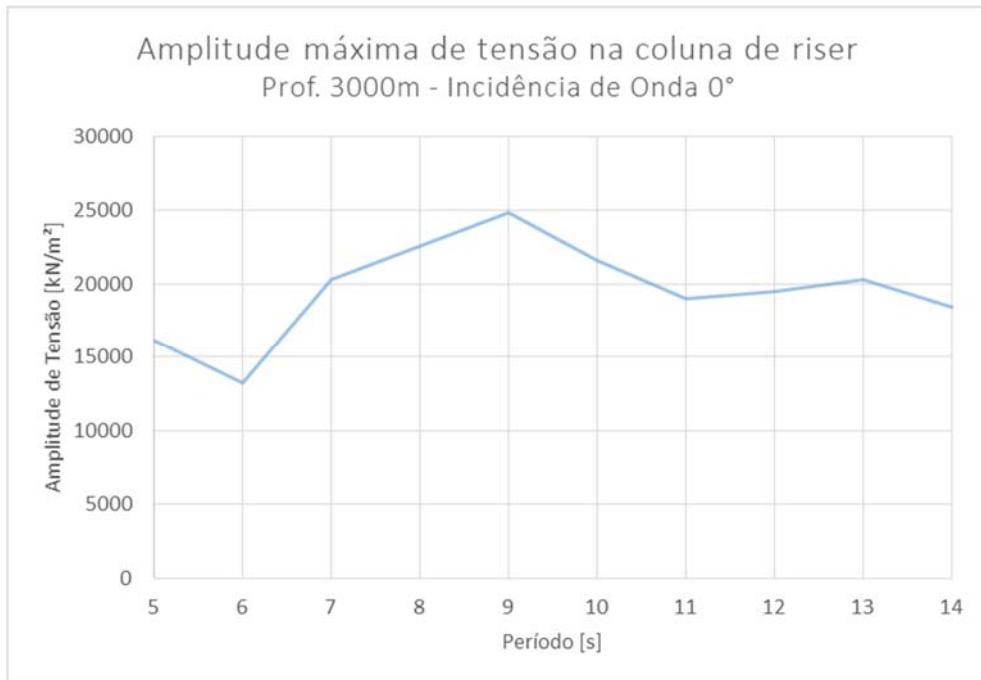


Figura 7.61 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3000m e incidência de onda de 0°

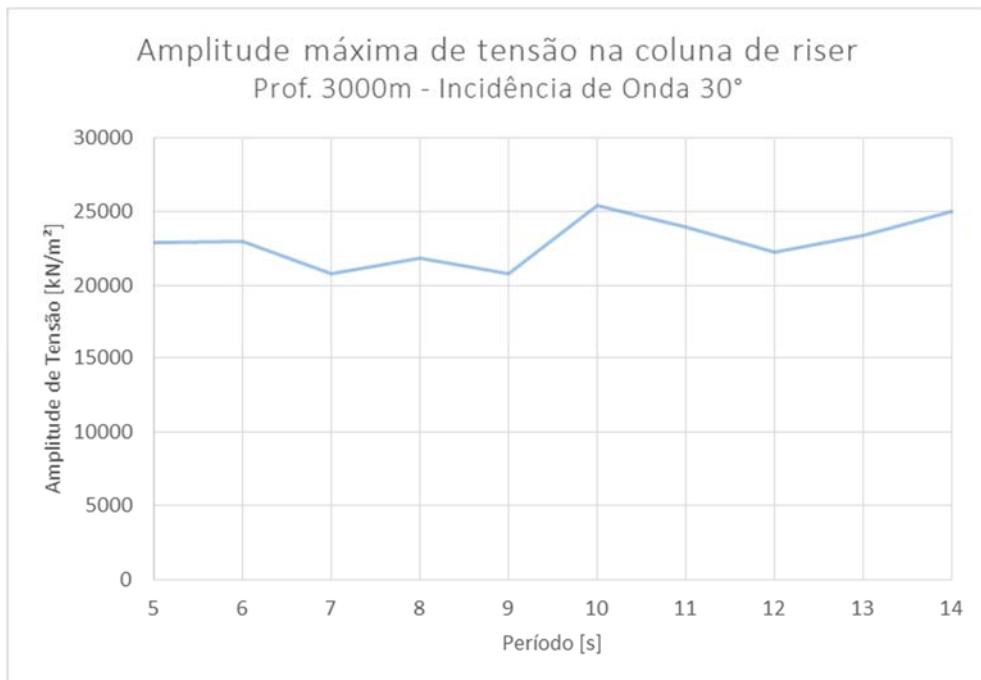


Figura 7.62 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3000m e incidência de onda de 30°

A Tabela 7.32 apresenta os valores mínimos dos esforços axiais ao longo da coluna de *riser*, a fim de verificar se o critério de não haver compressão é respeitado durante a instalação.

Tabela 7.32 - Esforços axiais mínimos na coluna de *riser* referentes ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3000m

Período (s)	Incidência de Onda (°)	Tração mínima no <i>riser</i> (kN)	Critério Normativo
5	0	4977.09	OK
6	0	5032.71	OK
7	0	5006.03	OK
8	0	4951.83	OK
9	0	4905.41	OK
10	0	4971.76	OK
11	0	4952.81	OK
12	0	4967.23	OK
13	0	5019.04	OK
14	0	5019.72	OK
5	30	4865.78	OK
6	30	4902.67	OK
7	30	4936.65	OK
8	30	4848.80	OK
9	30	4926.53	OK
10	30	4821.28	OK
11	30	4889.09	OK
12	30	4955.71	OK
13	30	4951.76	OK
14	30	4947.88	OK

7.3.1.6 Profundidade: 3500m

A Tabela 7.33 apresenta, para a profundidade de 3500 metros, a amplitude de tensão no topo do *riser* e as tensões média e máxima na seção de duto, além do limite definido pela norma. As Figuras 7.63 e 7.64 mostram os mesmos resultados graficamente para incidências de 0° e 30° respectivamente.

Tabela 7.33 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3500m

Tp (s)	Incidência de Onda (°)	Amplitude de tensão (kN/m ²)	Tensão média (kN/m ²)	Tensão máxima (kN/m ²)	Limite normativo (kN/m ²)	Critério Normativo
5	0	12379	233773	246151	300160	OK
6	0	22674	233773	256446	300160	OK
7	0	24628	233773	258400	300160	OK
8	0	26452	233773	260224	300160	OK
9	0	29297	233773	263069	300160	OK
10	0	25958	233773	259730	300160	OK
11	0	24931	233773	258703	300160	OK
12	0	24225	233773	257997	300160	OK
13	0	26537	233773	260309	300160	OK
14	0	21450	233773	255222	300160	OK
5	30	26555	233773	260327	300160	OK
6	30	39150	233773	272922	300160	OK
7	30	33190	233773	266962	300160	OK
8	30	31587	233773	265359	300160	OK
9	30	30266	233773	264038	300160	OK
10	30	28567	233773	262339	300160	OK
11	30	27391	233773	261163	300160	OK
12	30	26461	233773	260233	300160	OK
13	30	27773	233773	261545	300160	OK
14	30	27909	233773	261681	300160	OK

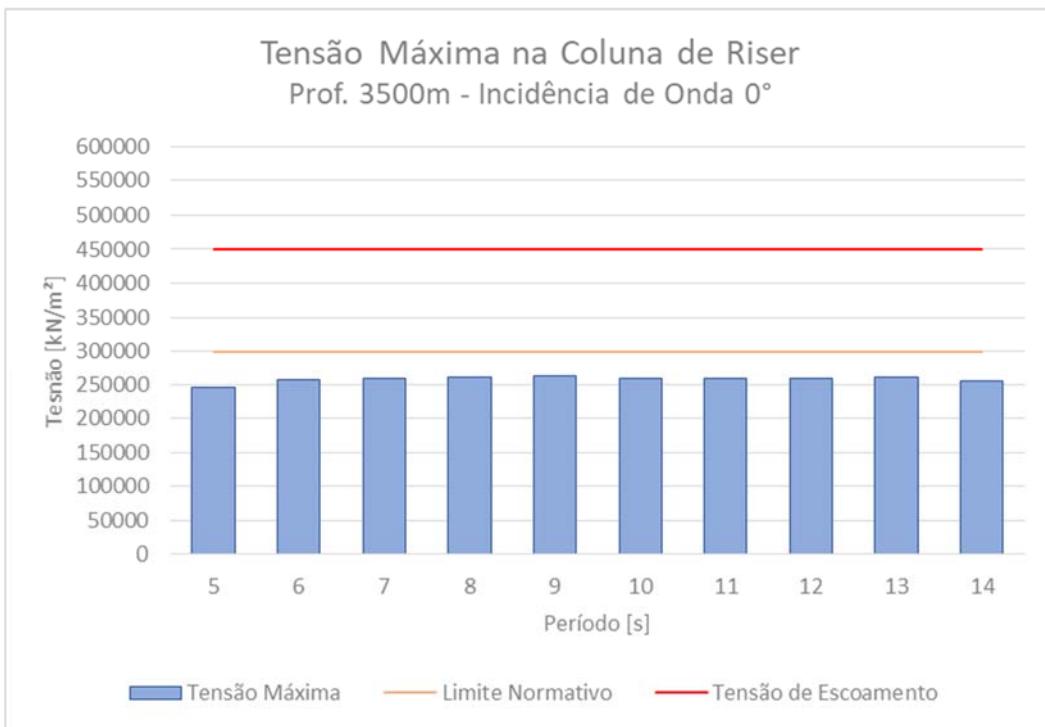


Figura 7.63 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3500m e incidência de onda de 0°

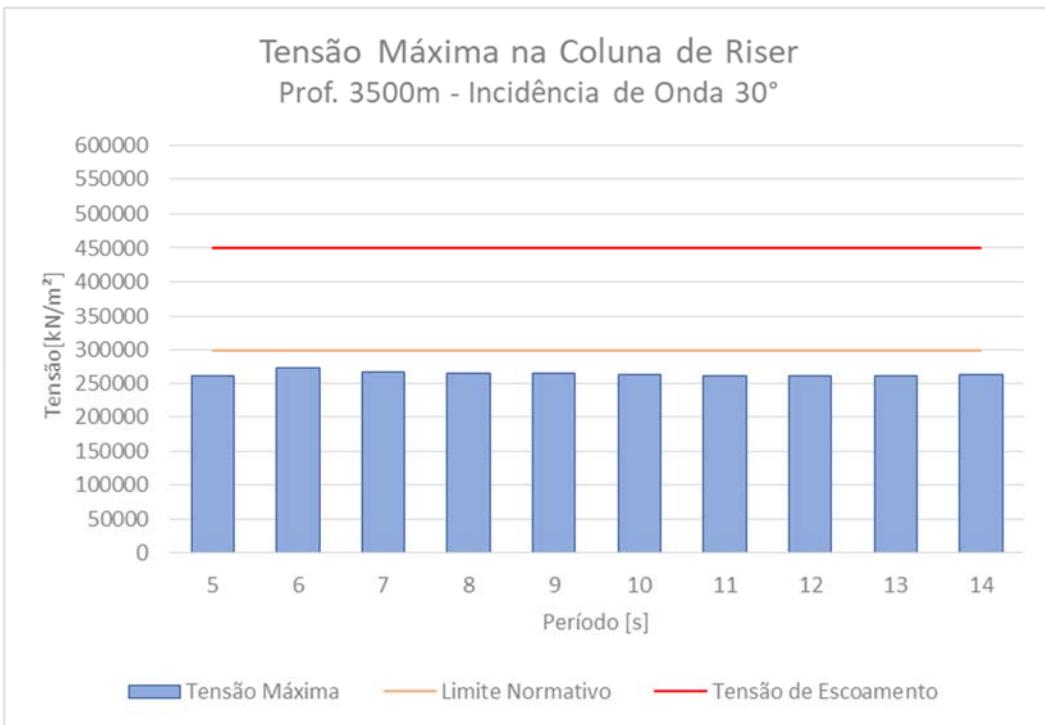


Figura 7.64 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3500m e incidência de onda de 30°

Os gráficos das Figuras 7.65 e 7.66 apresentam a amplitude de tensão no topo dos modelos para cada período de onda estudado, com incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

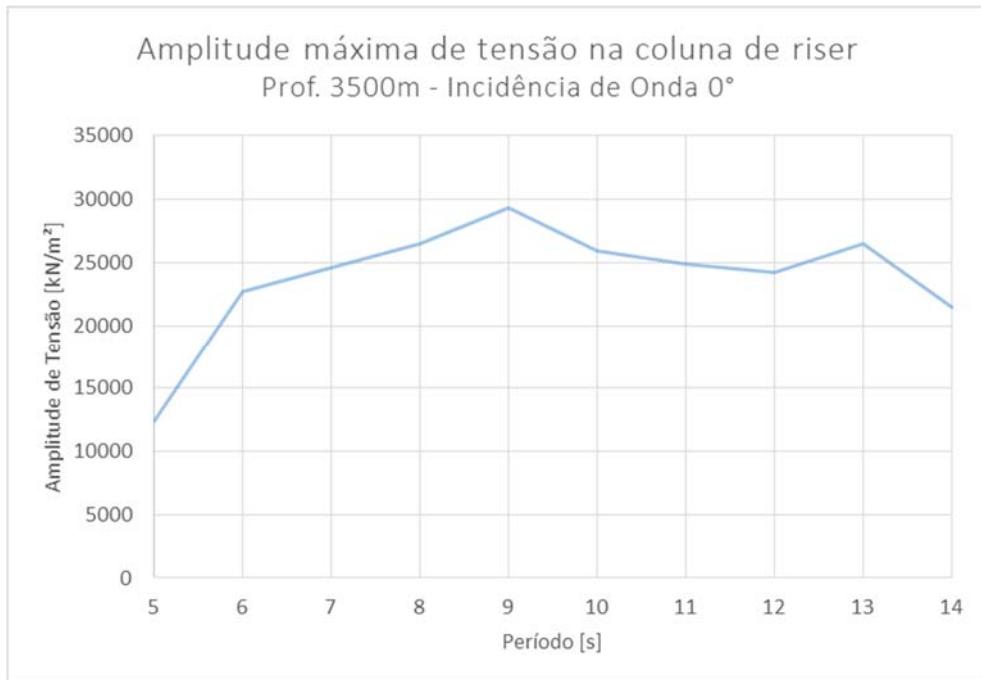


Figura 7.65 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3500m e incidência de onda de 0°

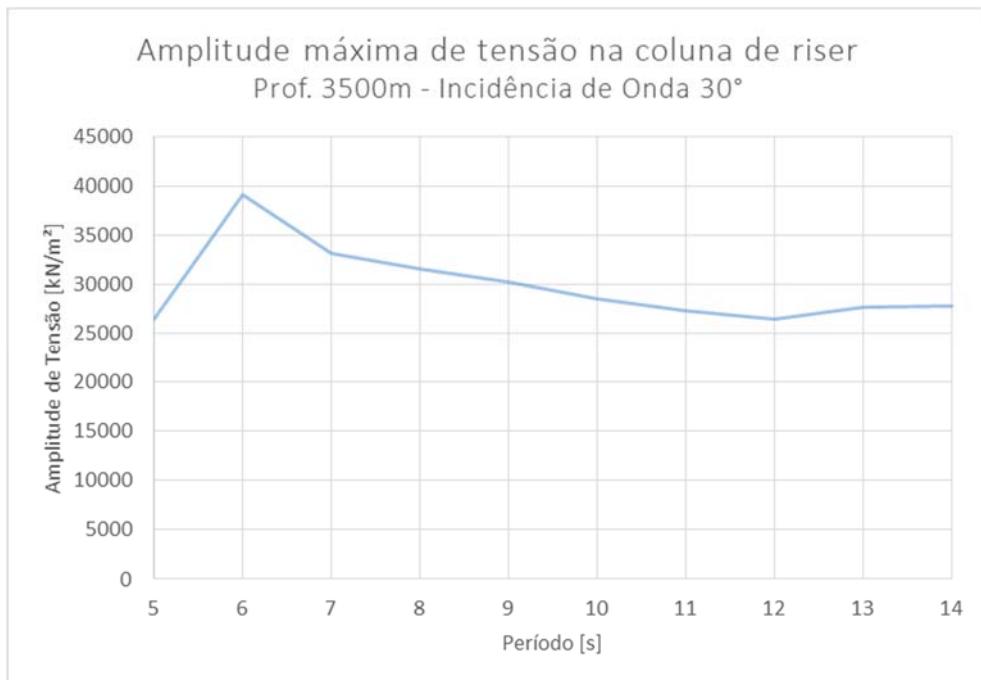


Figura 7.66 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3500m e incidência de onda de 30°

A Tabela 7.34 apresenta os valores mínimos dos esforços axiais ao longo da coluna de *riser*, a fim de verificar se o critério de não haver compressão é respeitado durante a instalação.

Tabela 7.34 - Esforços axiais mínimos na coluna de *riser* referentes ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3500m

Período (s)	Incidência de Onda (°)	Tração mínima no <i>riser</i> (kN)	Critério Normativo
5	0	5059.04	OK
6	0	4900.18	OK
7	0	4917.18	OK
8	0	4868.17	OK
9	0	4850.46	OK
10	0	4909.12	OK
11	0	4928.47	OK
12	0	4912.55	OK
13	0	4989.50	OK
14	0	4958.04	OK
5	30	4834.84	OK
6	30	4614.29	OK
7	30	4817.22	OK
8	30	4748.03	OK
9	30	4871.79	OK
10	30	4750.12	OK
11	30	4823.85	OK
12	30	4801.74	OK
13	30	4792.39	OK
14	30	4851.87	OK

7.3.1.7 Profundidade: 4000m

A Tabela 7.35 apresenta, para a profundidade de 4000 metros, a amplitude de tensão no topo do *riser* e as tensões média e máxima na seção de duto, além do limite definido pela norma. As Figuras 7.67 e 7.68 mostram os mesmos resultados graficamente para incidências de 0° e 30° respectivamente.

Tabela 7.35 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 4000m

Tp (s)	Incidência de Onda (°)	Amplitude de tensão (kN/m ²)	Tensão média (kN/m ²)	Tensão máxima (kN/m ²)	Limite normativo (kN/m ²)	Critério Normativo
5	0	10311	239950	250261	300160	OK
6	0	29205	239950	269155	300160	OK
7	0	31189	239950	271139	300160	OK
8	0	37694	239950	277644	300160	OK
9	0	39003	239950	278953	300160	OK
10	0	32540	239950	272490	300160	OK
11	0	33225	239950	273175	300160	OK
12	0	31471	239950	271421	300160	OK
13	0	30507	239950	270457	300160	OK
14	0	27905	239950	267855	300160	OK
5	30	12511	239950	252461	300160	OK
6	30	39066	239950	279016	300160	OK
7	30	36770	239950	276720	300160	OK
8	30	38876	239950	278826	300160	OK
9	30	38255	239950	278205	300160	OK
10	30	43441	239950	283391	300160	OK
11	30	30195	239950	270145	300160	OK
12	30	30362	239950	270312	300160	OK
13	30	32162	239950	272112	300160	OK
14	30	29508	239950	269458	300160	OK

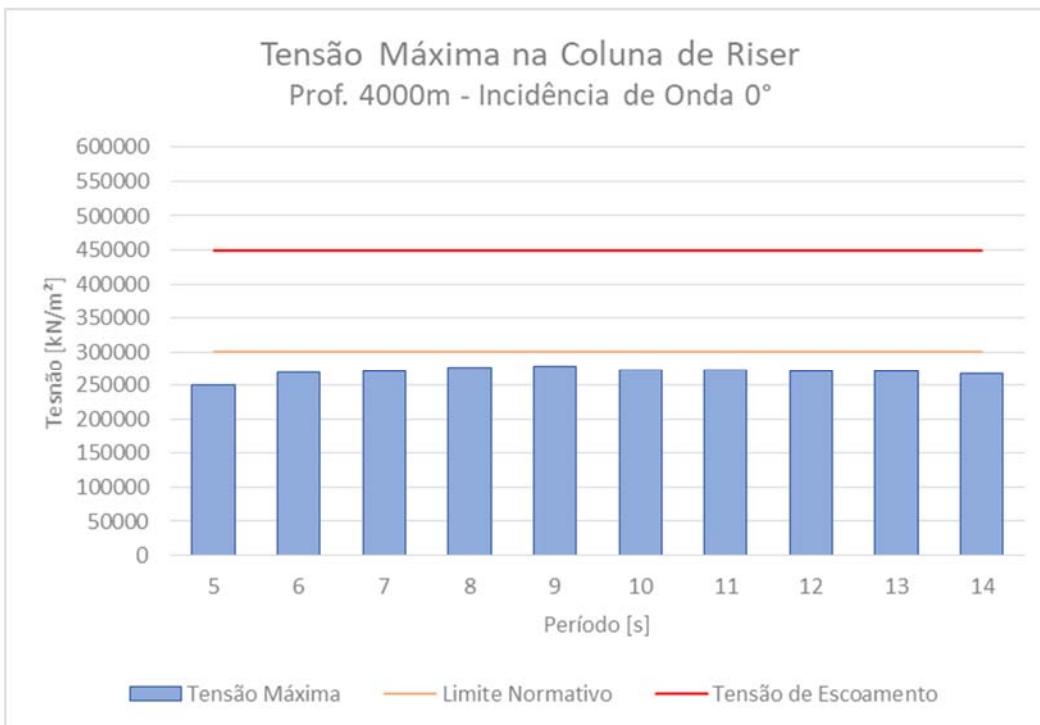


Figura 7.67 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 4000m e incidência de onda de 0°

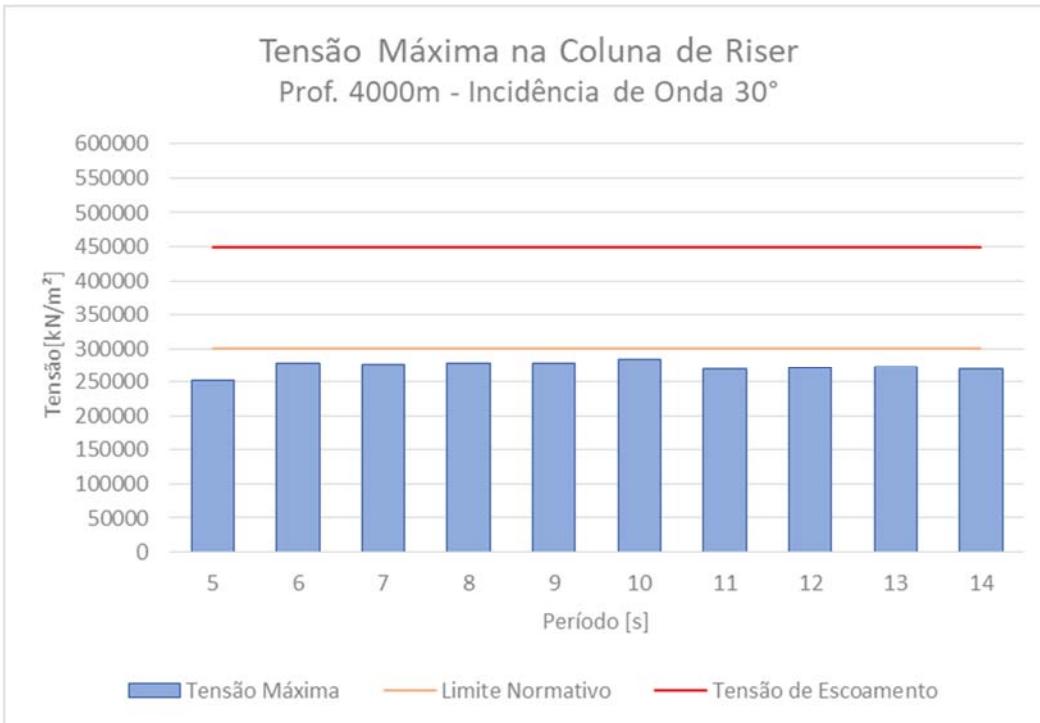


Figura 7.68 – Tensão máxima na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 4000m e incidência de onda de 30°

Os gráficos das Figuras 7.69 e 7.70 apresentam a amplitude de tensão no topo dos modelos para cada período de onda estudado, com incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

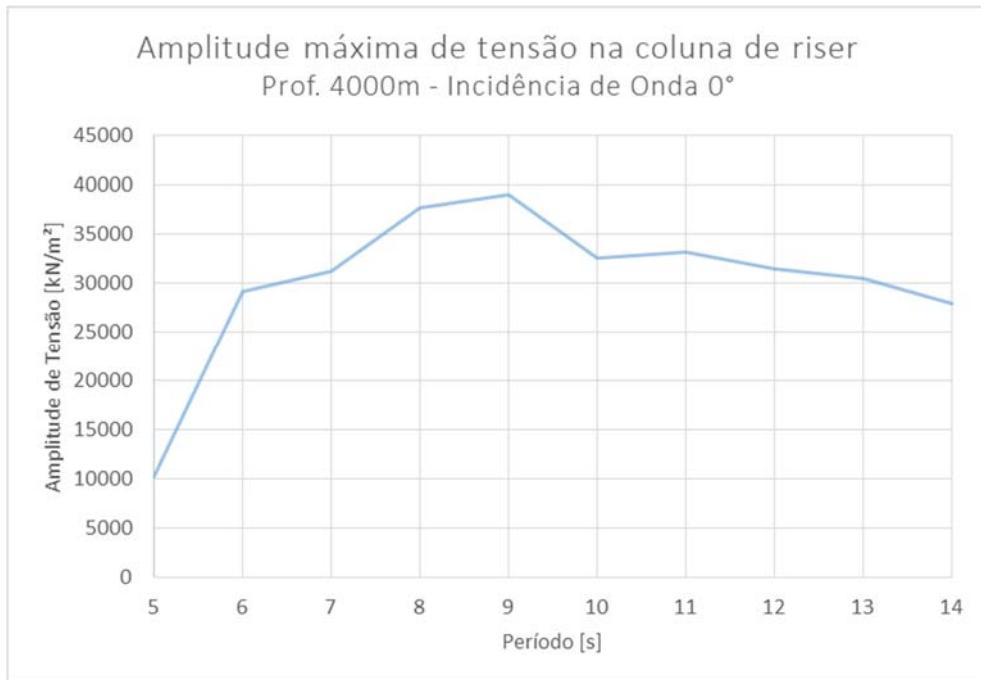


Figura 7.69 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 4000m e incidência de onda de 0°

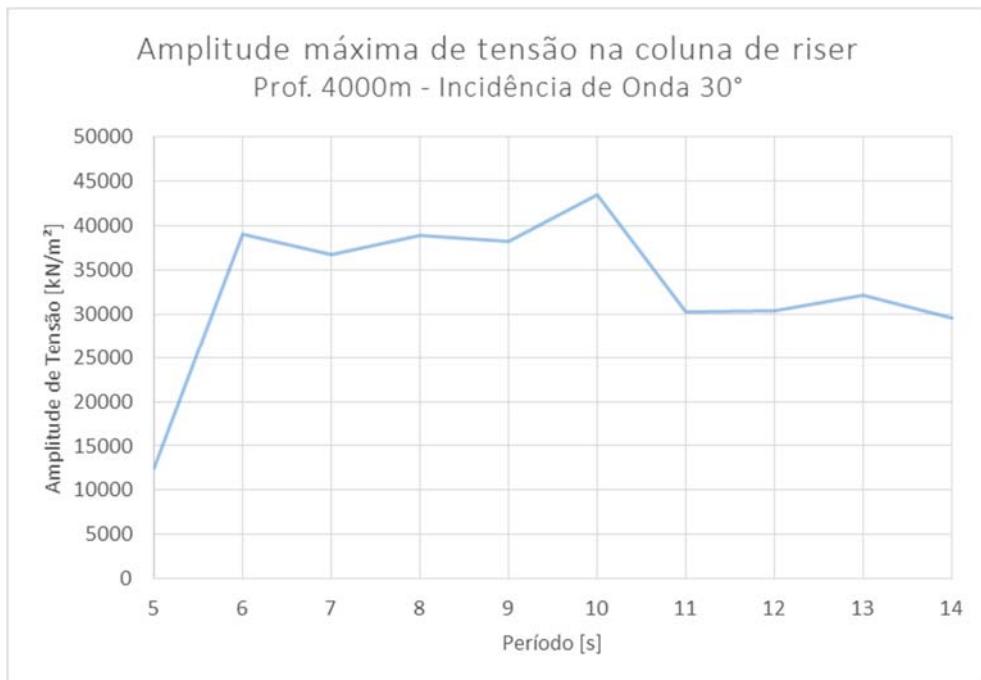


Figura 7.70 – Amplitude de tensão na coluna de *riser* referente ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 4000m e incidência de onda de 30°

A Tabela 7.36 apresenta os valores mínimos dos esforços axiais ao longo da coluna de *riser*, a fim de verificar se o critério de não haver compressão é respeitado durante a instalação.

Tabela 7.36 - Esforços axiais mínimos na coluna de *riser* referentes ao conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 4000m

Período (s)	Incidência de Onda (°)	Tração mínima no <i>riser</i> (kN)	Critério Normativo
5	0	5115.39	OK
6	0	4839.37	OK
7	0	4829.32	OK
8	0	4724.22	OK
9	0	4751.22	OK
10	0	4830.81	OK
11	0	4830.79	OK
12	0	4857.86	OK
13	0	4933.80	OK
14	0	4880.41	OK
5	30	5083.67	OK
6	30	4690.96	OK
7	30	4765.63	OK
8	30	4711.77	OK
9	30	4783.62	OK
10	30	4757.19	OK
11	30	4797.30	OK
12	30	4829.07	OK
13	30	4843.05	OK
14	30	4791.76	OK

7.3.2 Resultados de Deslocamento Vertical dos Equipamentos

As seções a seguir apresentam tabelas e gráficos com os valores de deslocamento em z do conjunto BOP/LMRP para cada período de pico estudado, os gráficos estão separados por profundidade e incidência de onda. O Apêndice A - apresenta os gráficos de série de movimento dos equipamentos na situação mais crítica (Tp 14s) e menos crítica (Tp 5s) e o Apêndice B - apresenta uma comparação das amplitudes máximas de deslocamento em z em cada profundidade.

7.3.2.1 Profundidade: 1000m

A Tabela 7.37 apresenta, para cada período analisado na profundidade de 1000 metros, os valores de *heave* mínimo e máximo do conjunto de equipamentos ao longo da análise dinâmica. A última coluna da tabela mostra a amplitude máxima de deslocamento em z do conjunto de equipamentos ao longo da série de movimentos.

Tabela 7.37 – Movimento em *heave* do conjunto de equipamentos 2, a uma profundidade de 1000 metros

Período (s)	<i>Heave</i> (m)		Aplitude máxima de deslocamento em z (m)
	Máximo	Mínimo	
5	-0.56	-0.64	0.08
6	-0.50	-0.71	0.21
7	-0.34	-0.85	0.51
8	-0.23	-0.97	0.74
9	-0.06	-1.14	1.08
10	-0.07	-1.17	1.09
11	-0.03	-1.18	1.16
12	0.05	-1.30	1.35
13	0.20	-1.48	1.68
14	0.34	-1.63	1.97
5	-0.55	-0.66	0.11
6	-0.47	-0.72	0.25
7	-0.39	-0.81	0.42
8	-0.21	-0.99	0.77
9	-0.12	-1.08	0.96
10	0.00	-1.18	1.17
11	0.07	-1.29	1.35
12	0.20	-1.38	1.58
13	0.36	-1.52	1.87
14	0.48	-1.84	2.32

As Figuras 7.71 e 7.72 fazem uma relação da amplitude máxima de movimento vertical com o período de onda de pico para cada situação estudada.

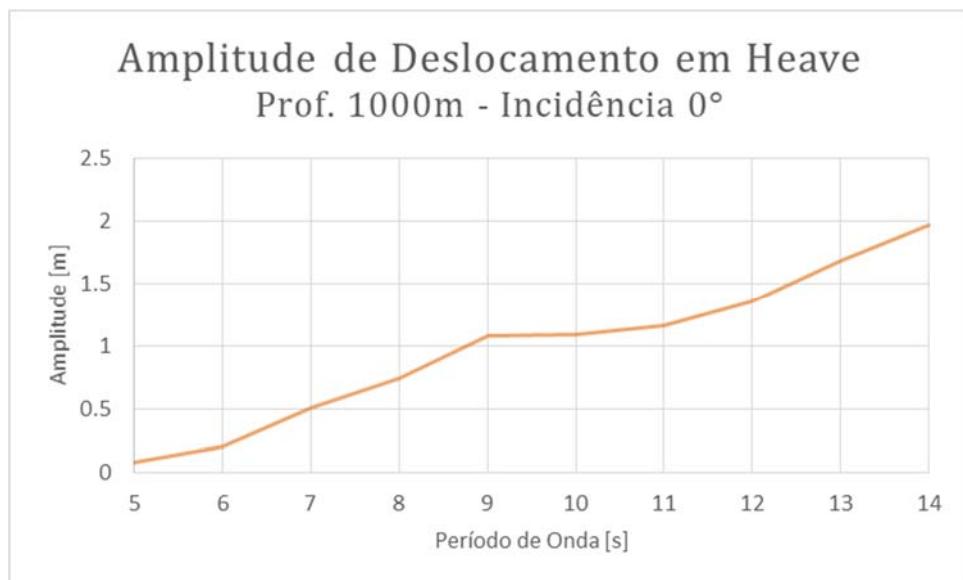


Figura 7.71 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 2 com profundidade de 1000m e incidência de 0°

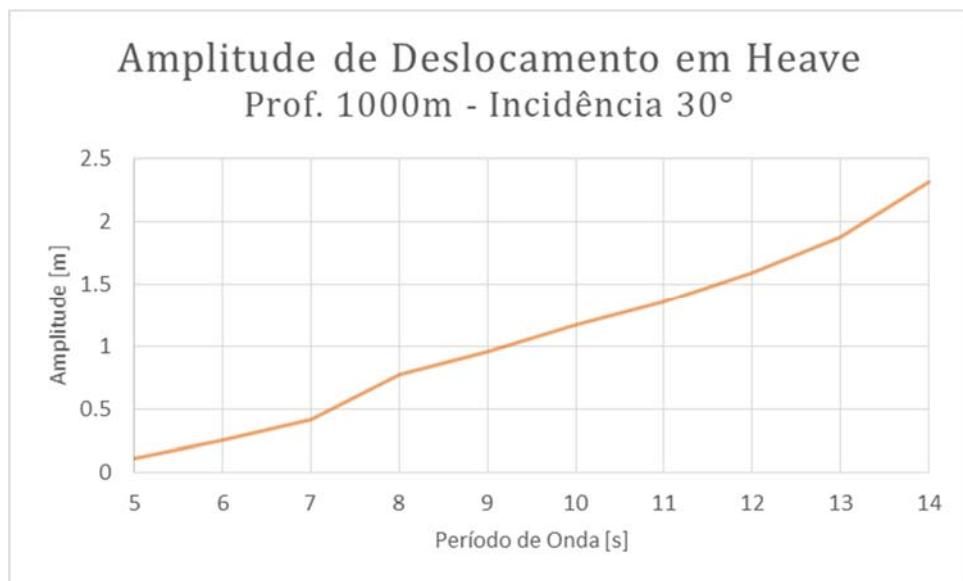


Figura 7.72 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 2 com profundidade de 1000m e incidência de 30°

7.3.2.2 Profundidade: 1500m

A Tabela 7.38 apresenta, para cada período analisado na profundidade de 1500 metros, os valores de *heave* mínimo e máximo do conjunto de equipamentos ao longo da análise dinâmica. A última coluna da tabela mostra a amplitude máxima de deslocamento em z do conjunto de equipamentos ao longo da série de movimentos.

Tabela 7.38 – Movimento em *heave* do conjunto de equipamentos 2, a uma profundidade de 1500 metros

Período (s)	<i>Heave</i> (m)		Aplitude máx de deslocamento em z (m)
	Máximo	Mínimo	
5	-0.77	-0.86	0.09
6	-0.70	-0.92	0.22
7	-0.54	-1.09	0.55
8	-0.41	-1.21	0.80
9	-0.24	-1.39	1.15
10	-0.26	-1.41	1.16
11	-0.21	-1.42	1.21
12	-0.14	-1.53	1.39
13	0.01	-1.73	1.73
14	0.15	-1.87	2.02
5	-0.75	-0.87	0.12
6	-0.66	-0.94	0.28
7	-0.59	-1.04	0.45
8	-0.41	-1.22	0.80
9	-0.32	-1.31	0.99
10	-0.18	-1.42	1.23
11	-0.12	-1.53	1.41
12	0.01	-1.62	1.63
13	0.18	-1.75	1.92
14	0.29	-2.08	2.37

As Figuras 7.73 e 7.74 fazem uma relação da amplitude máxima de movimento vertical com o período de onda de pico para cada situação estudada.

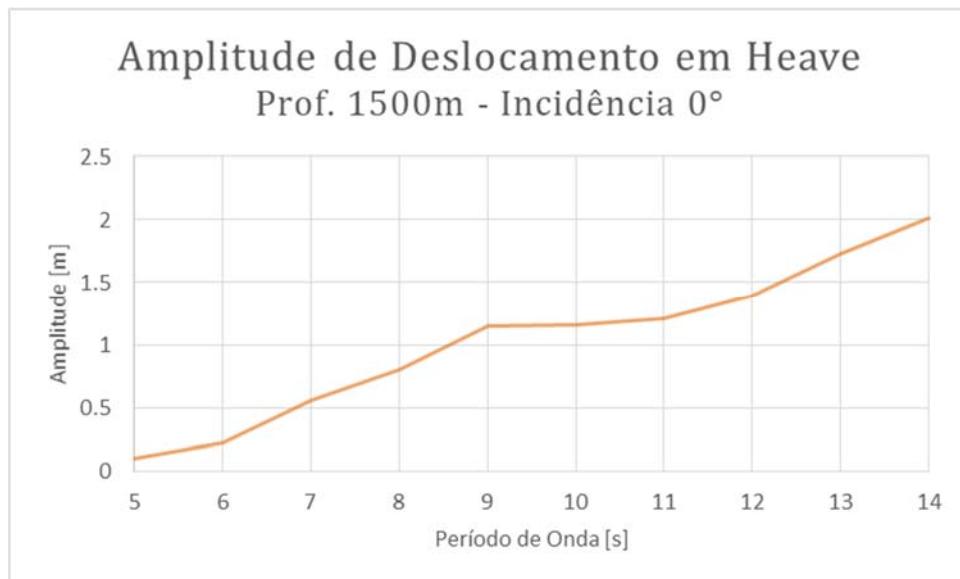


Figura 7.73 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 2 com profundidade de 1500m e incidência de 0°

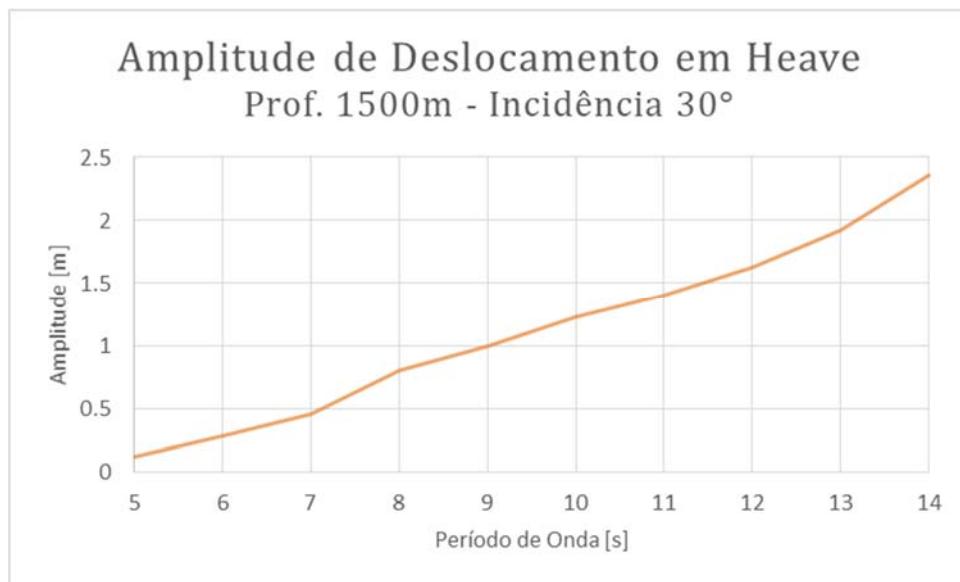


Figura 7.74 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 2 com profundidade de 1500m e incidência de 30°

7.3.2.3 Profundidade: 2000m

A Tabela 7.39 apresenta, para cada período analisado na profundidade de 2000 metros, os valores de *heave* mínimo e máximo do conjunto de equipamentos ao longo da análise dinâmica. A última coluna da tabela mostra a amplitude máxima de deslocamento em z do conjunto de equipamentos ao longo da série de movimentos.

Tabela 7.39 – Movimento em *heave* do conjunto de equipamentos 2, a uma profundidade de 2000 metros

Período (s)	<i>Heave</i> (m)		Aplitude máx de deslocamento em z (m)
	Máximo	Mínimo	
5	-0.84	-0.97	0.13
6	-0.78	-1.03	0.25
7	-0.60	-1.21	0.61
8	-0.46	-1.34	0.88
9	-0.30	-1.53	1.23
10	-0.31	-1.55	1.23
11	-0.27	-1.55	1.28
12	-0.21	-1.66	1.45
13	-0.06	-1.86	1.80
14	0.08	-1.99	2.07
5	-0.83	-0.99	0.17
6	-0.74	-1.06	0.32
7	-0.64	-1.16	0.51
8	-0.47	-1.36	0.89
9	-0.36	-1.45	1.09
10	-0.23	-1.55	1.32
11	-0.18	-1.67	1.49
12	-0.04	-1.76	1.72
13	0.11	-1.89	2.00
14	0.23	-2.21	2.45

As Figuras 7.75 e 7.76 fazem uma relação da amplitude máxima de movimento vertical com o período de onda de pico para cada situação estudada.

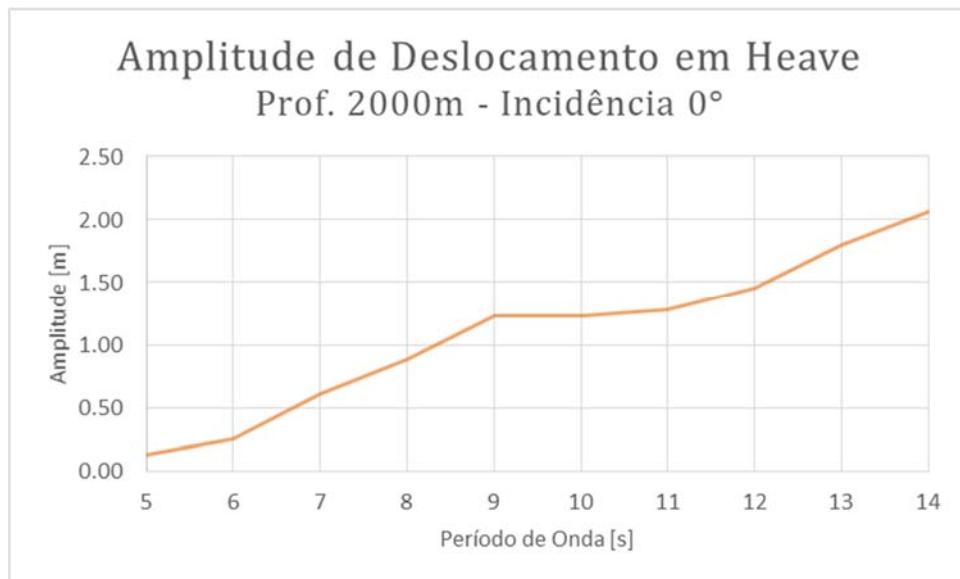


Figura 7.75 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 2 com profundidade de 2000m e incidência de 0°

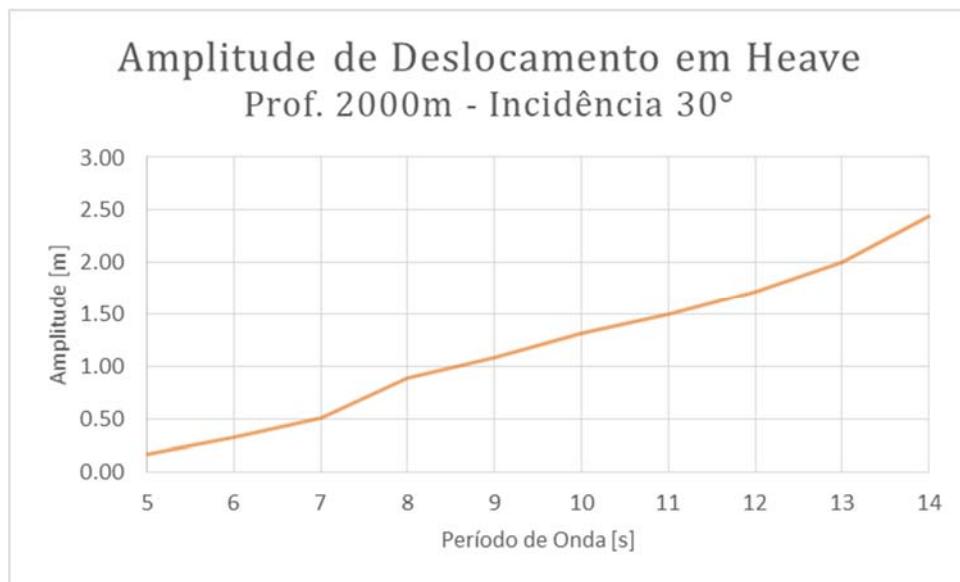


Figura 7.76 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 2 com profundidade de 2000m e incidência de 30°

7.3.2.4 Profundidade: 2500m

A Tabela 7.40 apresenta, para cada período analisado na profundidade de 2500 metros, os valores de *heave* mínimo e máximo do conjunto de equipamentos ao longo da análise dinâmica. A última coluna da tabela mostra a amplitude máxima de deslocamento em z do conjunto de equipamentos ao longo da série de movimentos.

Tabela 7.40 – Movimento em *heave* do conjunto de equipamentos 2, a uma profundidade de 2500 metros

Período (s)	<i>Heave</i> (m)		Aplitude máx de deslocamento em z (m)
	Máximo	Mínimo	
5	-0.71	-1.05	0.35
6	-0.72	-1.08	0.36
7	-0.52	-1.20	0.68
8	-0.43	-1.41	0.98
9	-0.23	-1.57	1.34
10	-0.25	-1.58	1.33
11	-0.22	-1.58	1.36
12	-0.15	-1.68	1.53
13	-0.01	-1.89	1.89
14	0.13	-2.00	2.13
5	-0.72	-1.06	0.34
6	-0.63	-1.13	0.50
7	-0.57	-1.20	0.62
8	-0.39	-1.41	1.02
9	-0.33	-1.51	1.19
10	-0.17	-1.58	1.40
11	-0.12	-1.69	1.57
12	0.02	-1.81	1.82
13	0.16	-1.88	2.04
14	0.27	-2.22	2.49

As Figuras 7.77 e 7.78 fazem uma relação da amplitude máxima de movimento vertical com o período de onda de pico para cada situação estudada.

Amplitude de Deslocamento em Heave
Prof. 2500m - Incidência 0°

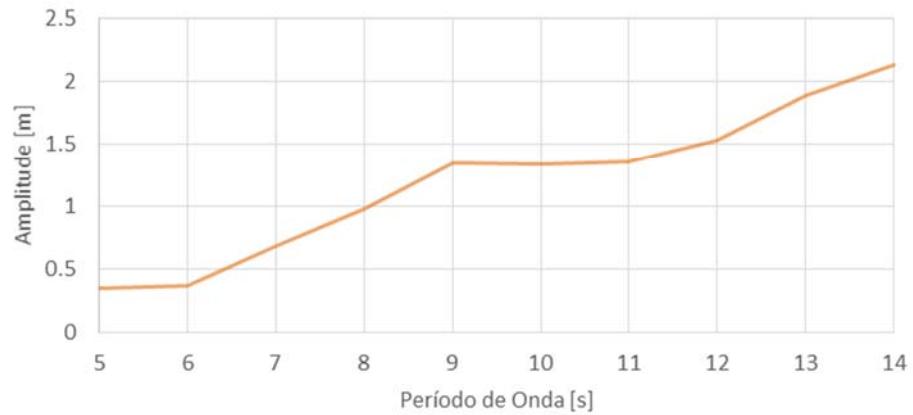


Figura 7.77 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 2 com profundidade de 2500m e incidência de 0°

Amplitude de Deslocamento em Heave
Prof. 2500m - Incidência 30°

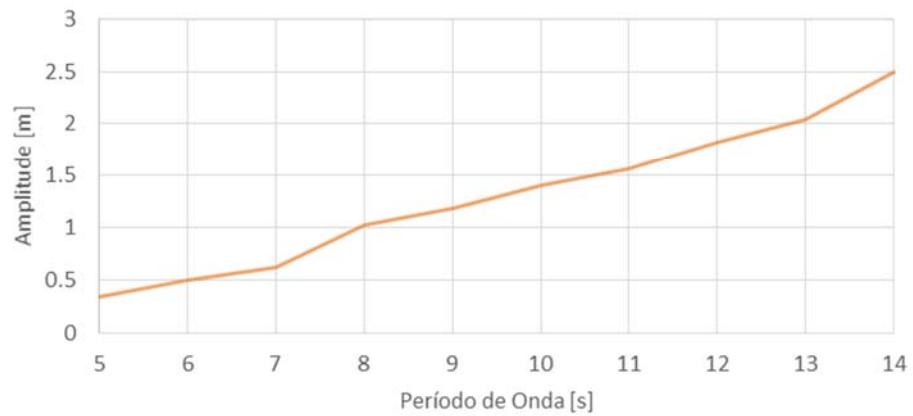


Figura 7.78 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 2 com profundidade de 2500m e incidência de 30°

7.3.2.5 Profundidade: 3000m

A Tabela 7.41 apresenta, para cada período analisado na profundidade de 3000 metros, os valores de *heave* mínimo e máximo do conjunto de equipamentos ao longo da análise dinâmica. A última coluna da tabela mostra a amplitude máxima de deslocamento em z do conjunto de equipamentos ao longo da série de movimentos.

Tabela 7.41 – Movimento em *heave* do conjunto de equipamentos 2, a uma profundidade de 3000 metros

Período (s)	<i>Heave</i> (m)		Aplitude máx de deslocamento em z (m)
	Máximo	Mínimo	
5	-0.64	-1.05	0.42
6	-0.61	-1.07	0.46
7	-0.45	-1.27	0.82
8	-0.27	-1.44	1.17
9	-0.08	-1.63	1.55
10	-0.13	-1.60	1.48
11	-0.09	-1.58	1.49
12	-0.06	-1.69	1.63
13	0.09	-1.89	1.98
14	0.23	-2.02	2.25
5	-0.56	-1.14	0.59
6	-0.50	-1.22	0.71
7	-0.42	-1.24	0.83
8	-0.19	-1.43	1.24
9	-0.17	-1.51	1.33
10	0.01	-1.57	1.57
11	0.05	-1.73	1.78
12	0.11	-1.79	1.89
13	0.24	-1.87	2.11
14	0.40	-2.24	2.64

As Figuras 7.79 e 7.80 fazem uma relação da amplitude máxima de movimento vertical com o período de onda de pico para cada situação estudada.

Amplitude de Deslocamento em Heave Prof. 3000m - Incidência 0°

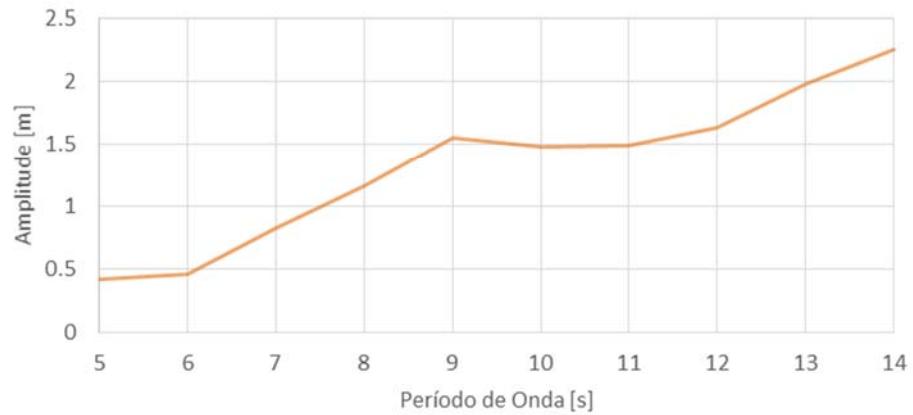


Figura 7.79 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 2 com profundidade de 3000m e incidência de 0°

Amplitude de Deslocamento em Heave Prof. 3000m - Incidência 30°

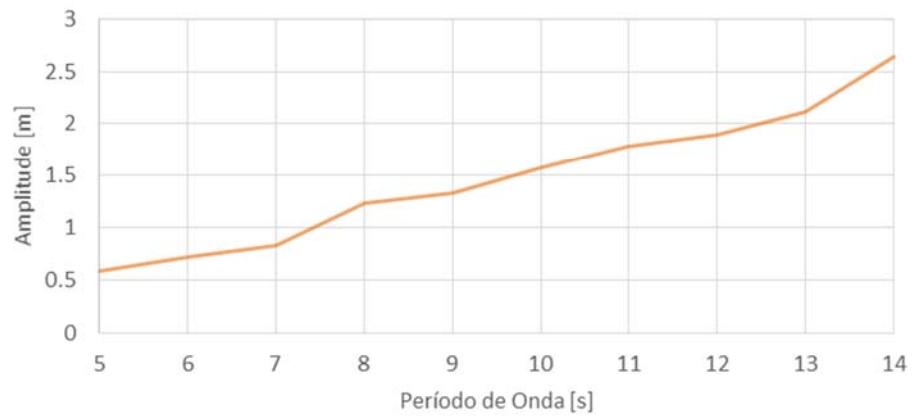


Figura 7.80 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 2 com profundidade de 3000m e incidência de 30°

7.3.2.6 Profundidade: 3500m

A Tabela 7.42 apresenta, para cada período analisado na profundidade de 3500 metros, os valores de *heave* mínimo e máximo do conjunto de equipamentos ao longo da análise dinâmica. A última coluna da tabela mostra a amplitude máxima de deslocamento em z do conjunto de equipamentos ao longo da série de movimentos.

Tabela 7.42 – Movimento em *heave* do conjunto de equipamentos 2, a uma profundidade de 3500 metros

Período (s)	<i>Heave</i> (m)		Aplitude máx de deslocamento em z (m)
	Máximo	Mínimo	
5	-0.49	-0.88	0.38
6	-0.29	-1.08	0.79
7	-0.14	-1.22	1.07
8	-0.02	-1.37	1.35
9	0.17	-1.52	1.69
10	0.13	-1.53	1.66
11	0.16	-1.51	1.67
12	0.20	-1.59	1.79
13	0.32	-1.87	2.19
14	0.42	-1.87	2.29
5	-0.29	-1.09	0.80
6	-0.05	-1.29	1.24
7	-0.12	-1.33	1.21
8	0.06	-1.46	1.51
9	0.10	-1.46	1.56
10	0.34	-1.46	1.80
11	0.35	-1.63	1.98
12	0.41	-1.73	2.14
13	0.53	-1.89	2.42
14	0.69	-2.09	2.78

As Figuras 7.81 e 7.82 fazem uma relação da amplitude máxima de movimento vertical com o período de onda de pico para cada situação estudada.

Amplitude de Deslocamento em Heave
Prof. 3500m - Incidência 0°

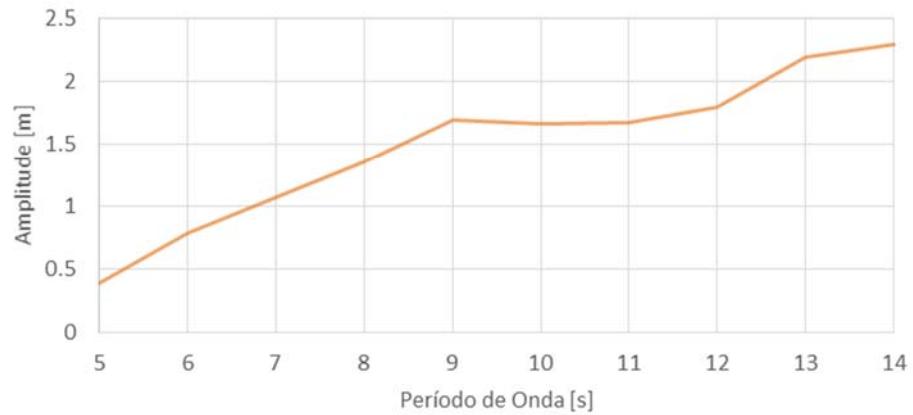


Figura 7.81 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 2 com profundidade de 3500m e incidência de 0°

Amplitude de Deslocamento em Heave
Prof. 3500m - Incidência 30°

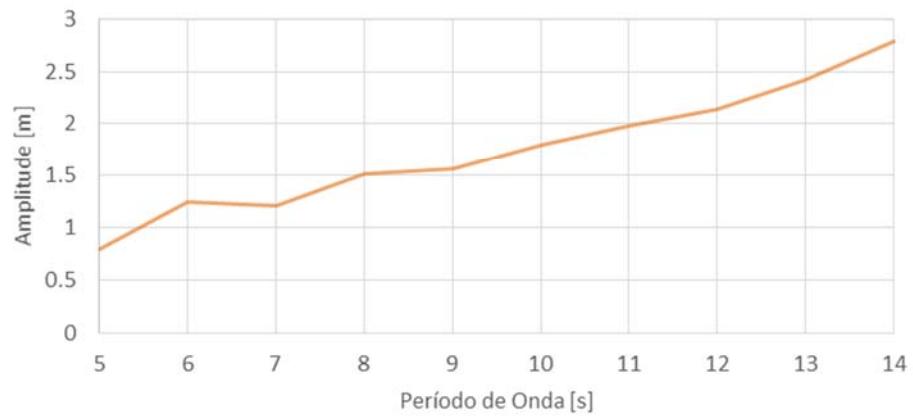


Figura 7.82 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 2 com profundidade de 3500m e incidência de 30°

7.3.2.7 Profundidade: 4000m

A Tabela 7.43 apresenta, para cada período analisado na profundidade de 4000 metros, os valores de *heave* mínimo e máximo do conjunto de equipamentos ao longo da análise dinâmica. A última coluna da tabela mostra a amplitude máxima de deslocamento em z do conjunto de equipamentos ao longo da série de movimentos.

Tabela 7.43 – Movimento em *heave* do conjunto de equipamentos 2, a uma profundidade de 4000 metros

Período (s)	<i>Heave</i> (m)		Aplitude máx de deslocamento em z (m)
	Máximo	Mínimo	
5	-0.24	-0.59	0.34
6	0.09	-0.92	1.02
7	0.24	-1.06	1.30
8	0.52	-1.30	1.82
9	0.60	-1.44	2.04
10	0.49	-1.34	1.83
11	0.51	-1.41	1.92
12	0.59	-1.50	2.09
13	0.63	-1.69	2.31
14	0.77	-1.68	2.45
5	-0.21	-0.62	0.41
6	0.24	-1.09	1.33
7	0.30	-1.14	1.44
8	0.51	-1.30	1.82
9	0.48	-1.38	1.85
10	0.70	-1.48	2.17
11	0.69	-1.37	2.06
12	0.72	-1.53	2.24
13	0.91	-1.68	2.59
14	1.10	-1.91	3.01

As Figuras 7.83 e 7.84 fazem uma relação da amplitude máxima de movimento vertical com o período de onda de pico para cada situação estudada.

Amplitude de Deslocamento em Heave
Prof. 4000m - Incidência 0°



Figura 7.83 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 2 com profundidade de 4000m e incidência de 0°

Amplitude de Deslocamento em Heave
Prof. 4000m - Incidência 30°



Figura 7.84 – Amplitude máxima de deslocamento em *heave* do conjunto 2 com profundidade de 4000m e incidência de 30°

7.3.3 Resultados de Ângulo Máximo da *Lower Flex Joint*

De acordo com a norma [4], o ângulo da *lower flex joint* não deve superar o valor de 3.6 graus em situações em que o *riser* está conectado ao LMRP porém a operação de perfuração não está sendo executada. A norma não especifica os critérios para casos de instalação de equipamento, por isso serão utilizados os da tabela.

Foi verificado que os ângulos obtidos nos resultados dos modelos estão muito abaixo no limite especificado na norma, por isso foi selecionada a profundidade que apresentou os valores mais críticos de amplitude de *heave* para a plotagem dos resultados. No caso do conjunto de equipamentos 2 a profundidade selecionada foi de 4000 metros e a incidência de onda de 30 graus. Os valores do ângulo máximo da *lower flex joint* para cada caso de carregamento podem ser verificados na Tabela 7.44Tabela 7.22.

Tabela 7.44 – Ângulo máximo da *lower flex joint* do conjunto 2, a uma profundidade de 4000 metros e com incidência de onda de 30°

Período (s)	Ângulo Máximo da <i>lower flex joint</i> (°)	Limite normativo (°)	Critério Normativo
5	0.021	3.6	OK
6	0.017	3.6	OK
7	0.015	3.6	OK
8	0.016	3.6	OK
9	0.014	3.6	OK
10	0.012	3.6	OK
11	0.015	3.6	OK
12	0.014	3.6	OK
13	0.018	3.6	OK
14	0.018	3.6	OK

8 RESULTADOS DO PROCESSO DE TRANSPORTE DO BOP

8.1 Considerações Iniciais

Na segunda etapa do estudo de caso são executadas análises relacionadas ao procedimento de transporte do BOP/LMRP suspenso.

Os dados da embarcação e do *riser* utilizados nessa operação são os mesmos apresentados para o estudo de instalação dos equipamentos e podem ser verificados no Capítulo 6. Já com relação aos equipamentos, foi definido que o estudo será feito apenas para o conjunto 1, seus dados podem ser verificados no Item 6.1.3.

Foram consideradas para o estudo de transporte dos equipamentos duas velocidades de transporte (Item 6.5) e duas profundidades distintas (Item 6.3). Os casos de carregamento utilizados estão apresentados no Item 6.4.2.

8.2 Transporte com Profundidade de 1000m

8.2.1 Tensão Máxima no Riser

Essa seção apresenta os resultados obtidos para tensão máxima no *riser*. Esse valor deve ser comparado com o limite fornecido pela com a norma [4] com o objetivo de verificar se haverá risco durante a operação de transporte do BOP/LMRP.

As Tabelas 8.1 e 8.2 apresentam os valores de tensão máxima no *riser* para os casos com velocidade de transporte de 1.0 m/s e 1.5 m/s respectivamente. Além disso as tabelas apontam a distância em relação ao topo do *riser* do ponto em que ocorre a tensão máxima e a comparação dos resultados obtidos com o limite normativo.

Tabela 8.1 – Tensão máxima no riser para estudo do transporte de BOP a 1000 metros de profundidade, com velocidade de 1.0m/s

Velocidade: 1.0m/s					
Estado de mar		Tensão Máxima no Riser (kN/m ²)	Distância do Topo (m)	Limite Normativo (kN/m ²)	Critério Normativo
Altura (m)	Período (s)				
2	7	157792	46.2	300160	OK
2	9	159027	46.2	300160	OK
2	11	159230	50.3	300160	OK
3	7	160800	46.2	300160	OK
3	9	162675	46.2	300160	OK
3	11	163148	46.2	300160	OK

Tabela 8.2 – Tensão máxima no riser para estudo do transporte de BOP a 1000 metros de profundidade, com velocidade de 1.5m/s

Velocidade: 1.5m/s					
Estado de mar		Tensão Máxima no Riser (kN/m ²)	Distância do Topo (m)	Limite Normativo (kN/m ²)	Critério Normativo
Altura (m)	Período (s)				
2	7	159233	50.3	300160	OK
2	9	162311	50.3	300160	OK
2	11	162657	46.2	300160	OK
3	7	161513	50.3	300160	OK
3	9	166138	46.2	300160	OK
3	11	166710	46.2	300160	OK

As Figuras 8.1, 8.2, 8.3 e 8.4 apresentam os resultados das Tabelas 8.1 e 8.2 separados de acordo com a altura de pico do estado de mar escolhido. O objetivo das Figuras 8.1 e 8.2 é fazer uma comparação dos resultados nos casos com velocidade de 1.0 e 1.5 m/s, já o objetivo das Figuras 8.3 e 8.4 é fazer a comparação dos resultados obtidos com o limite normativo.

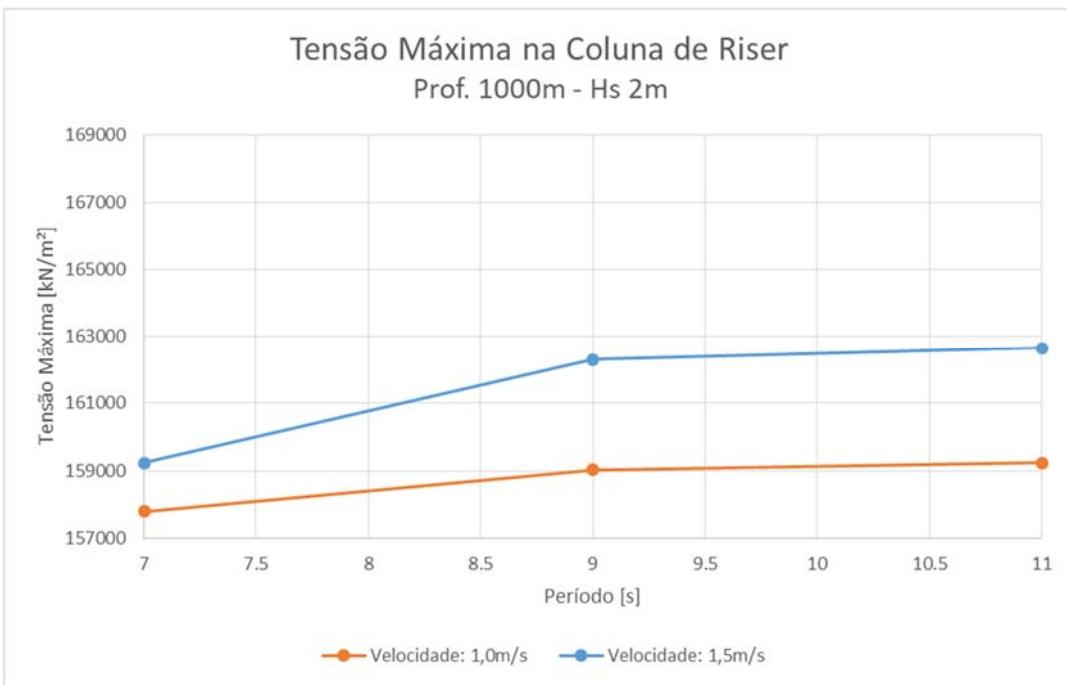


Figura 8.1 – Tensão máxima em cada período dos casos de estudo com profundidade de 1000 metros e Hs 3m

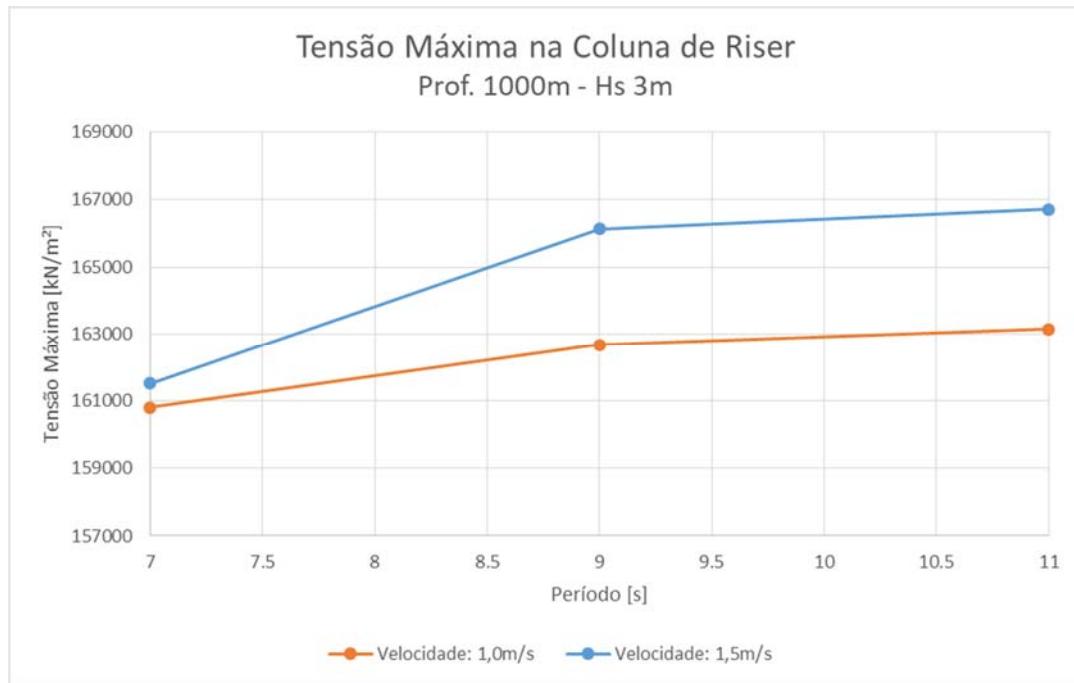


Figura 8.2 – Tensão máxima em cada período dos casos de estudo com profundidade de 1000 metros e Hs 3m

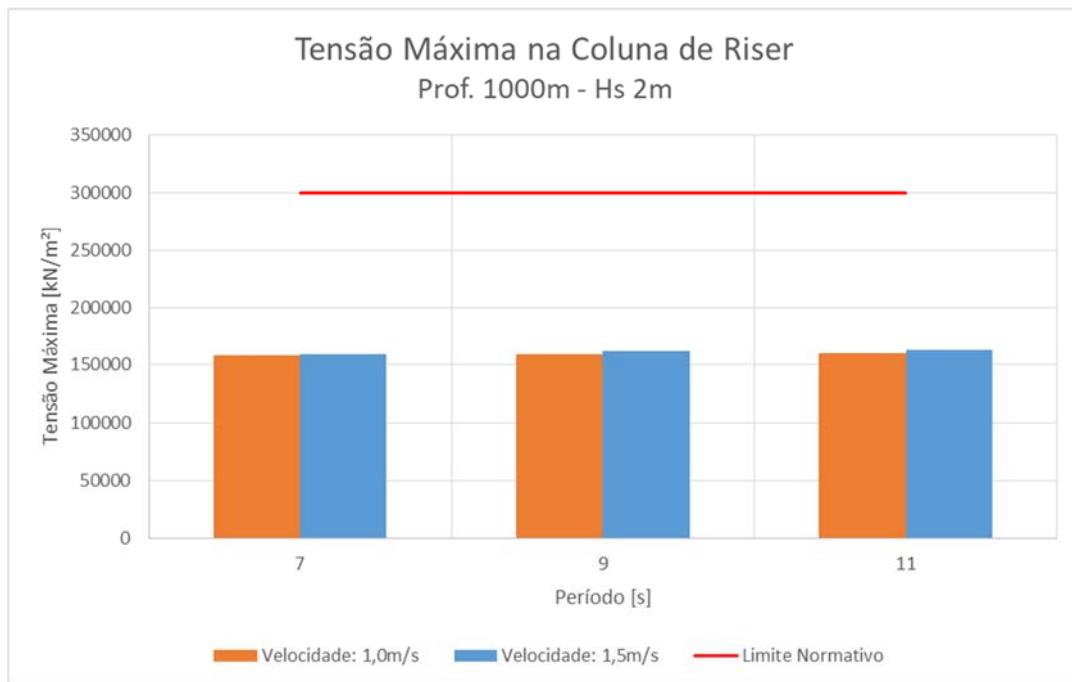


Figura 8.3 – Comparação da tensão máxima e do limite normativo para os casos de transporte à profundidade de 1000 metros e Hs 2m

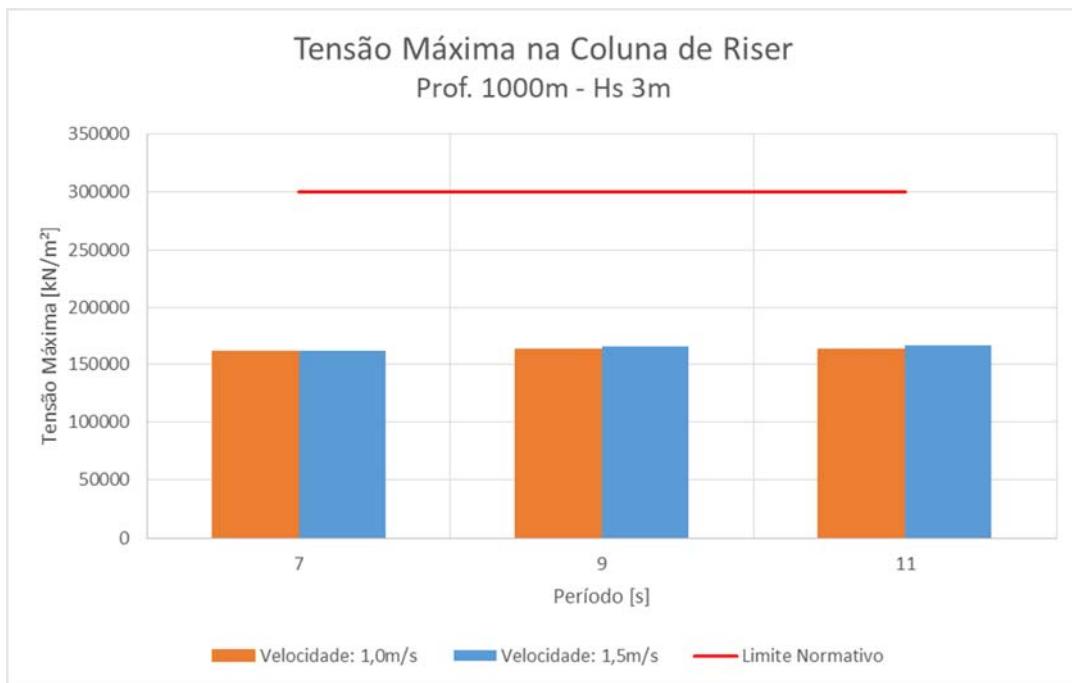


Figura 8.4 - Comparação da tensão máxima e do limite normativo para os casos de transporte à profundidade de 1000 metros e Hs 3m

8.2.2 Momento Fletor Máximo no Riser

A Tabela 8.3 apresenta os valores de momento fletor máximo nos casos de transporte com velocidade de 1.0 e 1.5 m/s, a Figura 8.5 apresenta os mesmos valores em forma de gráfico. As Figuras 8.6 e 8.7 apresentam os resultados de momento fletor máximo divididos em alturas de onda, para cada período estudado.

Tabela 8.3 – Momentos fletores máximos nos casos de transporte do BOP a 1000 metros de profundidade

Profundidade (m)	Estado de mar			Momento Fletor Máximo no Riser (kN.m)	
	Incidência (°)	Altura (m)	Período (s)	1.0 m/s	1.5 m/s
1000	0	2	7	53.14	78.73
1000	0	2	9	56.04	83.37
1000	0	2	11	56.79	86.26
1000	0	3	7	55.42	81.18
1000	0	3	9	59.93	88.36
1000	0	3	11	61.08	92.82

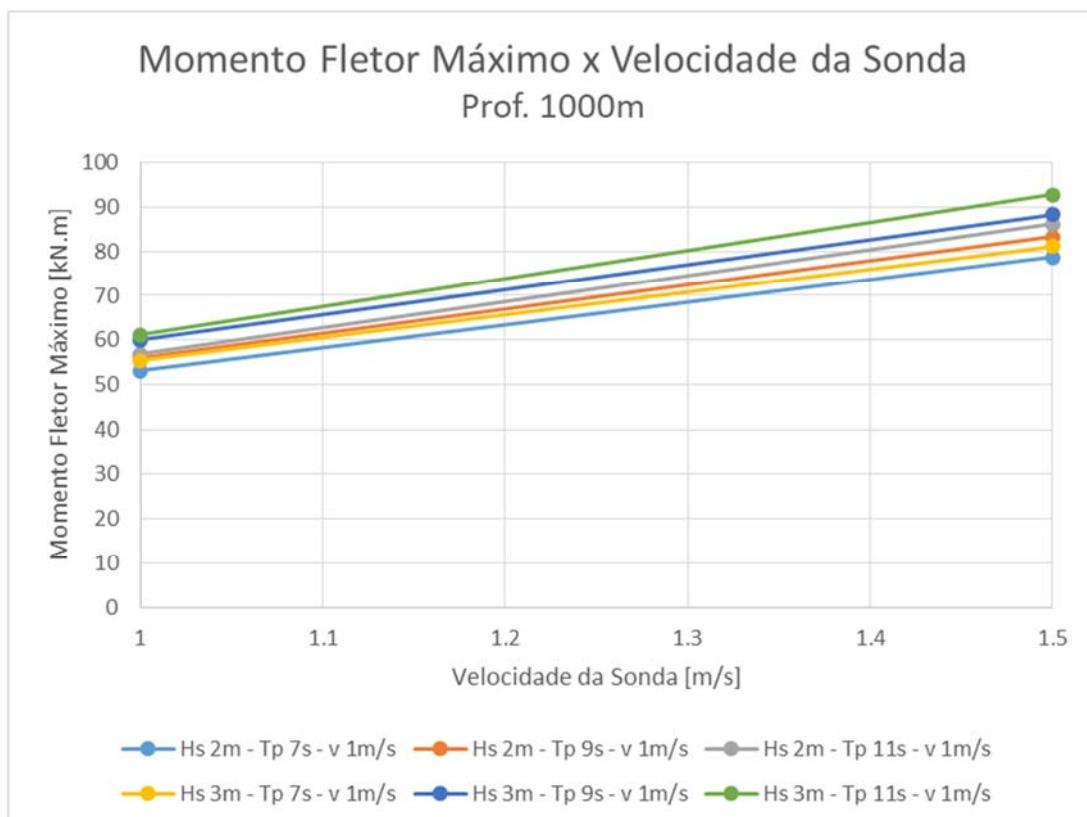


Figura 8.5 – Momento fletor máximo a profundidade de 1000 metros e velocidade variando entre 1.0m/s e 1.5m/s

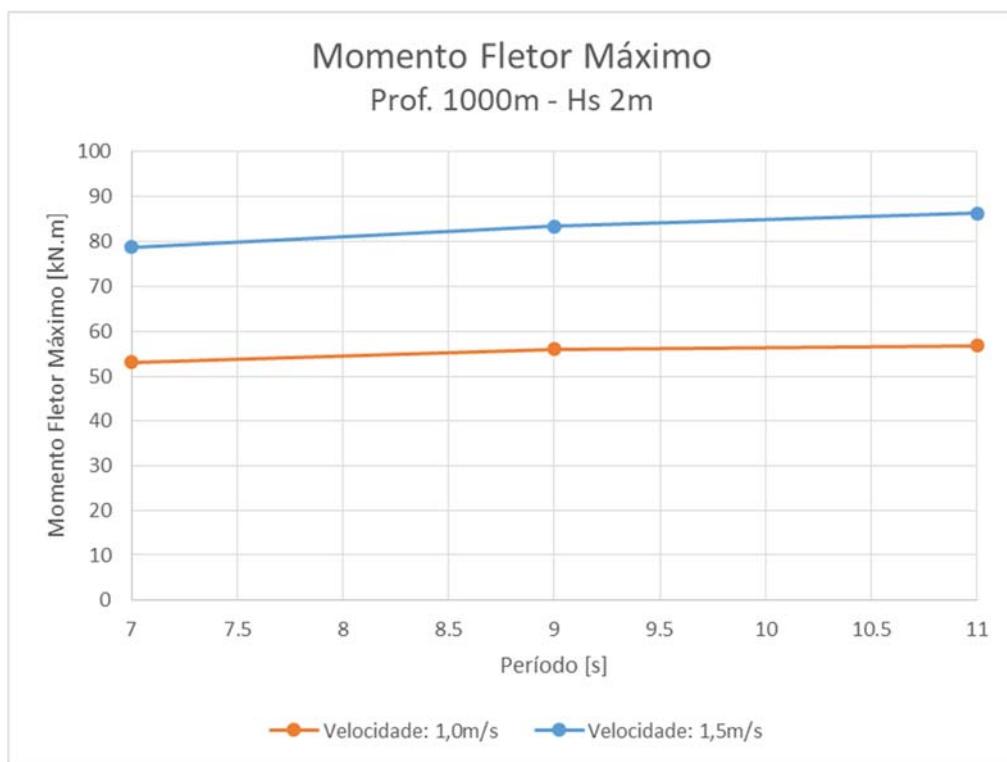


Figura 8.6 – Momento fletor máximo em cada período dos estudos de caso de transporte com profundidade de 1000 metros e Hs 2m

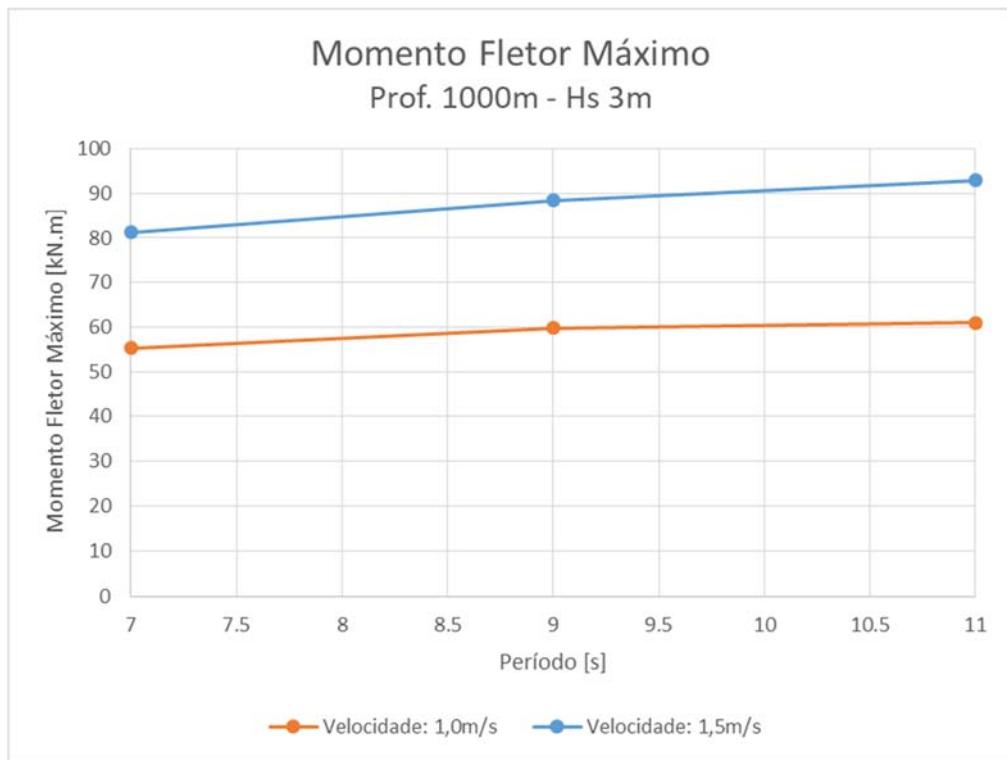


Figura 8.7 - Momento fletor máximo em cada período dos estudos de caso de transporte com profundidade de 1000 metros e Hs 3m

8.2.3 Ângulo Máximo da *Lower Flex Joint*

Assim como no estudo de instalação dos equipamentos, o limite normativo do ângulo da *lower flex joint* durante o procedimento de transporte do BOP/LMRP foi definido de acordo com a norma [4]. A tabela especifica que o ângulo não deve superar o valor de 3.6 graus em situações em que o *riser* está conectado ao LMRP porém a operação de perfuração não está sendo executada. Sendo assim, a Tabela 8.4 apresenta os valores obtidos em cada caso estudado e o critério normativo.

Tabela 8.4 – Ângulo máximo da *lower flex joint* nos casos de transporte de equipamentos em profundidade de 1000 metros

Velocidade de Transporte (m/s)	Estado de mar		Ângulo Máximo da <i>lower flex joint</i> (°)	Limite normativo (°)	Critério Normativo
	Altura (m)	Período (s)			
1.0	2	7	0.046	3.6	OK
1.0	2	9	0.047	3.6	OK
1.0	2	11	0.047	3.6	OK
1.0	3	7	0.049	3.6	OK
1.0	3	9	0.049	3.6	OK
1.0	3	11	0.049	3.6	OK
1.5	2	7	0.099	3.6	OK
1.5	2	9	0.100	3.6	OK
1.5	2	11	0.101	3.6	OK
1.5	3	7	0.102	3.6	OK
1.5	3	9	0.104	3.6	OK
1.5	3	11	0.104	3.6	OK

8.3 Transporte com Profundidade de 1500m

8.3.1 Tensão Máxima atuante no Riser

As Tabelas 8.5 e 8.6 apresentam os valores de tensão máxima no *riser* para os casos com velocidade de transporte de 1.0 m/s e 1.5 m/s respectivamente. Além disso as tabelas apontam a distância em relação ao topo do *riser* do ponto em que ocorre a tensão máxima e a comparação dos resultados obtidos com o limite normativo.

Tabela 8.5 – Tensão máxima no *riser* para estudo do transporte de BOP a 1500 metros de profundidade, com velocidade de 1.0m/s

Velocidade: 1.0m/s					
Estado de mar		Tensão Máxima no <i>Riser</i> (kN/m ²)	Distância do Topo (m)	Limte Normativo (kN/m ²)	Critério Normativo
Altura (m)	Período (s)				
2	7	163936	46.44	300160	OK
2	9	166181	46.44	300160	OK
2	11	166445	49.77	300160	OK
3	7	167070	46.44	300160	OK
3	9	170514	46.44	300160	OK
3	11	171135	46.44	300160	OK

Tabela 8.6 – Tensão máxima no *riser* para estudo do transporte de BOP a 1500 metros de profundidade, com velocidade de 1.5m/s

Velocidade: 1.5m/s					
Estado de mar		Tensão Máxima no <i>Riser</i> (kN/m ²)	Distância do Topo (m)	Limte Normativo (kN/m ²)	Critério Normativo
Altura (m)	Período (s)				
2	7	165922	49.77	300160	OK
2	9	16924	46.44	300160	OK
2	11	169220	46.44	300160	OK
3	7	168620	46.44	300160	OK
3	9	173777	49.77	300160	OK
3	11	173959	49.77	300160	OK

As Figuras 8.8, 8.9, 8.10 e 8.11 apresentam os resultados das Tabelas 8.5 e 8.6 separados de acordo com a altura de pico do estado de mar escolhido. O objetivo das Figuras 8.8 e 8.9 é fazer uma comparação dos resultados nos casos com velocidade de 1.0 e 1.5 m/s, já o objetivo das Figuras 8.10 e 8.11 é fazer a comparação dos resultados obtidos com o limite normativo.

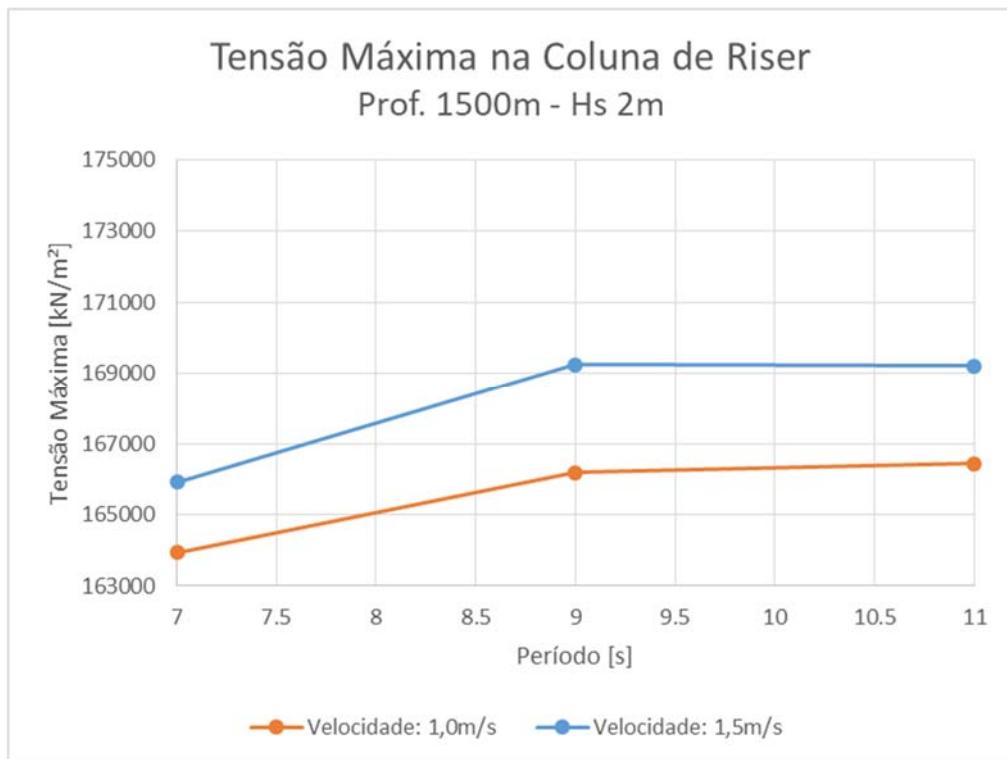


Figura 8.8 – Tensão máxima em cada período dos casos de estudo com profundidade de 1500 metros e Hs 2m

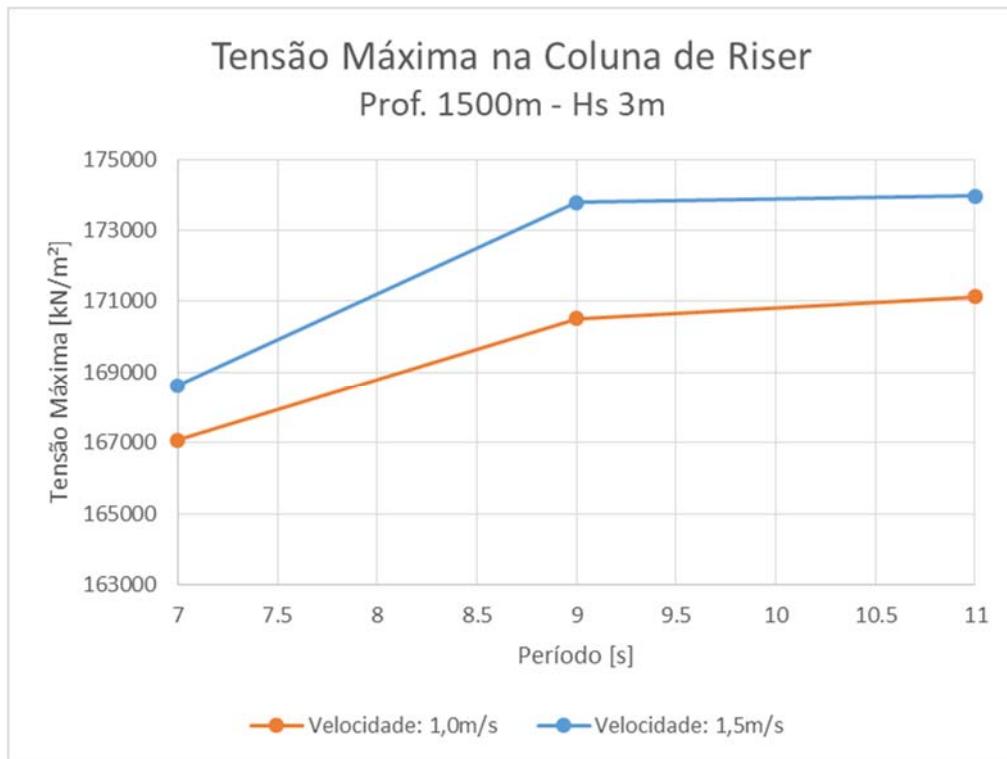


Figura 8.9 – Tensão máxima em cada período dos casos de estudo com profundidade de 1500 metros e Hs 3m

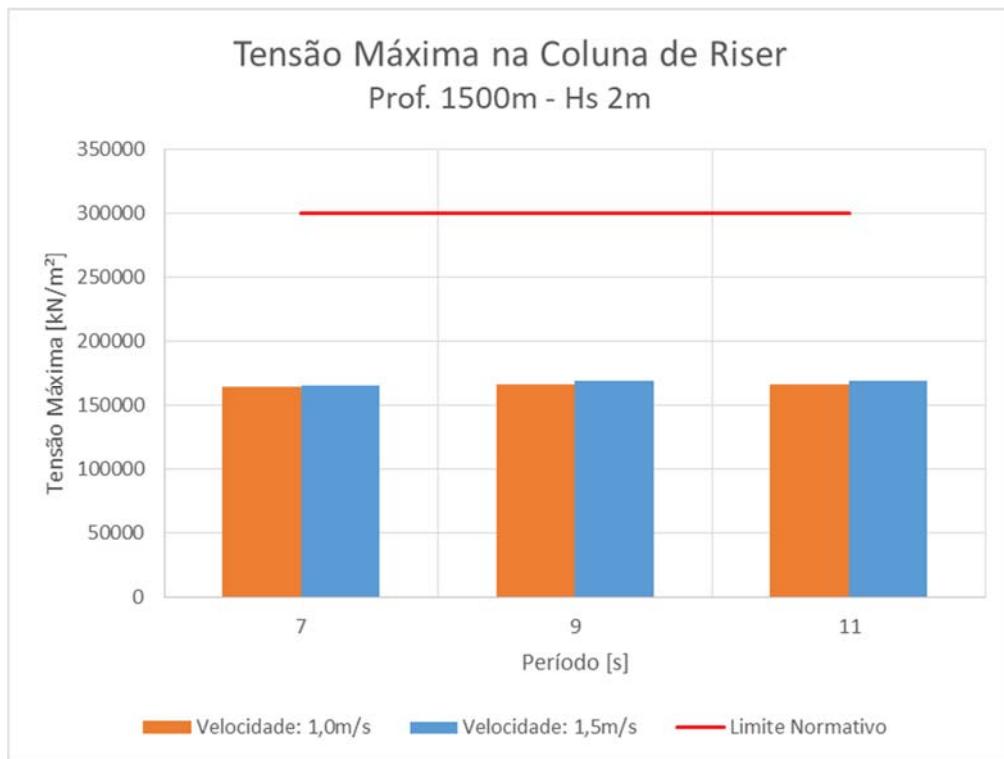


Figura 8.10 – Comparação da tensão máxima e do limite normativo para os casos de transporte à profundidade de 1500 metros e Hs 2m

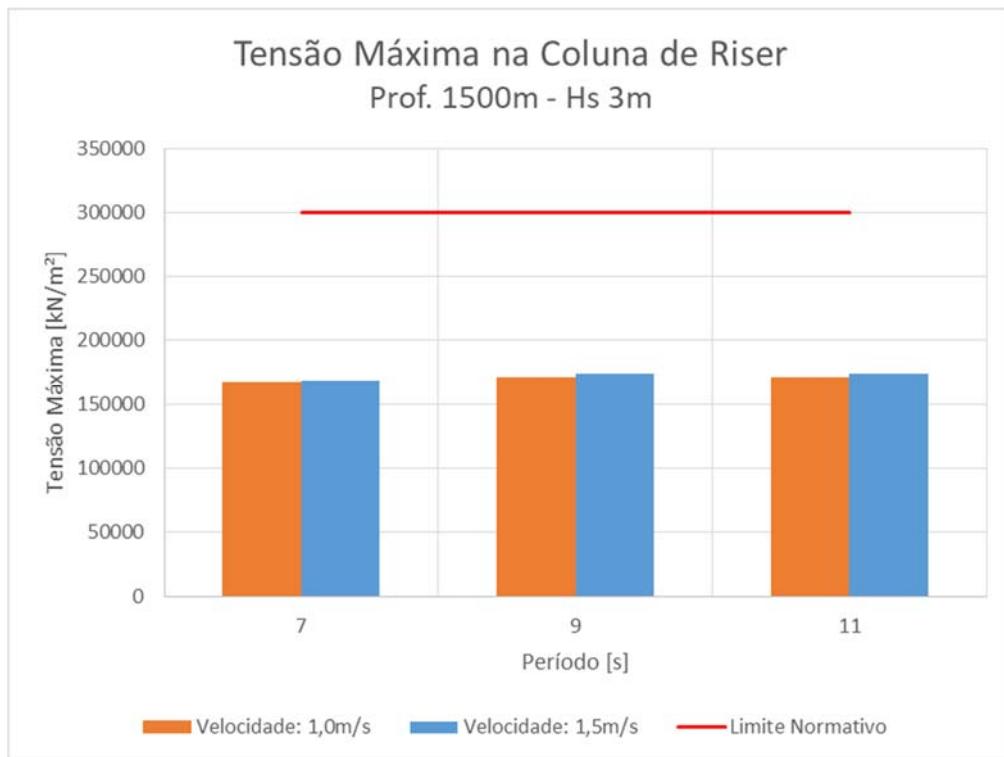


Figura 8.11 - Comparação da tensão máxima e do limite normativo para os casos de transporte à profundidade de 1500 metros e Hs 3m

8.3.2 Momento Fletor Máximo no Riser

A Tabela 8.7 apresenta os valores de momento fletor máximo nos casos de transporte com velocidade de 1.0 e 1.5 m/s, a Figura 8.5 apresenta os mesmos valores em forma de gráfico. As Figuras 8.8 e 8.9 apresentam os resultados de momento fletor máximo divididos em alturas de onda, para cada período estudado.

Tabela 8.7 – Momentos fletores máximos nos casos de transporte do BOP a 1500 metros de profundidade

Profundidade (m)	Estado de mar			Momento Fletor Máximo no Riser (kN.m)	
	Incidência (°)	Altura (m)	Período (s)	1.0 m/s	1.5 m/s
1500	0	2	7	49.88	73.80
1500	0	2	9	53.04	76.85
1500	0	2	11	53.70	79.02
1500	0	3	7	52.11	75.51
1500	0	3	9	57.03	81.28
1500	0	3	11	58.05	85.67

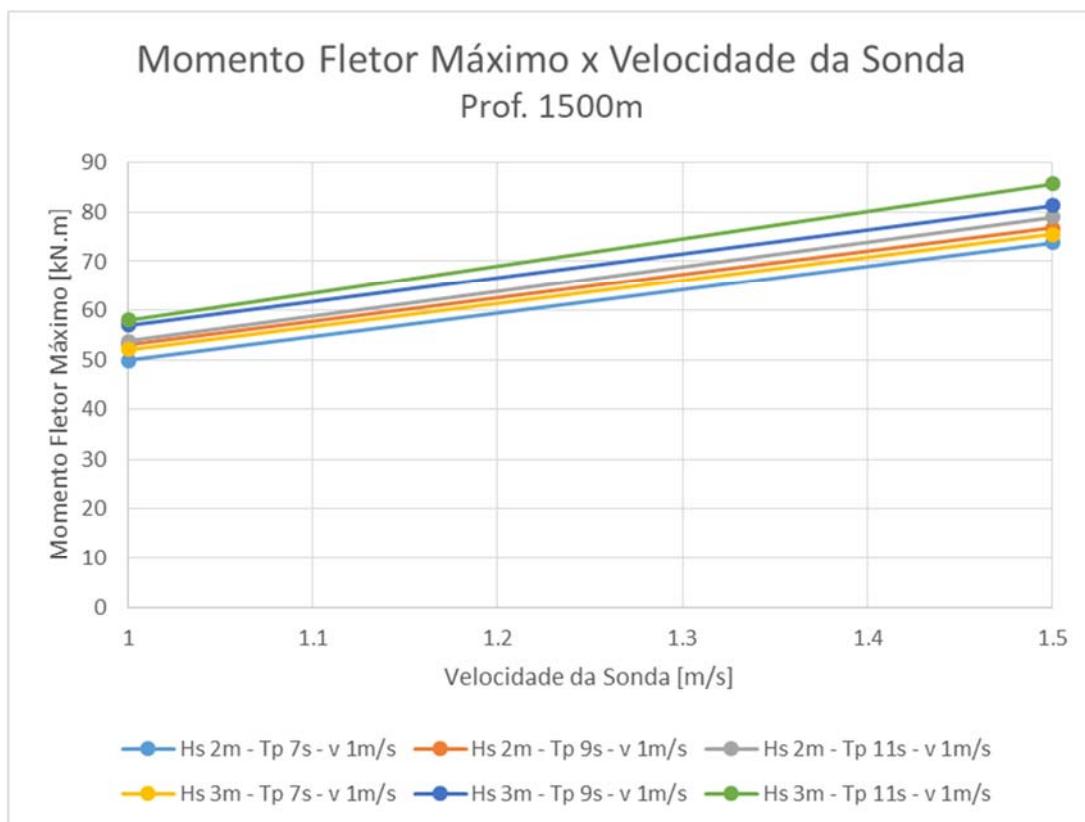


Figura 8.12 – Momento fletor máximo a profundidade de 1500 metros e velocidade variando entre 1.0m/s e 1.5m/s

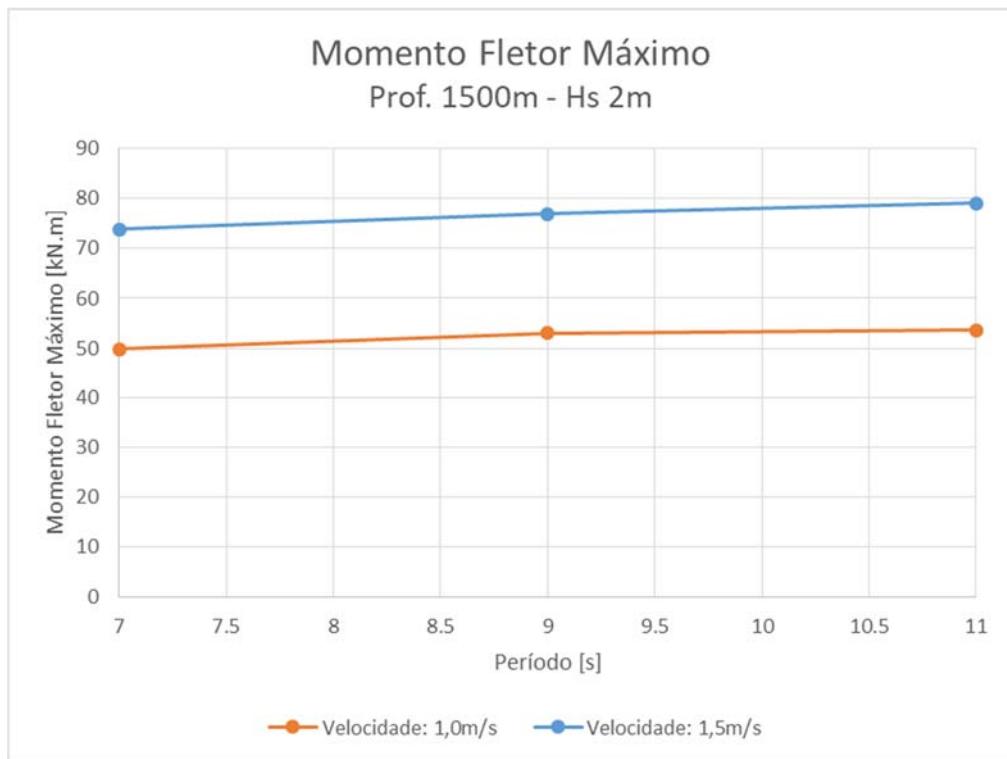


Figura 8.13 – Momento fletor máximo em cada período dos estudos de caso de transporte com profundidade de 1500 metros e Hs 2 m

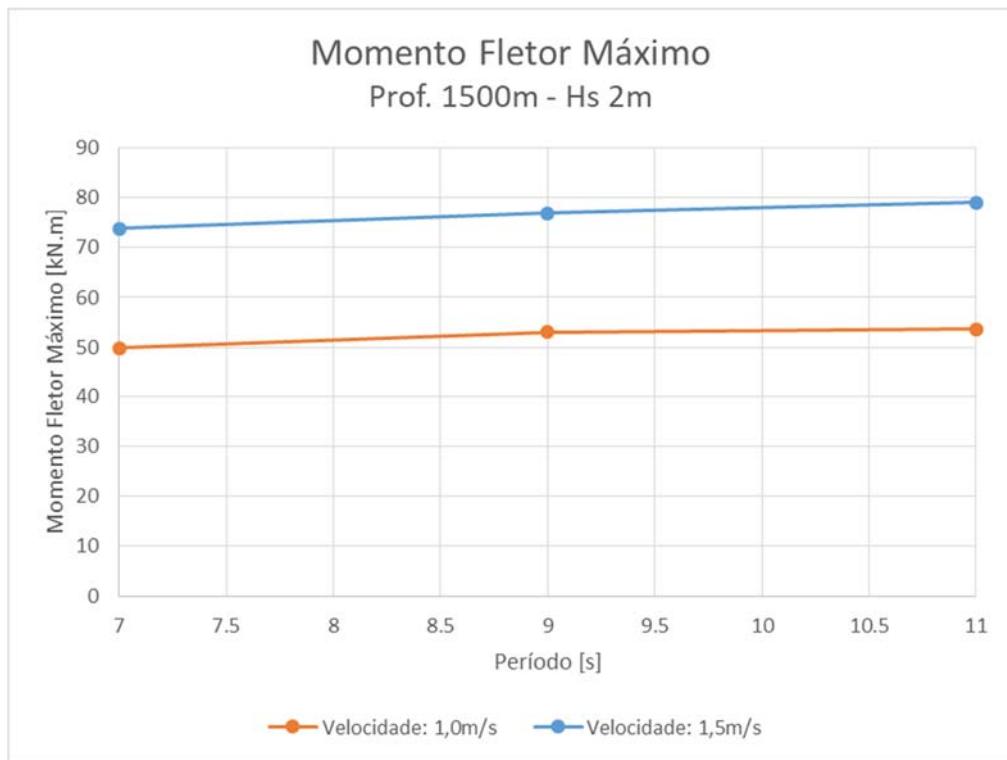


Figura 8.14 - Momento fletor máximo em cada período dos estudos de caso de transporte com profundidade de 1500 metros e Hs 3m

8.3.3 Ângulo Máximo da *Lower Flex Joint*

Assim como no estudo de instalação dos equipamentos, o limite normativo do ângulo da *lower flex joint* durante o procedimento de transporte do BOP/LMRP foi definido de acordo com a norma [4]. A tabela especifica que o ângulo não deve superar o valor de 3.6 graus em situações em que o *riser* está conectado ao LMRP porém a operação de perfuração não está sendo executada. Sendo assim, a Tabela 8.4 apresenta os valores obtidos em cada caso estudado e o critério normativo.

Tabela 8.8 – Ângulo máximo da *lower flex joint* nos casos de transporte de equipamentos em profundidade de 1500 metros

Velocidade de Transporte (m/s)	Estado de mar		Ângulo Máximo da <i>lower flex joint</i> (°)	Limite normativo (°)	Critério Normativo
	Altura (m)	Período (s)			
1.0	2	7	0.047	3.6	OK
1.0	2	9	0.048	3.6	OK
1.0	2	11	0.047	3.6	OK
1.0	3	7	0.049	3.6	OK
1.0	3	9	0.049	3.6	OK
1.0	3	11	0.048	3.6	OK
1.5	2	7	0.101	3.6	OK
1.5	2	9	0.101	3.6	OK
1.5	2	11	0.101	3.6	OK
1.5	3	7	0.105	3.6	OK
1.5	3	9	0.105	3.6	OK
1.5	3	11	0.105	3.6	OK

8.4 Transporte com Profundidade de 3000m

8.4.1 Tensão Máxima atuante no Riser

As Tabelas 8.9 e 8.10 apresentam os valores de tensão máxima no *riser* para os casos com velocidade de transporte de 1.0 m/s e 1.5 m/s respectivamente. Além disso as tabelas apontam a distância em relação ao topo do *riser* do ponto em que ocorre a tensão máxima e a comparação dos resultados obtidos com o limite normativo.

Tabela 8.9 – Tensão máxima no *riser* para estudo do transporte de BOP a 3000 metros de profundidade, com velocidade de 1.0m/s

Velocidade: 1.0m/s					
Estado de mar		Tensão Máxima no <i>Riser</i> (kN/m ²)	Distância do Topo (m)	Limite Normativo (kN/m ²)	Critério Normativo
Altura (m)	Período (s)				
2	7	191177	10.89	300160	OK
2	9	191960	10.89	300160	OK
2	11	189422	12.12	300160	OK
3	7	198460	10.89	300160	OK
3	9	199682	10.89	300160	OK
3	11	196000	43.95	300160	OK

Tabela 8.10 – Tensão máxima no *riser* para estudo do transporte de BOP a 3000 metros de profundidade, com velocidade de 1.5m/s

Velocidade: 1.5m/s					
Estado de mar		Tensão Máxima no <i>Riser</i> (kN/m ²)	Distância do Topo (m)	Limite Normativo (kN/m ²)	Critério Normativo
Altura (m)	Período (s)				
2	7	192066	13.41	300160	OK
2	9	193809	13.41	300160	OK
2	11	192847	13.41	300160	OK
3	7	197923	13.41	300160	OK
3	9	200714	13.41	300160	OK
3	11	199204	13.41	300160	OK

As Figuras 8.15, 8.16, 8.17 e 8.18 apresentam os resultados das Tabelas 8.9 e 8.10 separados de acordo com a altura de pico do estado de mar escolhido. O objetivo das Figuras 8.15 e 8.16 é fazer uma comparação dos resultados nos casos com velocidade de 1.0 e 1.5 m/s, já o objetivo das Figuras 8.17 e 8.18 é fazer a comparação dos resultados obtidos com o limite normativo.

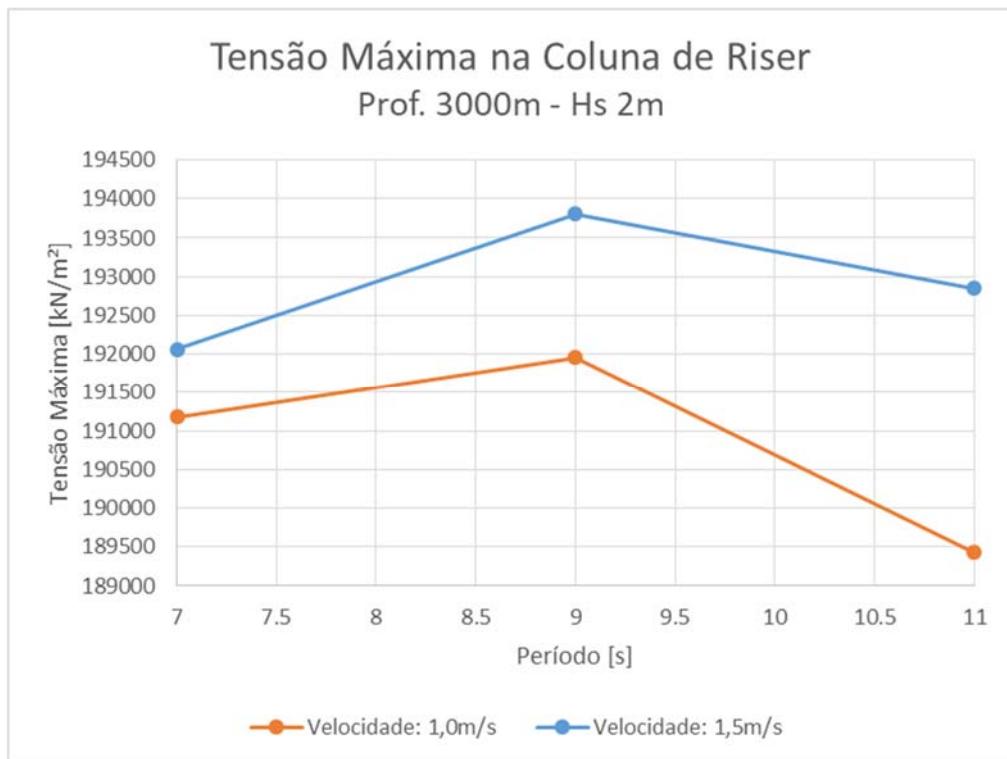


Figura 8.15 – Tensão máxima em cada período dos casos de estudo com profundidade de 3000 metros e Hs 2m

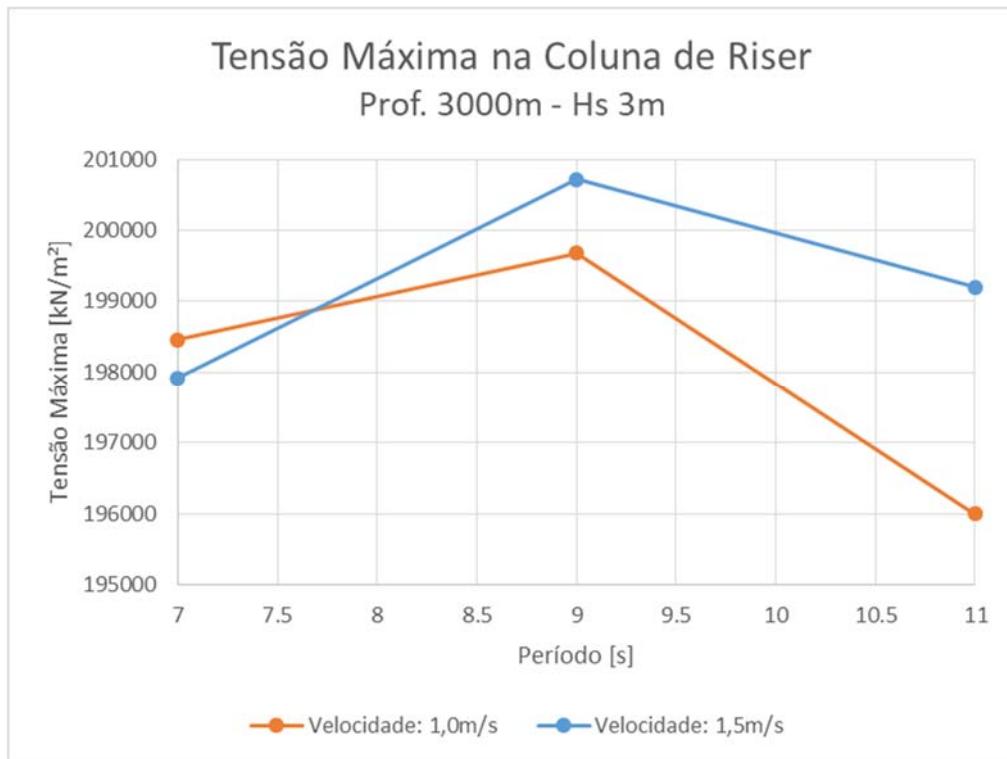


Figura 8.16 – Tensão máxima em cada período dos casos de estudo com profundidade de 3000 metros e Hs 3m

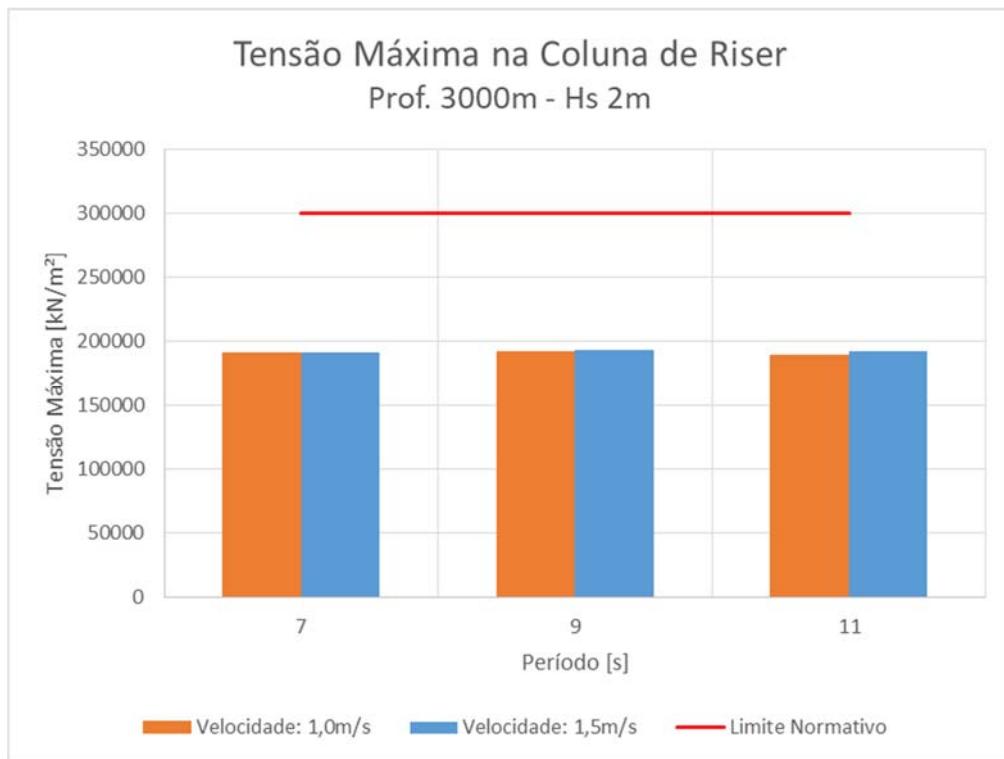


Figura 8.17 – Comparação da tensão máxima e do limite normativo para os casos de transporte à profundidade de 3000 metros e Hs 2m

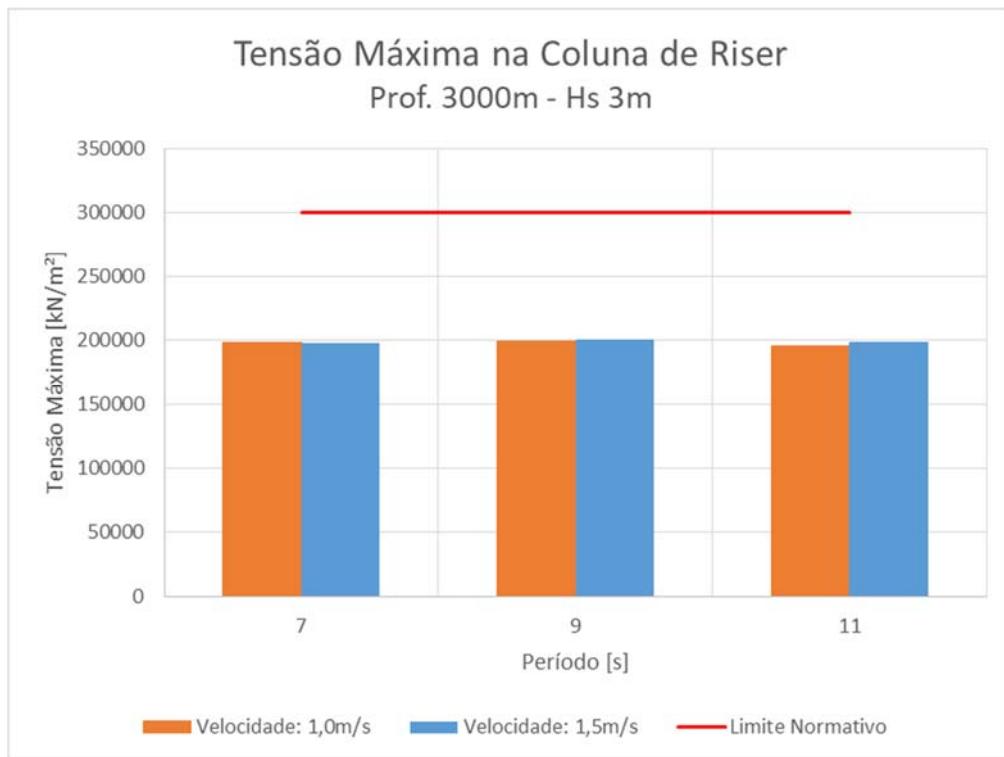


Figura 8.18 - Comparação da tensão máxima e do limite normativo para os casos de transporte à profundidade de 3000 metros e Hs 3m

8.4.2 Momento Fletor Máximo no Riser

A Tabela 8.11 apresenta os valores de momento fletor máximo nos casos de transporte com velocidade de 1.0 e 1.5 m/s, a Figura 8.19 apresenta os mesmos valores em forma de gráfico. As Figuras 8.20 e 8.21 apresentam os resultados de momento fletor máximo divididos em alturas de onda, para cada período estudado.

Tabela 8.11 – Momentos fletores máximos nos casos de transporte do BOP a 3000 metros de profundidade

Profundidade (m)	Estado de mar			Momento Fletor Máximo no Riser (kN.m)	
	Incidência (°)	Altura (m)	Período (s)	1.0 m/s	1.5 m/s
1500	0	2	7	43.8	70.7
1500	0	2	9	46.2	70.5
1500	0	2	11	48.1	71.1
1500	0	3	7	45.9	72.4
1500	0	3	9	49.8	72.9
1500	0	3	11	51.9	75.4

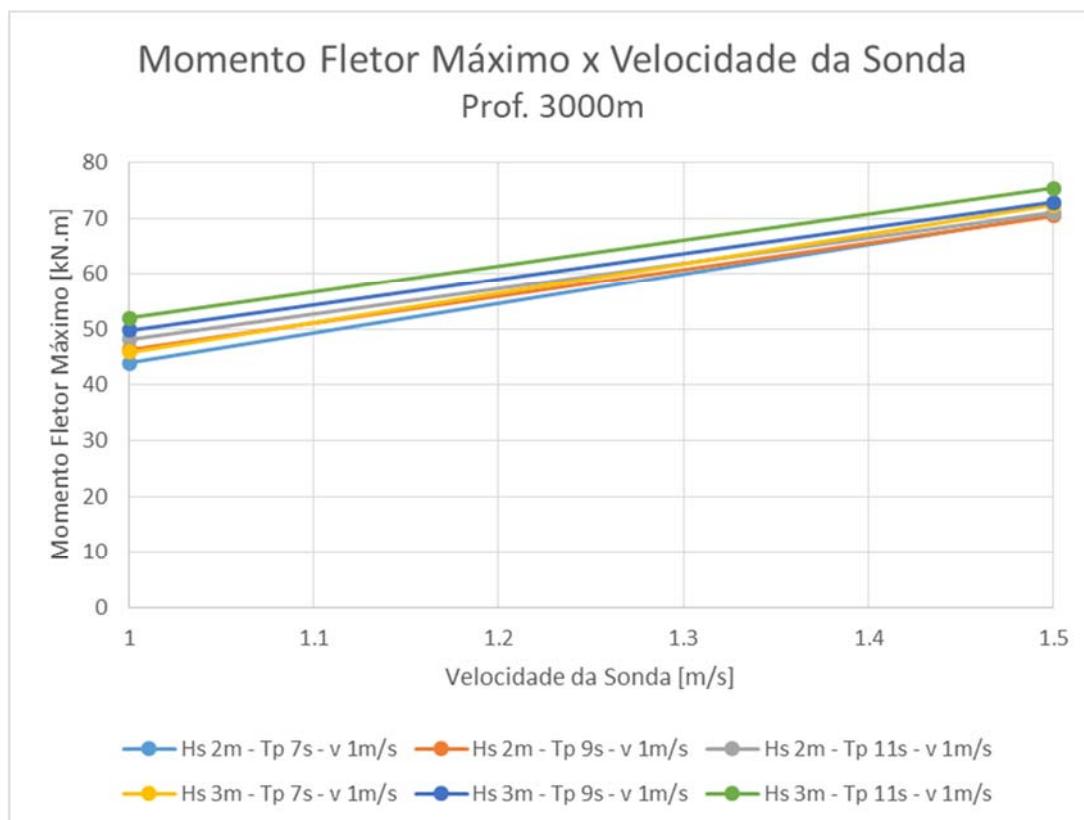


Figura 8.19 – Momento fletor máximo a profundidade de 3000 metros e velocidade variando entre 1.0m/s e 1.5m/s

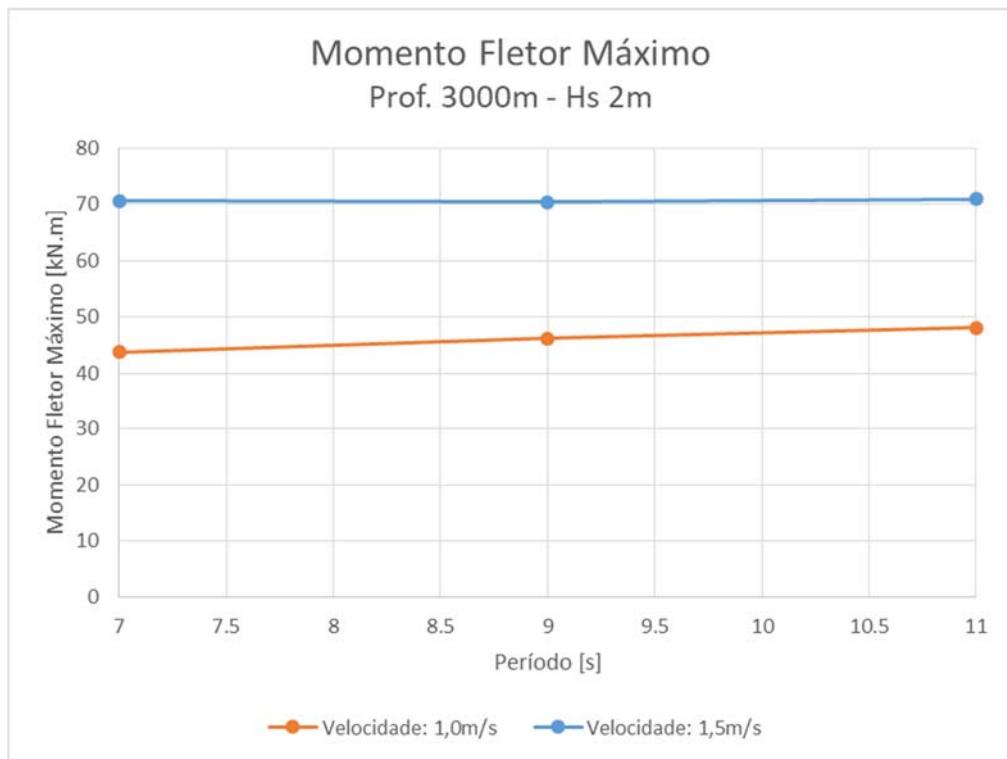


Figura 8.20 – Momento fletor máximo em cada período dos estudos de caso de transporte com profundidade de 3000 metros e Hs 2 m

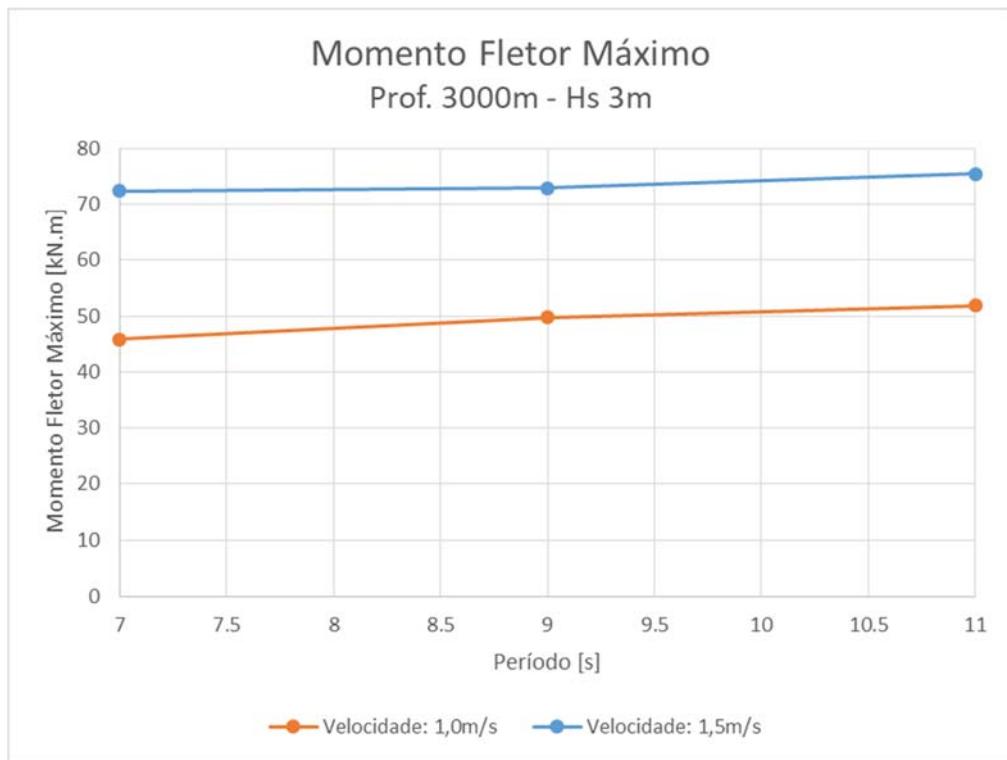


Figura 8.21 - Momento fletor máximo em cada período dos estudos de caso de transporte com profundidade de 3000 metros e Hs 3m

8.4.3 Ângulo Máximo da *Lower Flex Joint*

Assim como no estudo de instalação dos equipamentos, o limite normativo do ângulo da *lower flex joint* durante o procedimento de transporte do BOP/LMRP foi definido de acordo com a norma [4]. A tabela especifica que o ângulo não deve superar o valor de 3.6 graus em situações em que o *riser* está conectado ao LMRP porém a operação de perfuração não está sendo executada. Sendo assim, a Tabela 8.4 apresenta os valores obtidos em cada caso estudado e o critério normativo.

Tabela 8.12 – Ângulo máximo da *lower flex joint* nos casos de transporte de equipamentos em profundidade de 1500 metros

Velocidade de Transporte (m/s)	Estado de mar		Ângulo Máximo da <i>lower flex joint</i> (°)	Limite normativo (°)	Critério Normativo
	Altura (m)	Período (s)			
1.0	2	7	0.049	3.6	OK
1.0	2	9	0.048	3.6	OK
1.0	2	11	0.047	3.6	OK
1.0	3	7	0.053	3.6	OK
1.0	3	9	0.050	3.6	OK
1.0	3	11	0.049	3.6	OK
1.5	2	7	0.102	3.6	OK
1.5	2	9	0.102	3.6	OK
1.5	2	11	0.099	3.6	OK
1.5	3	7	0.075	3.6	OK
1.5	3	9	0.107	3.6	OK
1.5	3	11	0.103	3.6	OK

9 CONCLUSÕES

9.1 Considerações Finais

Este trabalho teve como objetivo fazer o estudo de dois procedimentos indispensáveis no processo de montagem da cabeça de poço para a execução da perfuração do mesmo com segurança.

Em um primeiro momento a dissertação trata do processo de instalação, nessa etapa são elaborados modelos em que o conjunto de equipamentos é posicionado em profundidades que variam entre 1000 e 4000 metros, a cada 500 metros. O intervalo de profundidades foi definido de forma que os resultados fornecidos abranjam as situações mais extremas de instalação e forneçam o conhecimento das reações que ocorrem no sistema em diferentes momentos do procedimento de instalação.

O objeto de interesse dos resultados obtidos nessa etapa está relacionado aos carregamentos que atuam no riser durante a instalação e aos deslocamentos dos equipamentos durante o processo. É necessário que as zonas de ressonância sejam monitoradas de forma cuidadosa, pois trata-se de trechos em que a operação se torna mais propensa a acidentes devido aos efeitos de amplificação dinâmica na movimentação dos equipamentos que ocorre em decorrência da incidência de ondas.

O estudo de caso foi feito considerando dois conjuntos de equipamentos com características físicas diferentes, o primeiro equivalente a equipamentos com dimensões medianas, usualmente encontrados em operações de perfuração, e o segundo com as maiores dimensões encontradas na literatura até o dia da publicação deste trabalho.

Mesmo se tratando de um procedimento utilizado em grande escala e com um vasto conhecimento de campo, o estudo dos efeitos de ressonância em sistemas de instalação de equipamentos são extremamente necessários para garantir que a operação seja realizada com segurança.

Através dos resultados apresentados no Capítulo 7 é possível notar que para casos de instalação de equipamentos com características equivalentes às definidas para o estudo apresentado neste trabalho, o sistema possui um bom comportamento.

Os modelos que utilizaram o conjunto de equipamentos 1 apresentaram resultados de tensão máxima no *riser* abaixo do limite definido pela norma em todas as profundidades de estudo. Os resultados mais críticos ocorreram nos casos com período de 10 segundos e períodos mais altos (14 segundos). Os gráficos de amplitude de deslocamento vertical do conjunto de equipamentos assumiram configurações equivalentes aos de tensão máxima.

Da mesma forma, os modelos que utilizaram o conjunto de equipamentos 2 apresentaram resultados satisfatórios com relação aos limites impostos pela norma, as tensões e deslocamentos obtidas nesse caso foram mais críticas que as do primeiro conjunto, pois este possui maiores dimensões.

Nos modelos com maiores profundidades foi possível notar que os resultados mais críticos foram obtidos com período de pico de 6 e 10 segundos, o que ocorre devido à influência do período de ressonância do sistema na amplitude de deslocamentos verticais dos equipamentos.

É importante ressaltar que os efeitos de ressonância do sistema de instalação foram minimizados devido ao amortecimento do conjunto de equipamentos, no entanto a metodologia de estudo continua válida, já que existem incertezas com relação aos coeficientes hidrodinâmicos utilizados nos modelos analisados.

Além disso, nota-se que os resultados obtidos nos casos com período de pico equivalente ao período de amplificação máxima em *heave* da embarcação são mais críticos que os resultados dos casos em que o período de pico é equivalente ao período de ressonância do sistema.

Outra restrição da norma para a execução de procedimentos com BOP/LMRP está relacionada ao ângulo máximo da *lower flex joint*, as tabelas apresentadas no Itens 7.2.3 e 7.3.3 mostram que os ângulos máximos obtidos nas situações mais críticas de instalação para os dois conjuntos de equipamentos ficaram muito abaixo do limite especificado pela norma.

O segundo procedimento analisado neste trabalho corresponde à etapa de transporte do conjunto BOP/LMRP, para isso foram definidas três profundidades de estudo, sendo elas 1000, 1500 e 3000 metros, com o objetivo de verificar a viabilidade do método de transporte com BOP suspenso em diferentes cenários de aplicação. Foram definidas também duas velocidades de deslocamento da sonda, 1.0m/s e 1.5m/s.

Para simular o caso mais crítico de transporte foi inserido no modelo um perfil de corrente com sentido oposto ao da movimentação da sonda, além de diferentes estados de mar atuando na embarcação. O conjunto de equipamentos escolhido para a execução deste estudo foi o conjunto 1.

A Seção 8.2 apresentou os resultados para o caso de transporte com profundidade de 1000 metros, pode-se notar pelos gráficos que tanto com velocidade de 1.0m/s quanto com velocidade de 1.5m/s as tensões máximas obtidas em todos os casos de carregamentos foram satisfatórias. Como era esperado os esforços obtidos nessa etapa apresentaram-se mais críticos que os obtidos na etapa de instalação, porém pôde-se notar que a inserção de uma corrente e da movimentação da sonda não resultou em esforços extremamente acentuados, o que é um fator que aponta para a viabilidade da operação.

O mesmo ocorre nos resultados obtidos com profundidade de 1500 e 3000 metros. Apesar de mais críticos que os com profundidade de 1000 metros, seus resultados de tensão máxima na coluna de *riser* e ângulo máximo da *lower flex joint* ficaram abaixo do limite imposto pela norma, indicando que é possível a utilização deste método para transporte dos equipamentos com as premissas e critérios considerados.

Nos gráficos de momento fletor apresentados no Capítulo 8 é possível notar que a variação do período de onda atuante na sonda não influenciou significativamente nos momentos que ocorrem na coluna de *riser*. A velocidade de movimentação da embarcação interfere de forma mais significativa nestes resultados.

Pode-se observar que as velocidades definidas para o estudo de caso foram maiores que o limite de 0.3 nós (0.56 km/h) recomendado para esta operação. Isso indica que os critérios de esforços impostos pela norma não são os fatores que definem essa limitação e sua eficiência pode ser melhorada através de estudos mais aprofundados na área.

É importante ressaltar que, durante o processo de transporte do BOP/LMRP, existe a possibilidade de ocorrência de efeitos que não foram considerados nos estudos de caso deste trabalho. Um exemplo que pode ser citado são as vibrações induzidas por vórtices, que ocorrem devido a passagem de fluido pela coluna de *riser* e podem gerar danos por fadiga no material.

9.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Os resultados obtidos por este trabalho mostraram que o sistema com BOP/LMRP suspenso pela coluna de *riser* se comporta de forma satisfatória durante a operação de transporte dos equipamentos. Os modelos utilizados no estudo apresentam cenários com características bastante específicas, sendo assim a análise deste mesmo procedimento em cenários variados poderia contribuir de forma positiva para a utilização deste procedimento.

Para essa variação é sugerido que os modelos possuam diferentes profundidades de posicionamento dos equipamentos durante a operação de transporte, variação das velocidades de movimentação da sonda de perfuração, utilização de BOPs e LMRPs com características mais extremas e aplicação de condições ambientais mais críticas.

Além disso podem ser desenvolvidos trabalhos que façam a relação do tempo necessário para a execução da operação de transporte e dos esforços que atuam no *riser* resultantes do cenário escolhido. Para esse tipo de estudo também podem ser utilizados modelos com diferentes características, como a variação do método de transporte utilizado, da velocidade da sonda e da profundidade dos equipamentos.

Outra possibilidade é a execução de estudos relacionados a problemas de fadiga que podem ocorrer na coluna de *riser* devido a efeitos gerados por vibrações induzidas por vórtices (VIV) na coluna de *riser* durante o procedimento de transporte dos BOP/LMRP.

Na etapa de instalação do BOP/LMRP também podem ser executados estudos considerando outros cenários ambientais, assim como características variadas do sistema. Estudos com a utilização de uma configuração mais detalhada da coluna de *riser* também podem ser relevantes.

Os coeficientes hidrodinâmicos dos conjuntos de equipamentos utilizados neste trabalho foram estimados com base na norma [43], uma possibilidade de trabalho futuro é sua obtenção por meio da execução de modelos de elementos finitos em softwares que utilizem o método CFD para obtenção de valores mais exatos para este coeficiente.

Outra possibilidade de abrangência no estudo apresentado é a execução de análises do procedimento de instalação com a utilização de simulações que representem o içamento dos equipamentos de forma contínua, podendo assim obter a resposta do

sistema de ao longo de todo procedimento, desde o início da descida dos equipamentos até sua instalação no leito marinho.

Por fim, durante a execução do estudo de caso, foi observado que a amplificação dinâmica da tração axial que ocorre na coluna de *riser* durante o procedimento de instalação do BOP/LMRP não depende da configuração da coluna. Ou seja, modificações no projeto de flutuadores possuem influência apenas no valor da tração média atuante na coluna de *riser*, sua amplitude se mantém a mesma em qualquer caso estudado.

Sendo assim, é possível que a obtenção dos esforços na coluna de *riser* durante o procedimento de instalação de equipamentos seja feita através do cálculo analítico da tração média atuante na coluna, caso a amplitude de um modelo equivalente específico seja conhecida.

É sugerido então que o cálculo dos esforços na coluna de *riser* durante a instalação de equipamentos seja feito por este método para diferentes configurações de flutuadores, possibilitando a obtenção de uma configuração ótima de forma simples e com rápida execução.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Thomas, J. E., *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. Editora Interciência, 2^a Edição, Rio de Janeiro, 2001.
- [2] Bai, Y., Bai, Q., *Subsea engineering handbook*. Elsevier, 2010.
- [3] Bai Y., Bai Q., *Subsea Pipelines and Risers*, Elsevier, Oxford, 2005.
- [4] API. Recommended Practice 16Q, *Desgin, Selection, Operation and Maintenance of Marine Drilling Riser Systems*, Washington, 1993.
- [5] <http://www.subseaservices.no/new-pup-joints-record-time> como acessado em Março de 2018.
- [6] <https://www.offshore-mag.com/articles/print/volume-61/issue-5/news/deepwater-ep-dynamic-risers-key-component-for-deepwater-drilling-floating-production.html> em 28/03/2018.
- [7] Kochem, R. M., Estudo Paramétrico da Dinâmica de um Riser de Perfuração em Águas Ultra-Profundas, UCP – Programa de Engenharia de Petróleo e Gás, Petrópolis, 2013.
- [8] ISO 13624-1. *Petroleum and natural gas industries. Drilling and production equipment, Part 1: Design and operation of marine drilling riser equipment*, 2007.
- [9] <http://pt.fype-drilling.com/mud-pump-and-it-s-spare-parts/> como acessado em Março de 2018.
- [10] Neto, A.G., Estudo dos Métodos de Controle de Poço, UFF – Departamento de Engenharia Química e de Petróleo, Niterói 2011.
- [11] Roberto, M.A.R., Critério Baseado em Deformações Plásticas para Avaliação da Integridade de Risers de Perfuração Corroídos, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2008.

- [12] Silva, L.R., A Influência da Junta Flexível na Operabilidade da Atividade de Perfuração, Poli/UFRJ – Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Rio de Janeiro, 2017.
- [13] <https://www.geoilandgas.com/drilling/offshore-drilling> como acessado em março de 2018.
- [14] <https://www.youtube.com/watch?v=hM3lPqgulTA> como acessado em abril de 2018.
- [15] <http://www.oceaneering.com/pipeline-connection-repair-systems/diver-installed-pipeline-systems/b-con-misalignment-ball-connector/> como acessado em março de 2018.
- [16] <http://www.cds.as/products.htm> como acessado em março de 2018.
- [17] *Equipamentos do Sistema Submarino de Sondas e Controle de Poço em Flutuantes*, Documento Interno Petrobrás, 2006.
- [18] Benzecry, F.S., Sistema Robótico para Inspeção Offshore das Linhas Principais de Risers de Perfuração, Poli/UFRJ – Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 2014.
- [19] Figueiredo, M.W., Estudo de Cargas em Cabeça de Poço Submarino em Operações de Completação, Dissertação de M.Sc., COOPE/UFRJ - Programa de Engenharia Oceânica, Rio de Janeiro, 2001.
- [20] <https://www.nap.edu/read/13273/chapter/6#47> como acessado em dezembro de 2018.
- [21] http://www.mapsoffshore.com.sg/equipment_categories/bop-drilling-equipment/ como acessado em março de 2018.
- [22] Worldwide Oilfield Machine, *Blowout Preventers*, Estados Unidos, 2011.
- [23] <https://www.offshoreenergytoday.com/uruguay-first-offshore-well-in-years-breaks-world-record/> como acessado em dezembro de 2018.
- [24] <http://www.jsg.utexas.edu/lacp/2016/04/uruguay-first-offshore-well-in-years-breaks-world-record/> como acessado em dezembro de 2018.

- [25] <https://www.offshore-mag.com/articles/print/volume-76/issue-2/drilling-and-completion/legacy-bop-technology-could-be-approaching-design-limitations.html> como acessado em dezembro de 2018.
- [26] Nascimento, V.M.F., Modelo de Instalação de Equipamentos Submarinos com Sistema de Compensação Passiva de Heave para Águas Profundas, Dissertação de M.Sc., UFF – Programa de Engenharia Mecânica, Niterói, 2014.
- [27] Ribeiro, M.L.P.G., Concepção de Manifolds Submarinos para Lançamento Pendular em Águas Ultraprofundas, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Oceânica, Rio de Janeiro, 2008.
- [28] Araújo, E., Proposta e Avaliação de um Método com Alternância de Cabos para a Instalação de Equipamentos Submarinos, Dissertação de M.Sc., COOPE/UFRJ - Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2017.
- [29] Araújo, E.; Jacobazzo, B. M.; Corrêa, F. N.; Jacob, B. P., Numerical evaluation of a subsea equipment installation method designed to avoid resonant responses. Applied Ocean Research, 2019.
- [30] Souza, C.E.M., Ferramenta Submarina para Compensação Ativa de Movimentos Verticais na Instalação de Equipamentos, Dissertação de M.Sc. COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Oceânica, Rio de Janeiro, 2009.
- [31] Mello, E.S., Modelo de Sistema Passivo de Compensação de Heave para Operações de Instalação de Equipamentos Submarinos em Águas Ultraprofundas, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Oceânica, Rio de Janeiro, 2004.
- [32] Neves, C.R., Instalação de Manifolds em Águas Profundas pelo Método Pendular à Luz de Ensaios com Modelos Reduzidos em Tanque Oceânico e Verificação Numérica, Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
- [33] Machado, R.D., Método Pendular para Instalação de Equipamentos no Fundo do Mar em Operações Offshore, Brasil Patente PI0306058-6 A, 10 de dezembro de 2003, 16 de agosto de 2005.

- [34] Mattos, J.M.F., Processo para Dewscida de Equipamentos ao Fundo do Mar, Brasil Patente PI 08000140-5 A2, 1 de fevereiro de 2008, 20 de outubro de 2009.
- [35] Mattos, J.M.F., Procedure for descente of equipment to bottom of sea, Estados Unidos Patente US 7954658 B2, 1 de maio de 2009, 7 de junho de 2011.
- [36] Holland, P., *Reliability of Deepwaters Subsea Blowout Preventers*, SPE Drilling and Completion, vol 16, no. 1, p. 12-18, 2001.
- [37] <https://www.offshore-mag.com/articles/print/volume-62/issue-6/news/general-interest/bop-deployed-move-saves-time-money.html> como acessado em abril de 2018.
- [38] Sognesand, S.A.I., Analysis of Riser Loads during BOP sailing, Dissertação de M.Sc., Norwegian University of Science and Technology - Department of Marine Technology, Noruega, 2015.
- [39] Sevillano, L.C., Estudo de Movimentação de uma Plataforma de Perfuração Flutuante com BOP Suspenso pelo Riser, Dissertação de M.Sc., Unicamp – Programa de Engenharia Mecânica, Campinas, 2013.
- [40] Hull, J. P., *BOP-deployed move saves time, money, Offshore*, volume 62, número 6, p. 36, 2002.
- [41] Transocean, *Moving with BOP/LMRP Suspended*, Seção 6, Subseção 4, 2014.
- [42] 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.
- [43] DNV-RP-H103, *Modelling and Analysis of Marine Operations*, Det Norske Veritas, 2011.
- [44] NOV Rig Systems, *Next Generation Drilling & Subsea Systems*, Estados Unidos, 2015.

APÊNDICE A SÉRIES DE MOVIMENTO DO BOP/LMRP

Durante o estudo da instalação do BOP/LMRP foi possível obter os gráficos de série de movimento de *heave* dos equipamentos ao longo do tempo. Este apêndice apresenta os gráficos referentes aos períodos de onda menos críticos (5 segundos) e mais críticos (14 segundos) em todas as profundidades estudadas e para ondas com incidência de 0° e 30° .

A.1 Conjunto de Equipamentos 1

A.1.1 Profundidade: 1000m

As Figuras A.10.1 e A.10.2 apresentam a série de movimento dos casos com Tp de 5 e 14 segundos para o conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1000 metros e incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

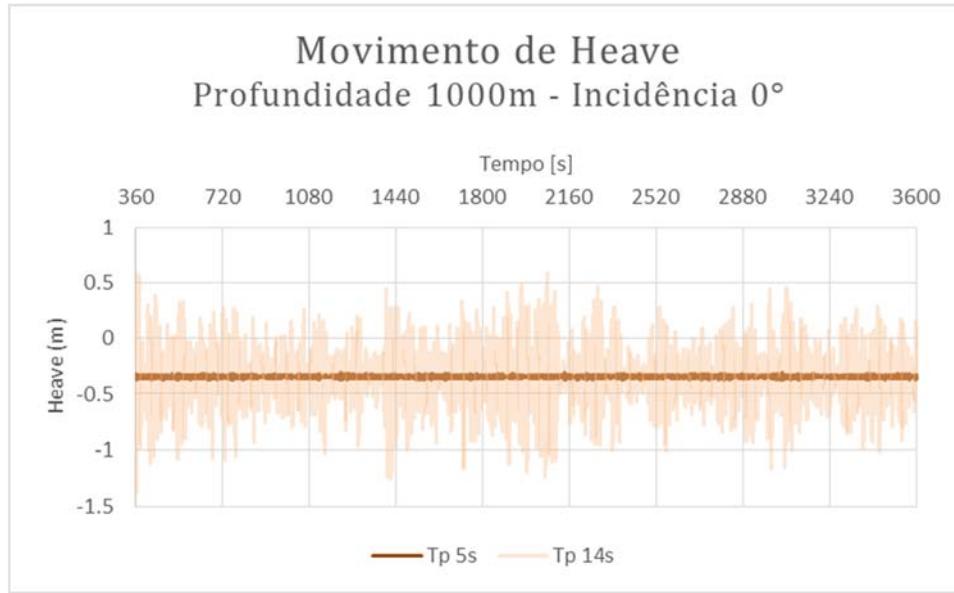


Figura A.10.1 – Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 1 com prof. de 1000 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s

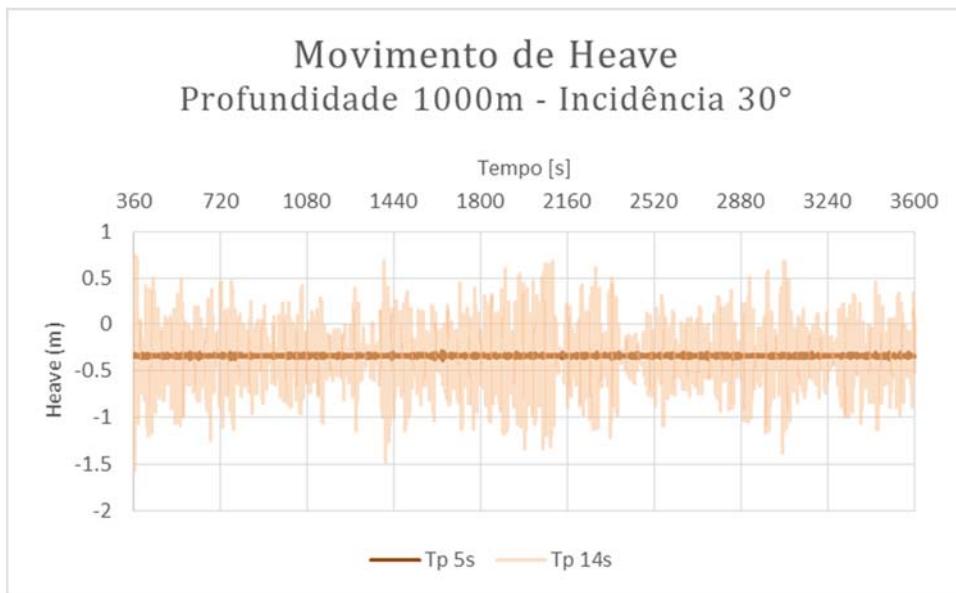


Figura A.10.2 - Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 1 com prof. de 1000 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s

A.1.2 Profundidade: 1500m

As Figuras A.10.3 e A.10.4 apresentam a série de movimento dos casos com Tp de 5 e 14 segundos para o conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 1500 metros e incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

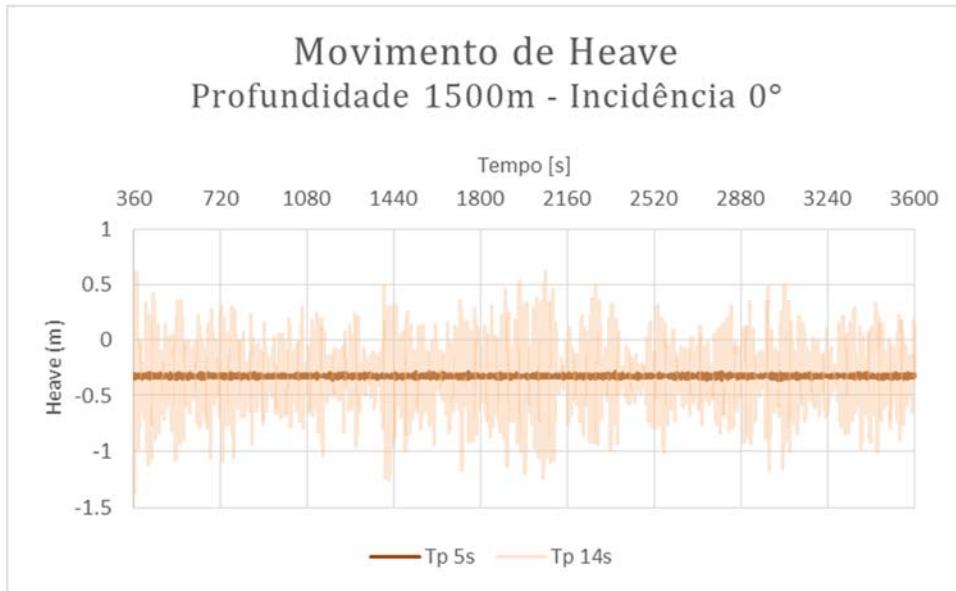


Figura A.10.3 – Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 1 com prof. de 1500 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s

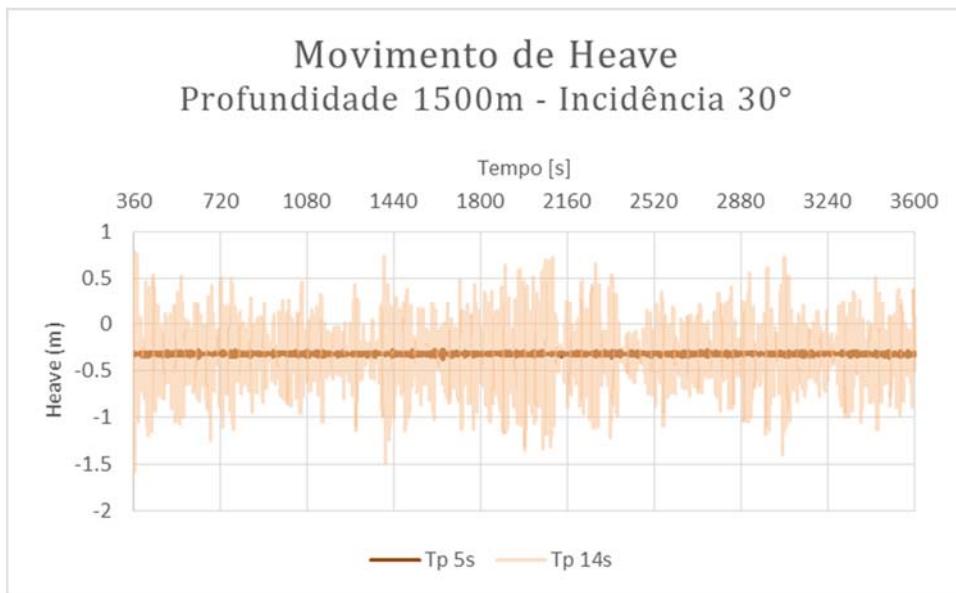


Figura A.10.4 - Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 1 com prof. de 1500 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s

A.1.3 Profundidade: 2000m

As Figuras A.10.5 e A.10.6 apresentam a série de movimento dos casos com Tp de 5 e 14 segundos para o conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2000 metros e incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

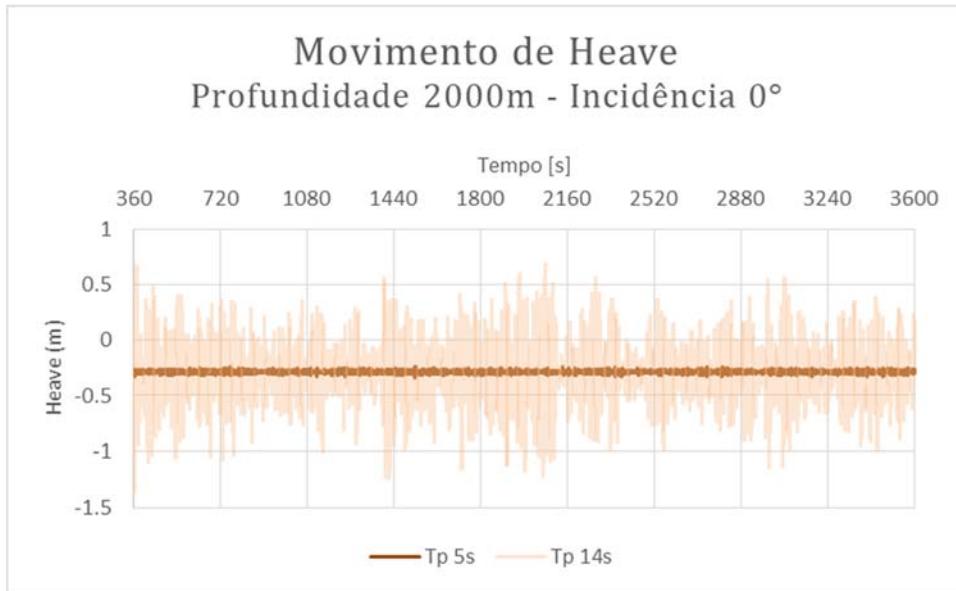


Figura A.10.5 – Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 1 com prof. de 2000 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s

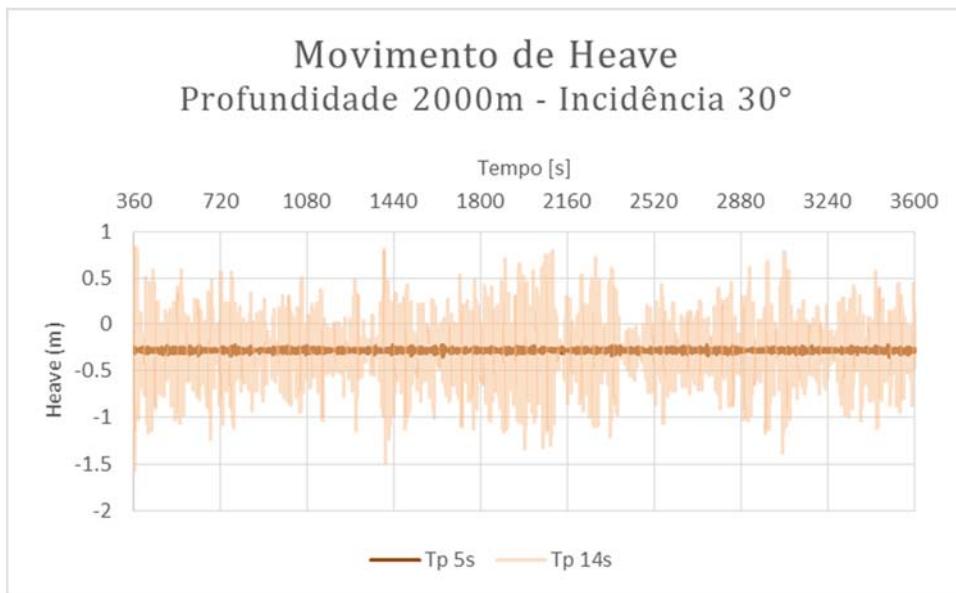


Figura A.10.6 - Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 1 com prof. de 2000 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s

A.1.4 Profundidade: 2500m

As Figuras A.10.7 e A.10.8 apresentam a série de movimento dos casos com Tp de 5 e 14 segundos para o conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 2500 metros e incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

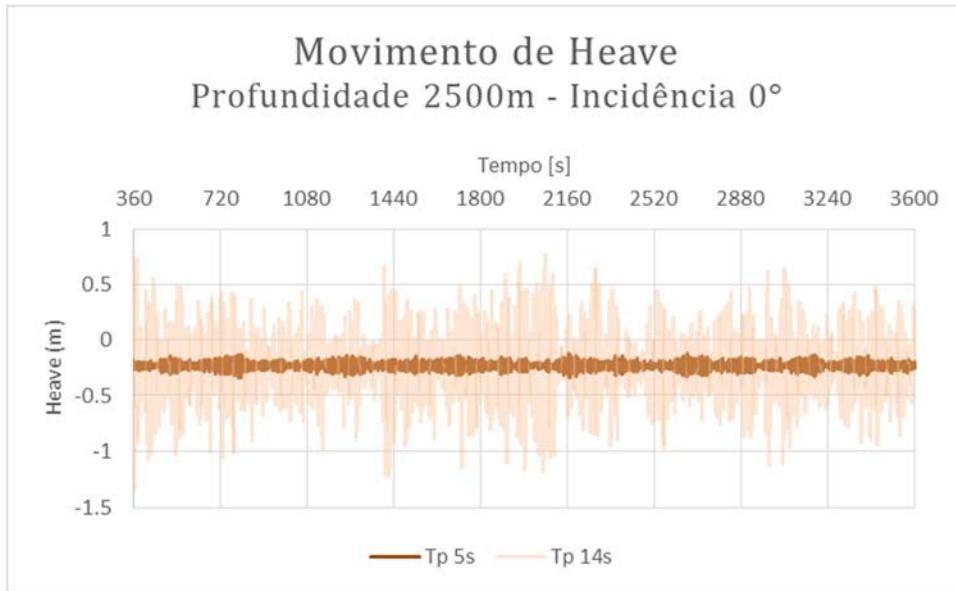


Figura A.10.7 – Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 1 com prof. de 2500 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s

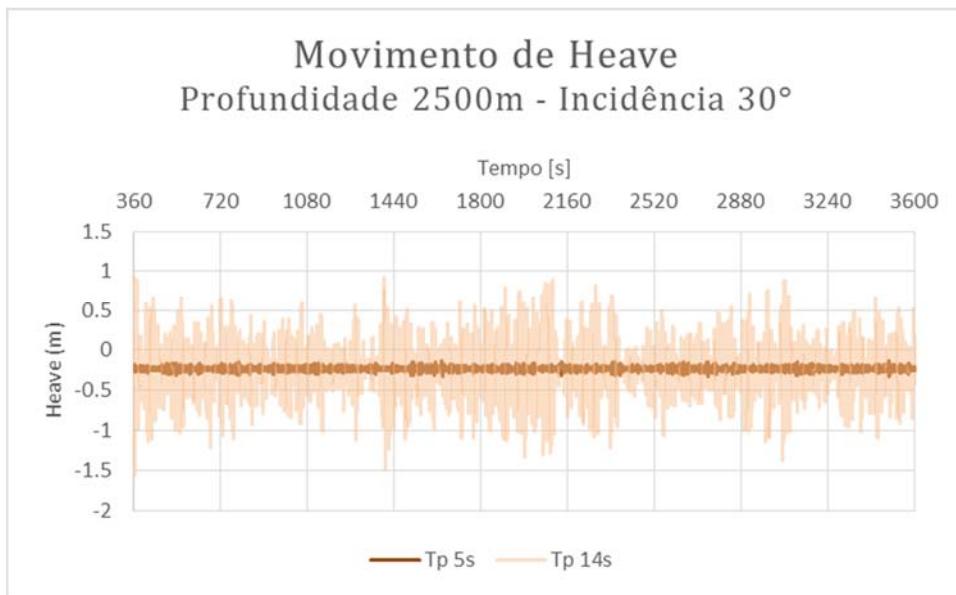


Figura A.10.8 - Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 1 com prof. de 2500 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s

A.1.5 Profundidade: 3000m

As Figuras A.10.9 e A.10.10 apresentam a série de movimento dos casos com Tp de 5 e 14 segundos para o conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3000 metros e incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

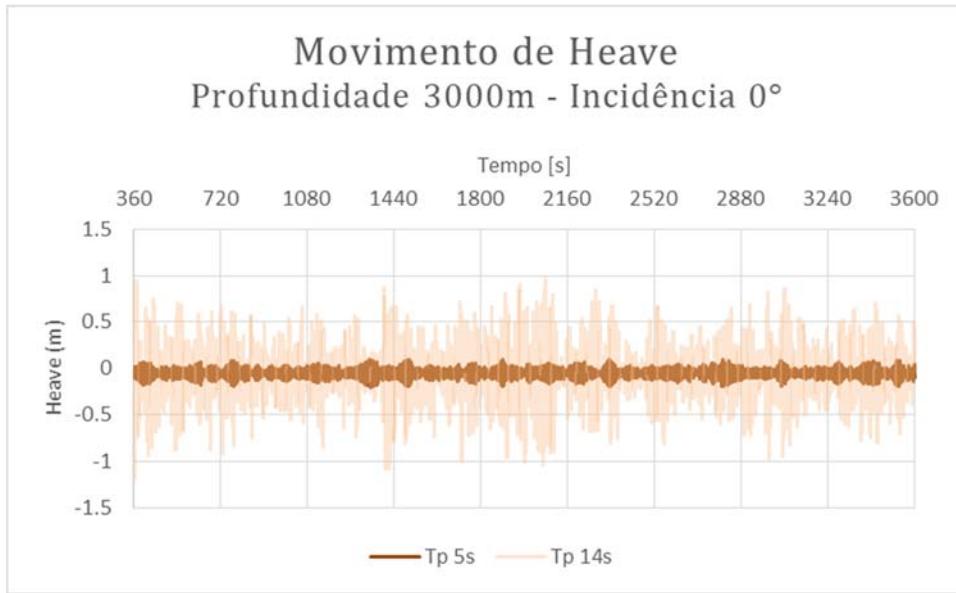


Figura A.10.9 – Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 1 com prof. de 3000 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s

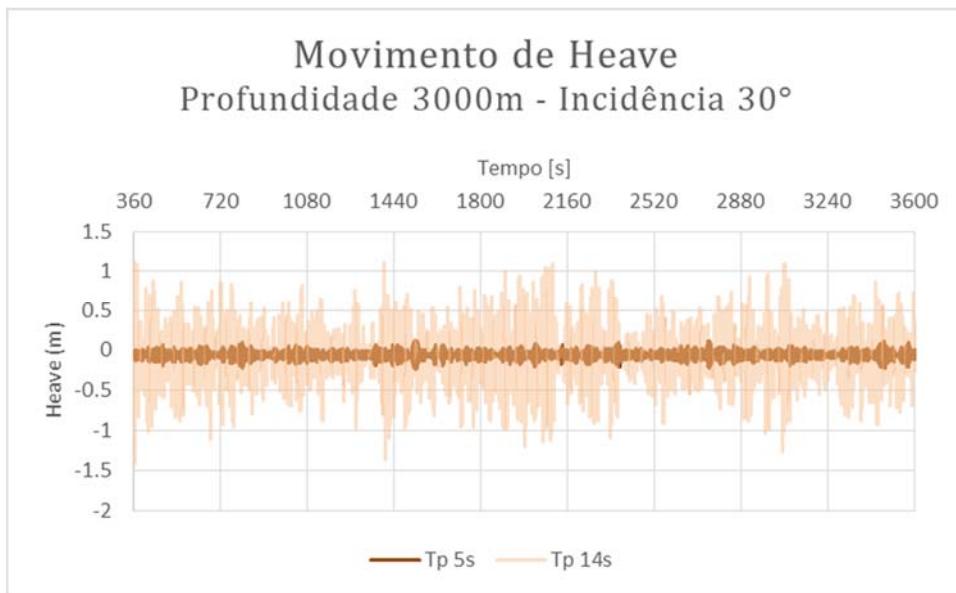


Figura A.10.10 - Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 1 com prof. de 3000 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s

A.1.6 Profundidade: 3500m

As Figuras A.10.11 e A.10.12 apresentam a série de movimento dos casos com Tp de 5 e 14 segundos para o conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 3500 metros e incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

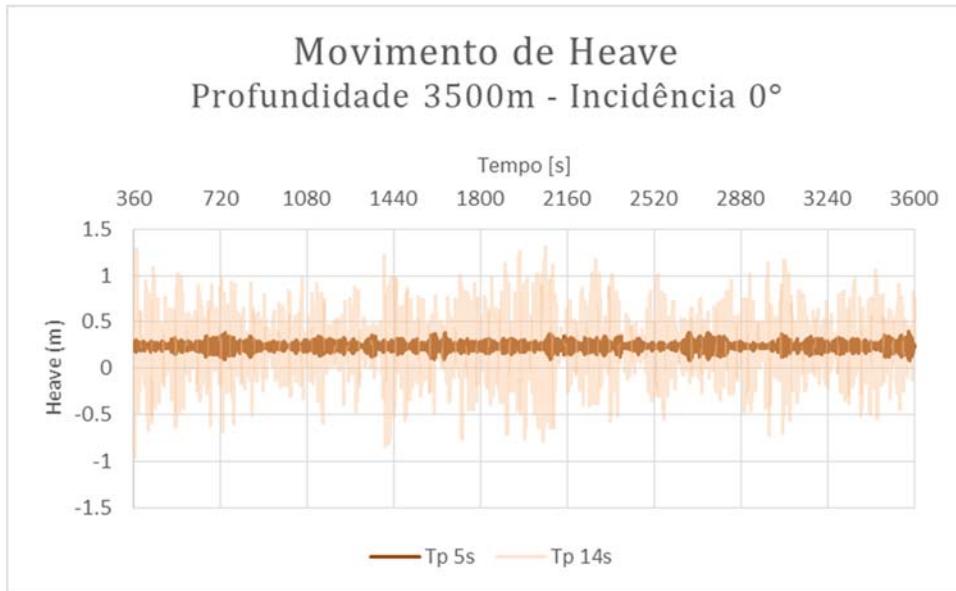


Figura A.10.11 – Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 1 com prof. de 3500 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s

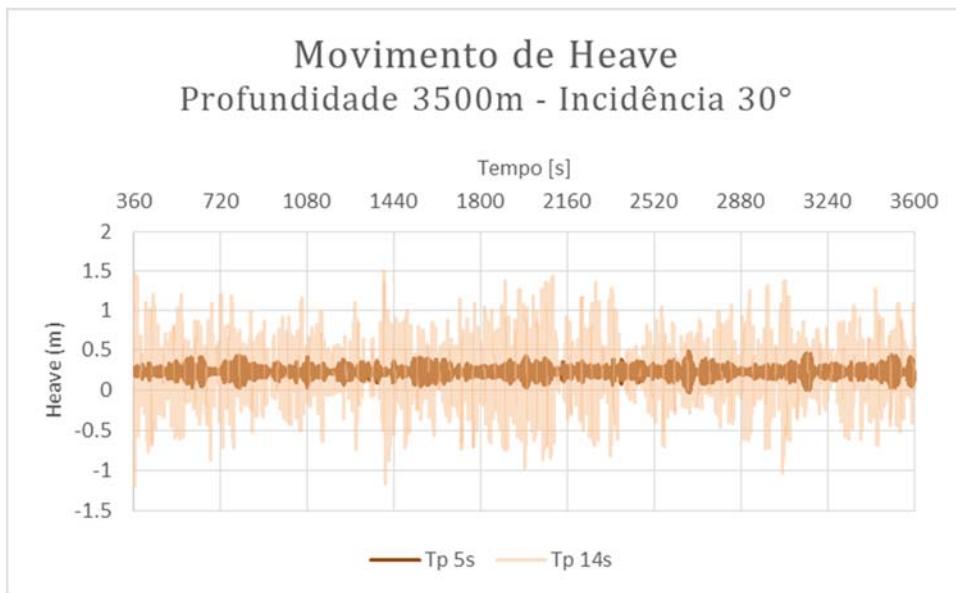


Figura A.10.12 - Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 1 com prof. de 3500 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s

A.1.7 Profundidade: 4000m

As Figuras A.10.13 e A.10.14 apresentam a série de movimento dos casos com Tp de 5 e 14 segundos para o conjunto de equipamentos 1, com profundidade de 4000 metros e incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

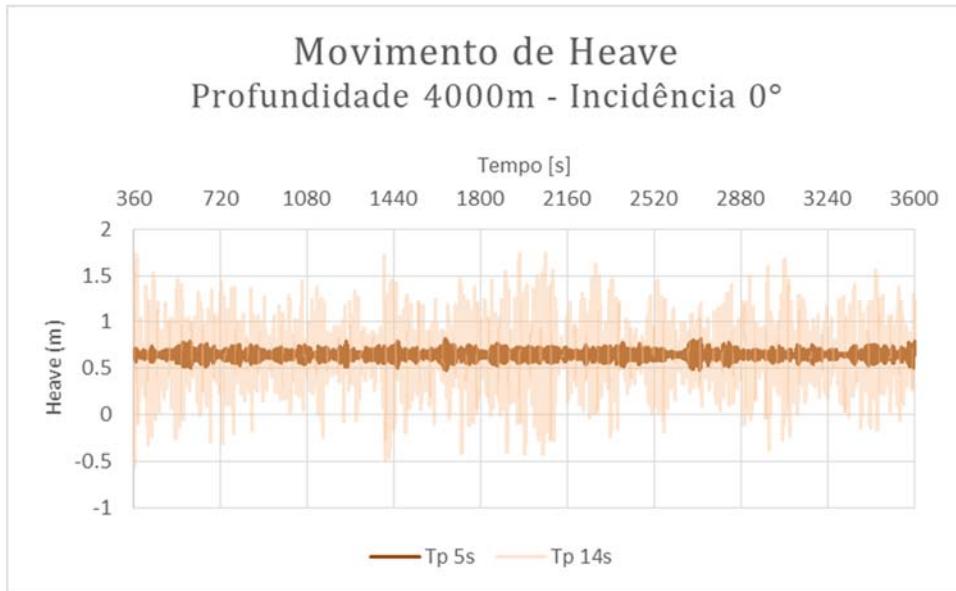


Figura A.10.13 – Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 1 com prof. de 4000 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s

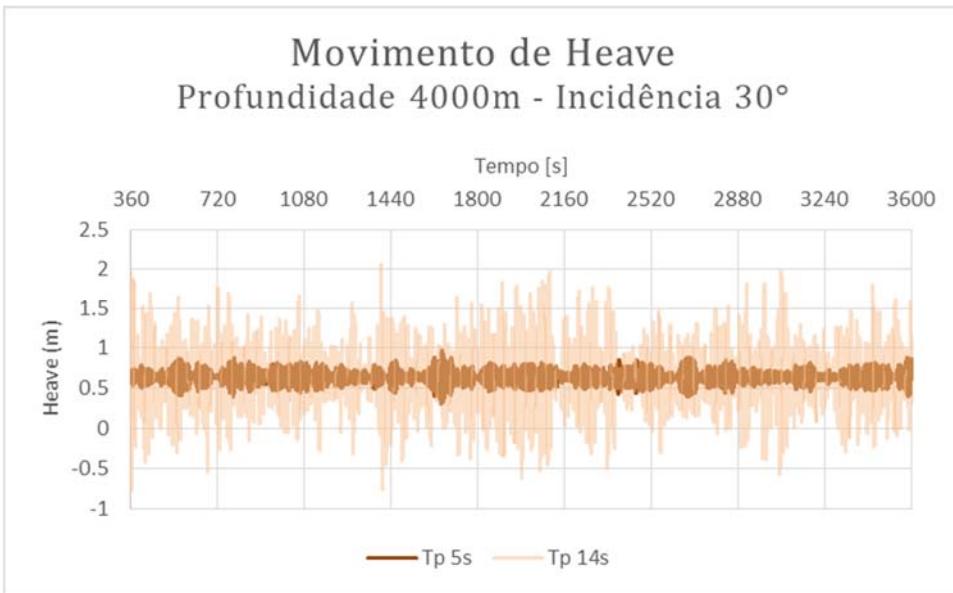


Figura A.10.14 - Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 1 com prof. de 4000 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s

A.2 Conjunto de Equipamentos 2

A.2.1 Profundidade: 1000m

As Figuras A.10.15 e A.10.16 apresentam a série de movimento dos casos com Tp de 5 e 14 segundos para o conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1000 metros e incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

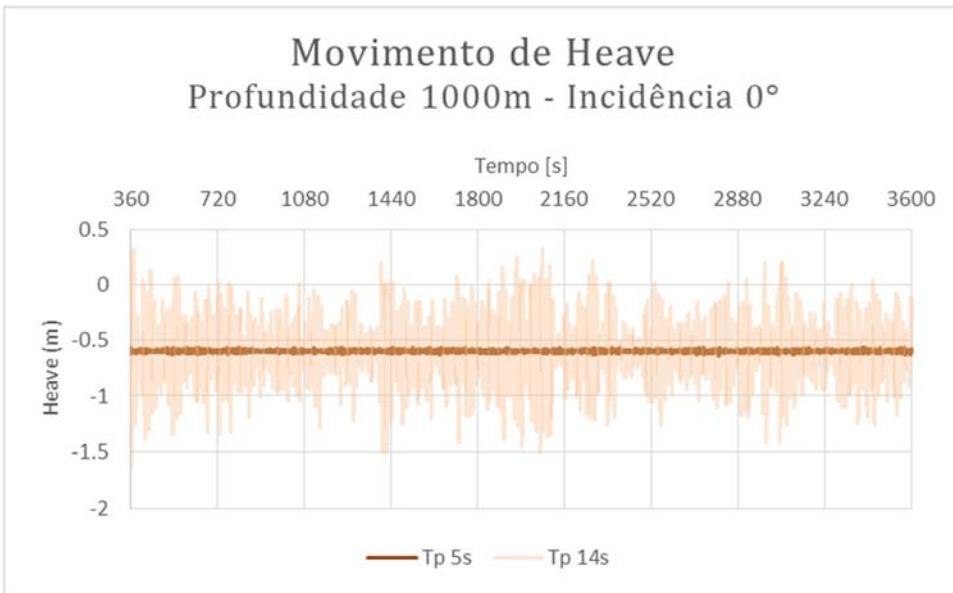


Figura A.10.15 – Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 2 com prof. de 1000 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s

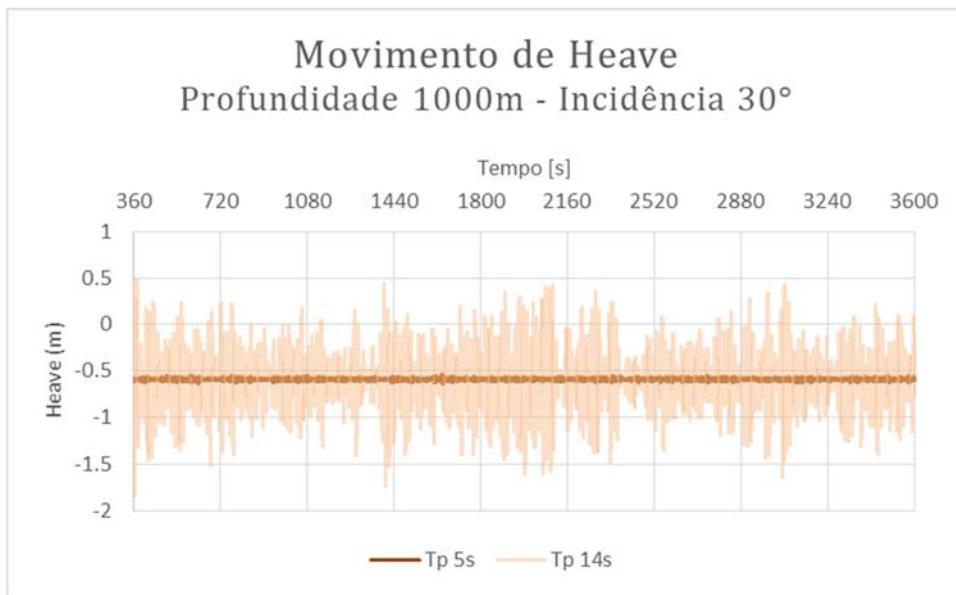


Figura A.10.16 - Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 2 com prof. de 1000 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s

A.2.2 Profundidade: 1500m

As Figuras A.10.17 e A.10.18 apresentam a série de movimento dos casos com Tp de 5 e 14 segundos para o conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 1500 metros e incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

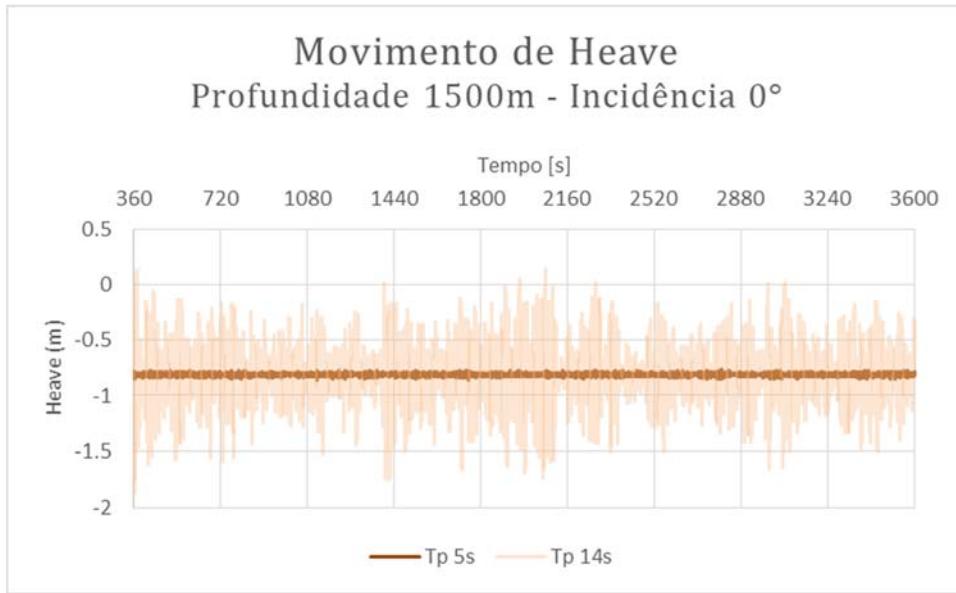


Figura A.10.17 – Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 2 com prof. de 1500 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s

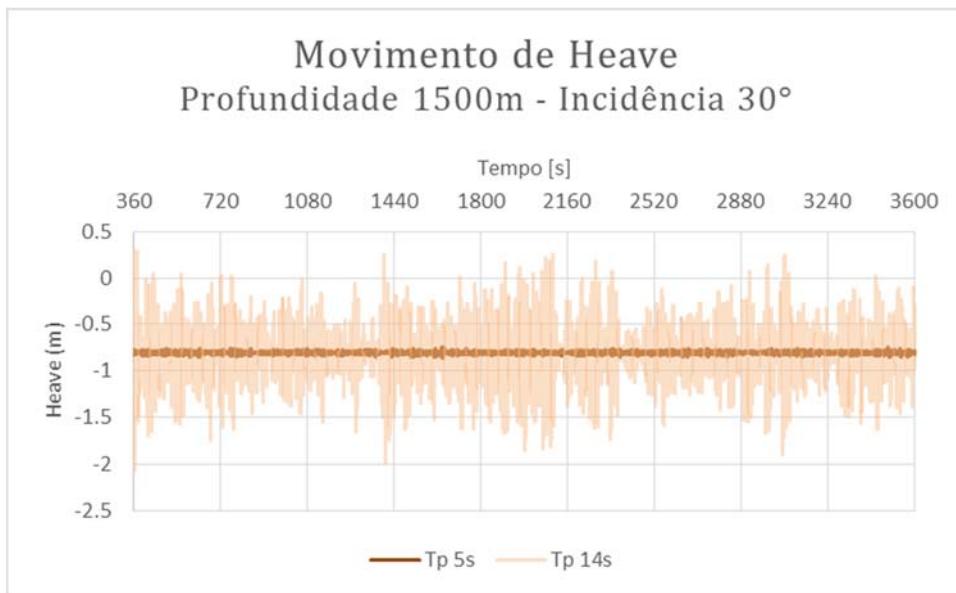


Figura A.10.18 - Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 2 com prof. de 1500 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s

A.2.3 Profundidade: 2000m

As Figuras A.10.19 e A.10.20 apresentam a série de movimento dos casos com Tp de 5 e 14 segundos para o conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2000 metros e incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

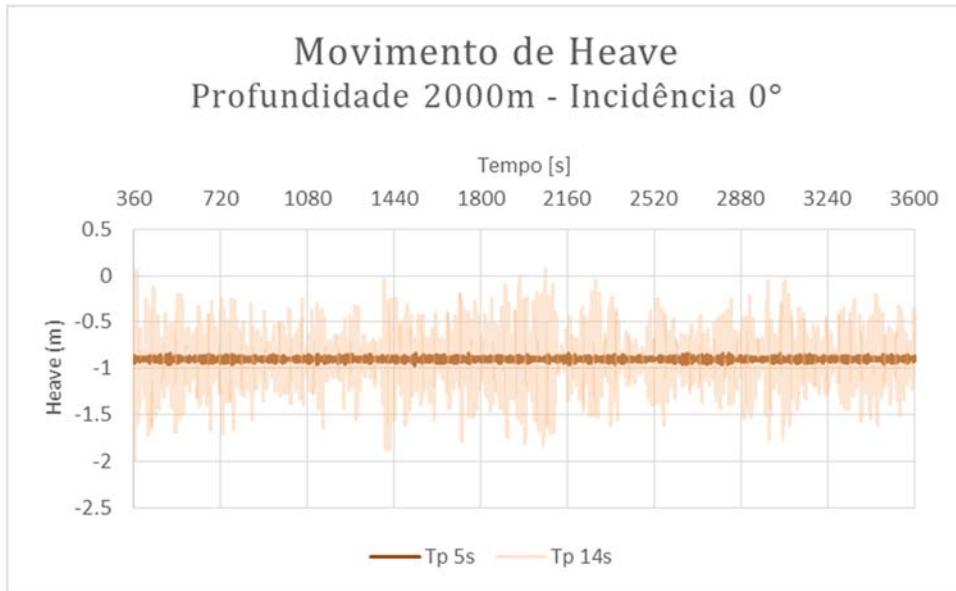


Figura A.10.19 – Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 2 com prof. de 2000 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s

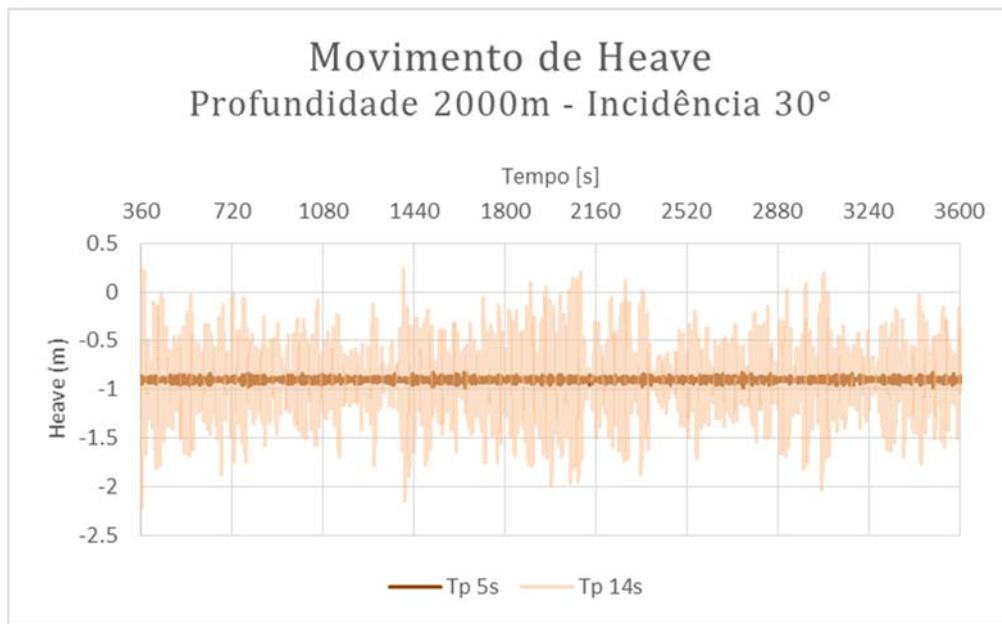


Figura A.10.20 - Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 2 com prof. de 2000 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s

A.2.4 Profundidade: 2500m

As Figuras A.10.21 e A.10.22 apresentam a série de movimento dos casos com Tp de 5 e 14 segundos para o conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 2500 metros e incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

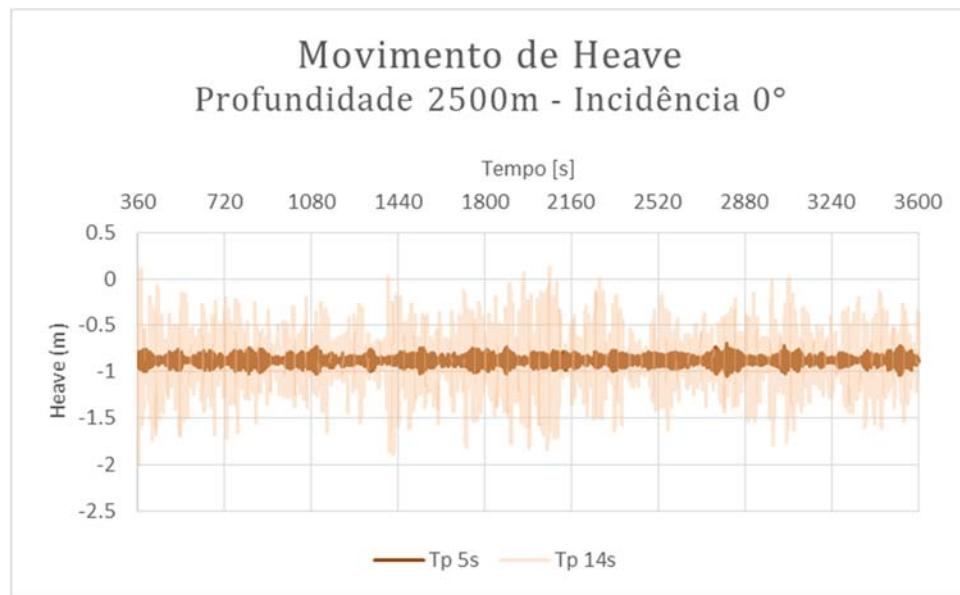


Figura A.10.21 – Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 2 com prof. de 2500 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s

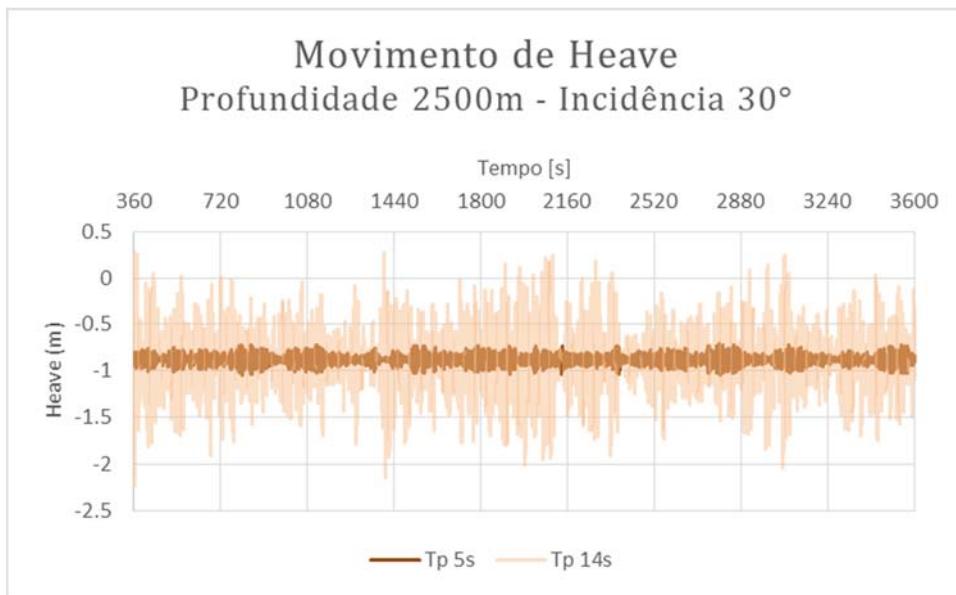


Figura A.10.22 - Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 2 com prof. de 2500 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s

A.2.5 Profundidade: 3000m

As Figuras A.10.23 e A.10.24 apresentam a série de movimento dos casos com Tp de 5 e 14 segundos para o conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3000 metros e incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

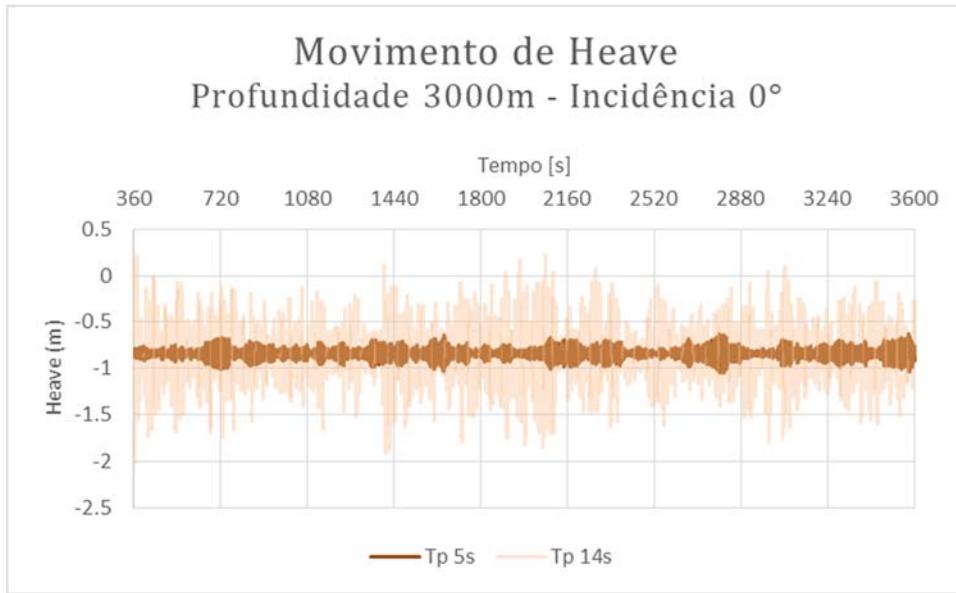


Figura A.10.23 – Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 2 com prof. de 3000 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s

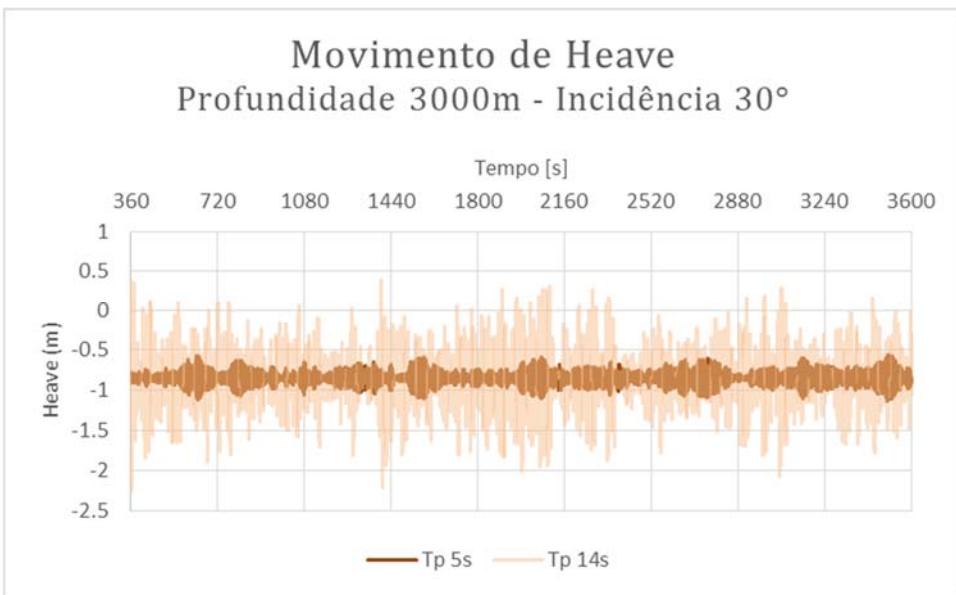


Figura A.10.24 - Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 2 com prof. de 3000 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s

A.2.6 Profundidade: 3500m

As Figuras A.10.25 e A.10.26 apresentam a série de movimento dos casos com Tp de 5 e 14 segundos para o conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 3500 metros e incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

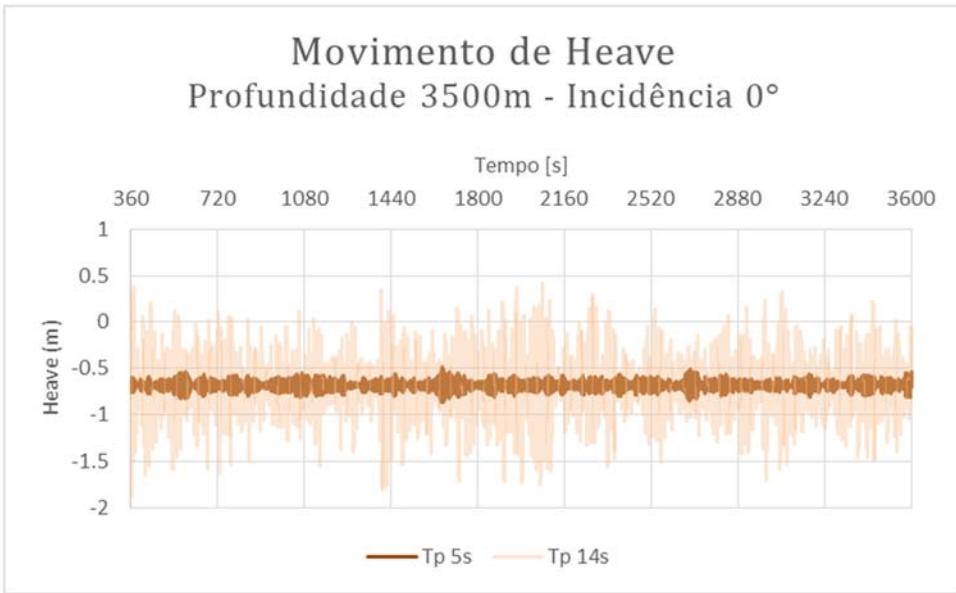


Figura A.10.25 – Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 2 com prof. de 3500 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s

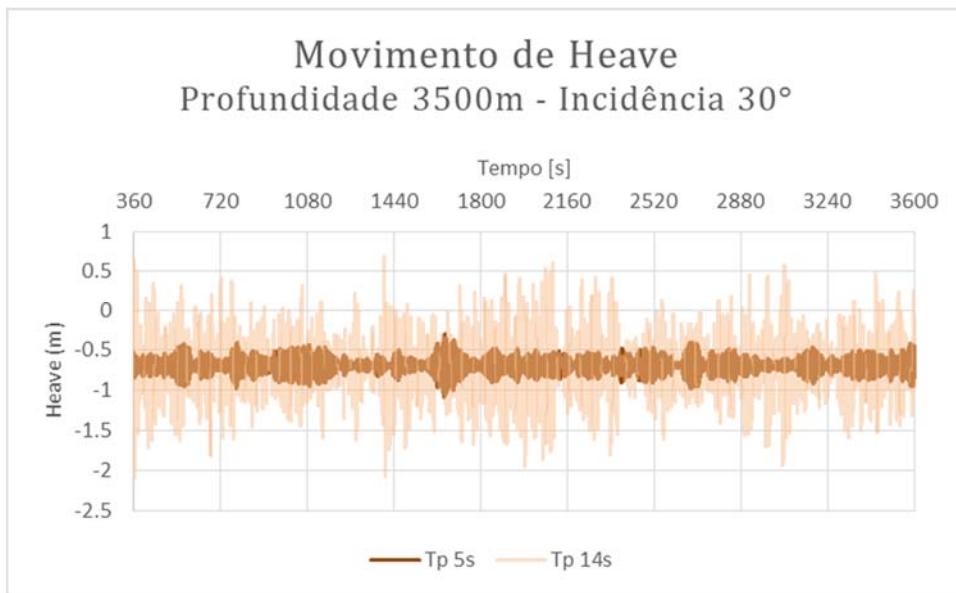


Figura A.10.26 - Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 2 com prof. de 3500 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s

A.2.7 Profundidade: 4000m

As Figuras A.10.27 e A.10.28 apresentam a série de movimento dos casos com Tp de 5 e 14 segundos para o conjunto de equipamentos 2, com profundidade de 4000 metros e incidência de onda de 0° e 30° respectivamente.

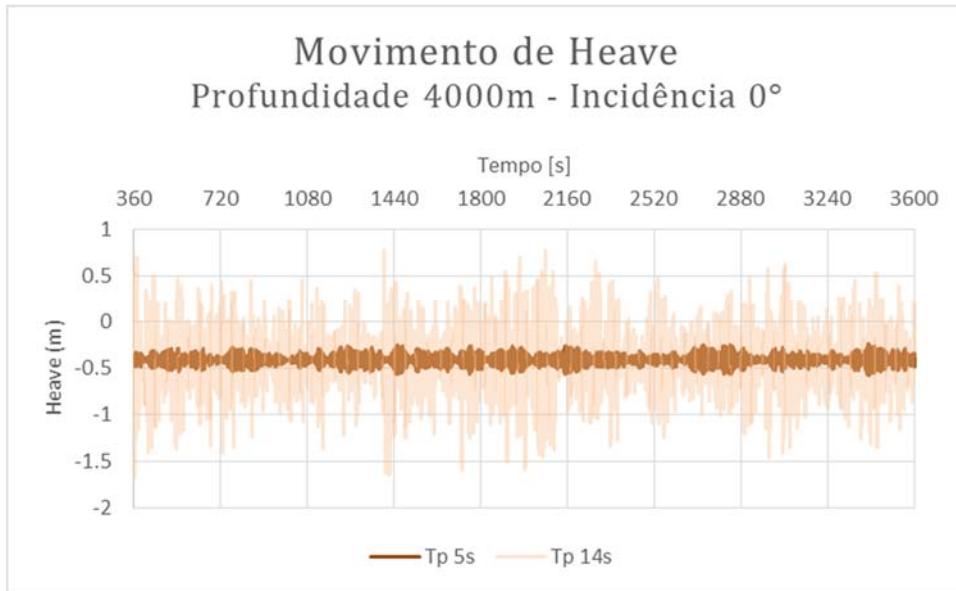


Figura A.10.27 – Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 2 com prof. de 4000 m, incidência de 0° e Tp 5 e 14s

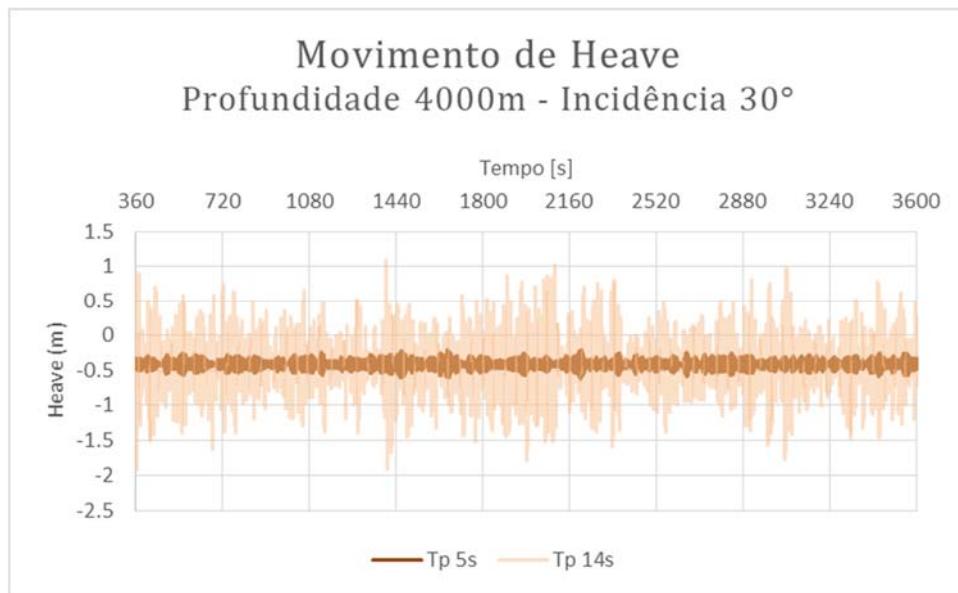


Figura A.10.28 - Série de movimentos em *heave* dos modelos do conjunto 2 com prof. de 4000 m, incidência de 30° e Tp 5 e 14s

APÊNDICE B AMPLITUDES DE *HEAVE* POR PROFUNDIDADE

B.1 Conjunto de Equipamentos 1

As Figuras B.10.29 e B.10.30 apresentam a amplitude de *heave* dos equipamentos do conjunto 1 em função do período de onda para todas as profundidades estudadas no processo de instalação do BOP/LMRP. O objetivo dos gráficos é acompanhar a variação da amplitude de movimentação ao longo da descida dos equipamentos.

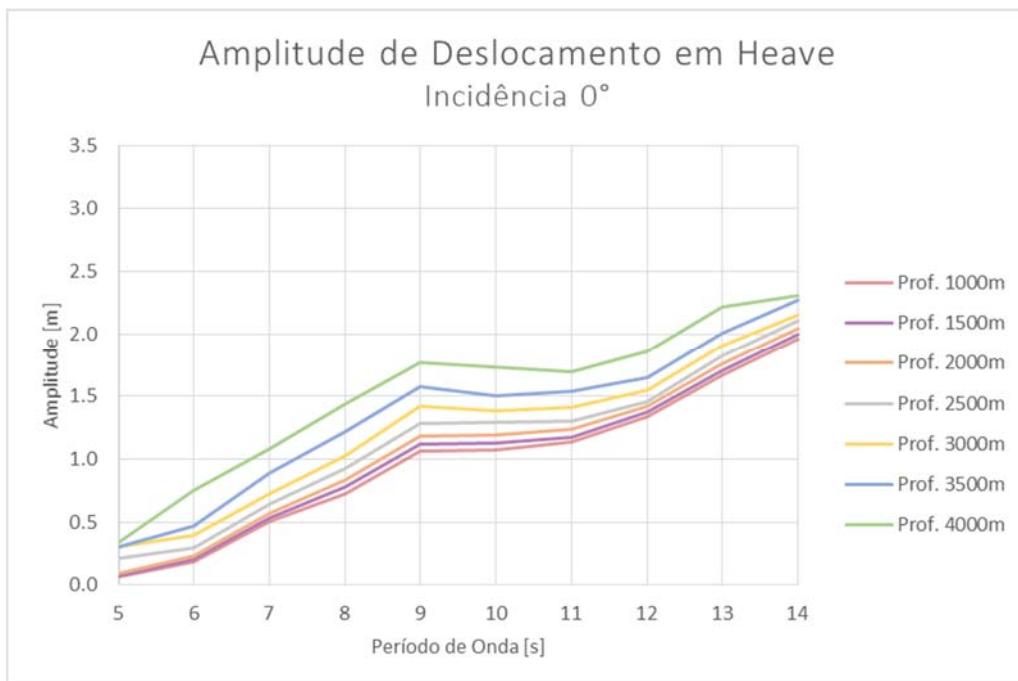


Figura B.10.29 – Amplitude de deslocamento em *heave* do conjunto de equipamentos 1, para todas as profundidades estudadas, com incidência de onda de 0°

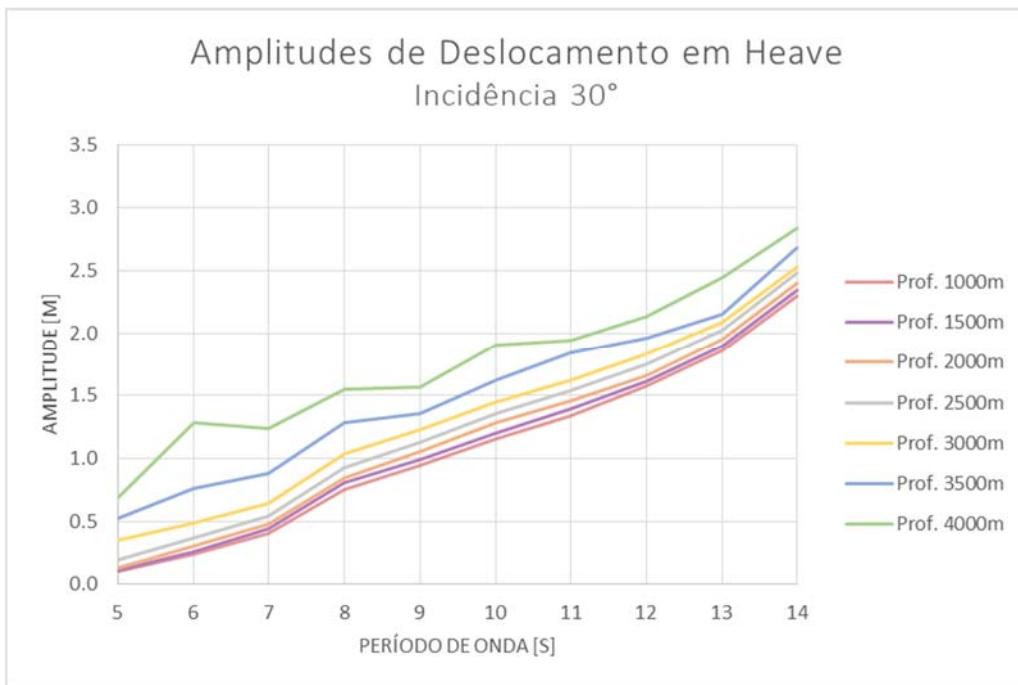


Figura B.10.30 –Amplitude de deslocamento em *heave* do conjunto de equipamentos 1, para todas as profundidades estudadas, com incidência de onda de 30°

B.2 Conjunto de Equipamentos 2

As Figuras B.10.31 e B.10.32 apresentam a amplitude de *heave* dos equipamentos do conjunto 2 em função do período de onda para todas as profundidades estudadas no processo de instalação do BOP/LMRP. O objetivo dos gráficos é acompanhar a variação da amplitude de movimentação ao longo da descida dos equipamentos.

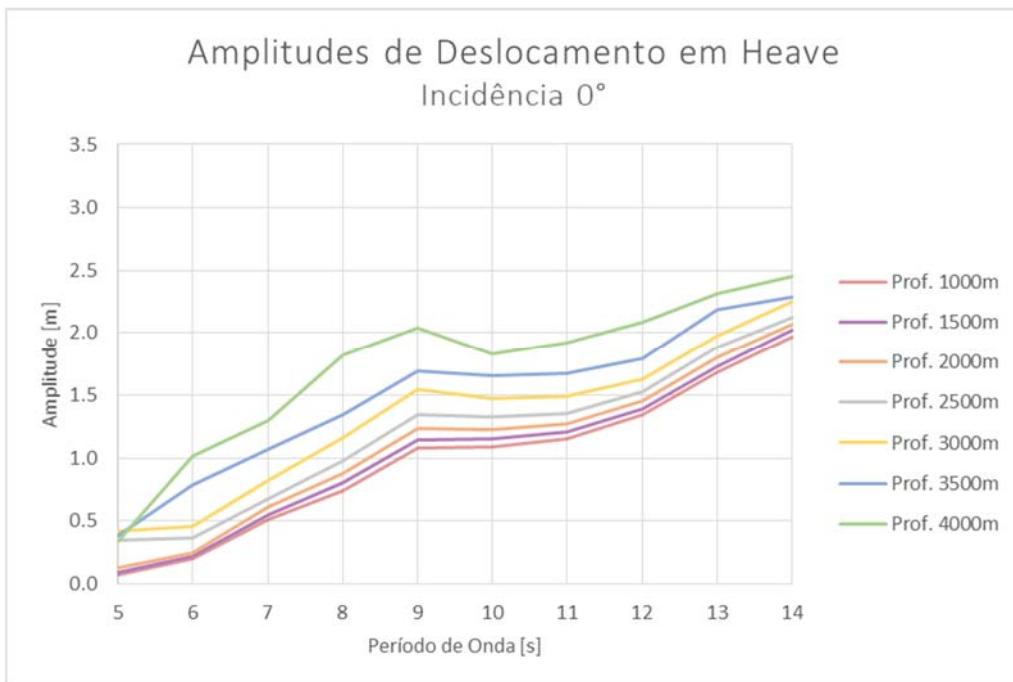


Figura B.10.31 –Amplitude de deslocamento em *heave* do conjunto de equipamentos 2, para todas as profundidades estudadas, com incidência de onda de 0°

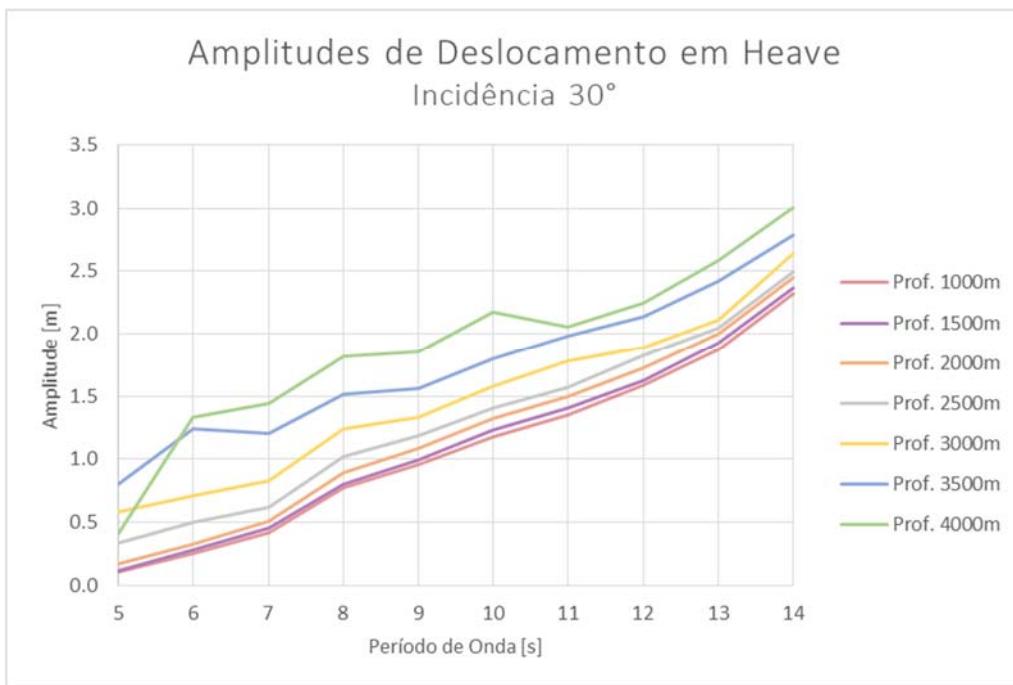


Figura B.10.32 – Amplitude de deslocamento em *heave* do conjunto de equipamentos 2, para todas as profundidades estudadas, com incidência de onda de 30°

APÊNDICE C ENVOLTÓRIAS DE MOMENTOS FLETORES

As sessões deste apêndice tem como objetivo apresentar os gráficos de envoltória de momento fletor que ocorrem ao longo do riser durante os processos de transporte com 1000 e 1500 metros de profundidade respectivamente. Cada gráfico apresenta quatro curvas de envoltória, sendo elas: envoltória máxima e mínima para operação com velocidade de 1.0 m/s e envoltória máxima e mínima para operação com velocidade de 1.5 m/s.

C.1 Profundidade 1000m

As Figuras C.10.33, C.10.34, C.10.35, C.10.36, C.10.37 e C.10.38 apresentam os gráficos de envoltória para as seguintes situações de estudo respectivamente: Hs de 2 metros e Tp de 7 segundos; Hs de 2 metros e Tp de 9 segundos; Hs de 2 metros e Tp de 11 segundos; Hs de 3 metros e Tp de 7 segundos; Hs de 3 metros e Tp de 9 segundos; e Hs de 3 metros e Tp de 11 segundos. Todos para a operação de transporte com profundidade de 1000 metros.

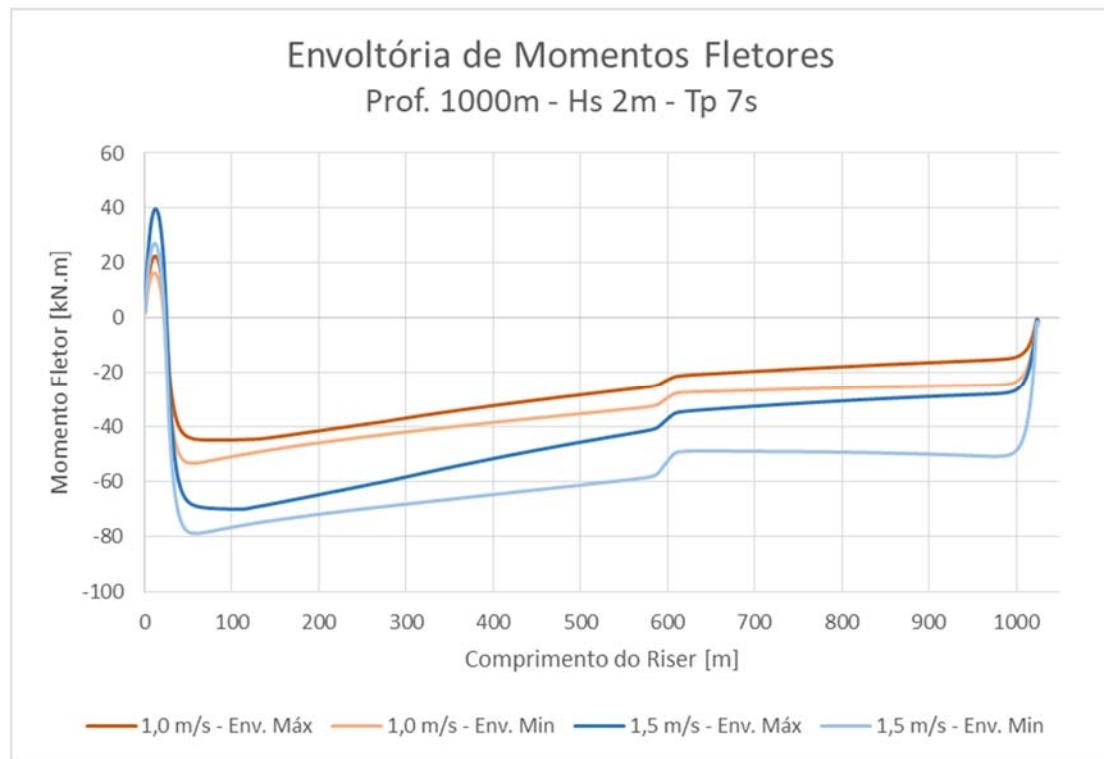


Figura C.10.33 – Envoltória de momentos fletores no *riser* com profundidade de 1000m, Hs 2m e Tp 7s

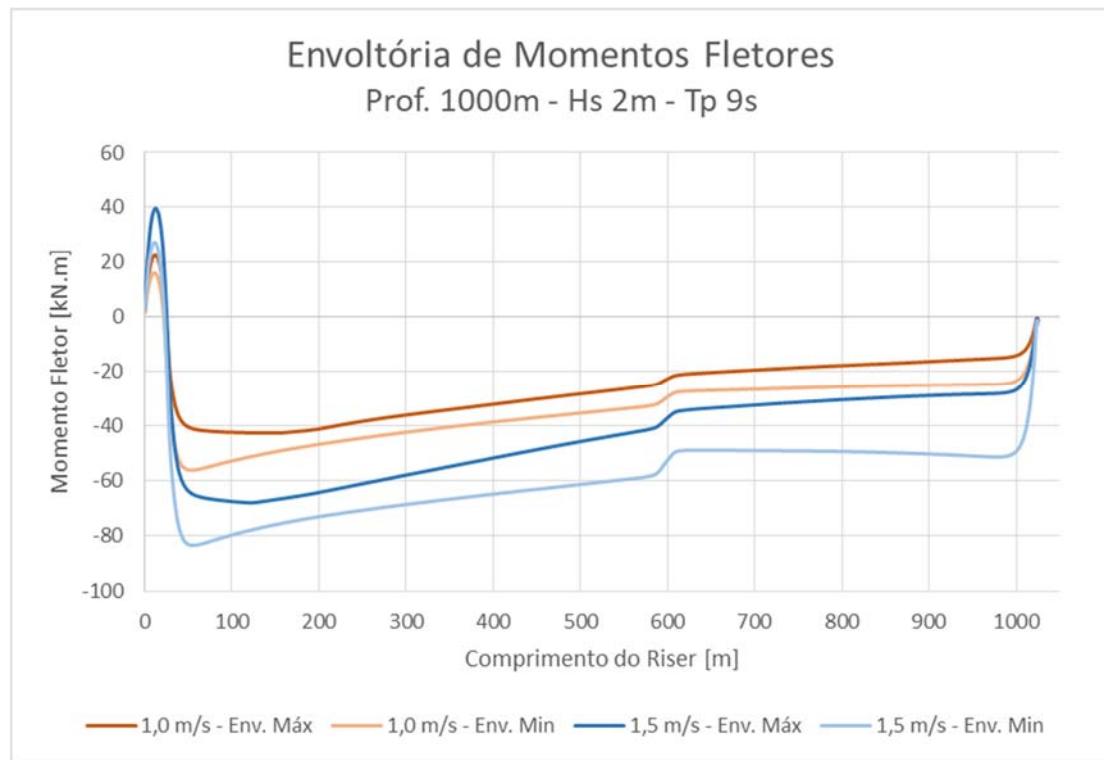


Figura C.10.34 – Envoltória de momentos fletores no *riser* com profundidade de 1000m, Hs 2m e Tp 9s

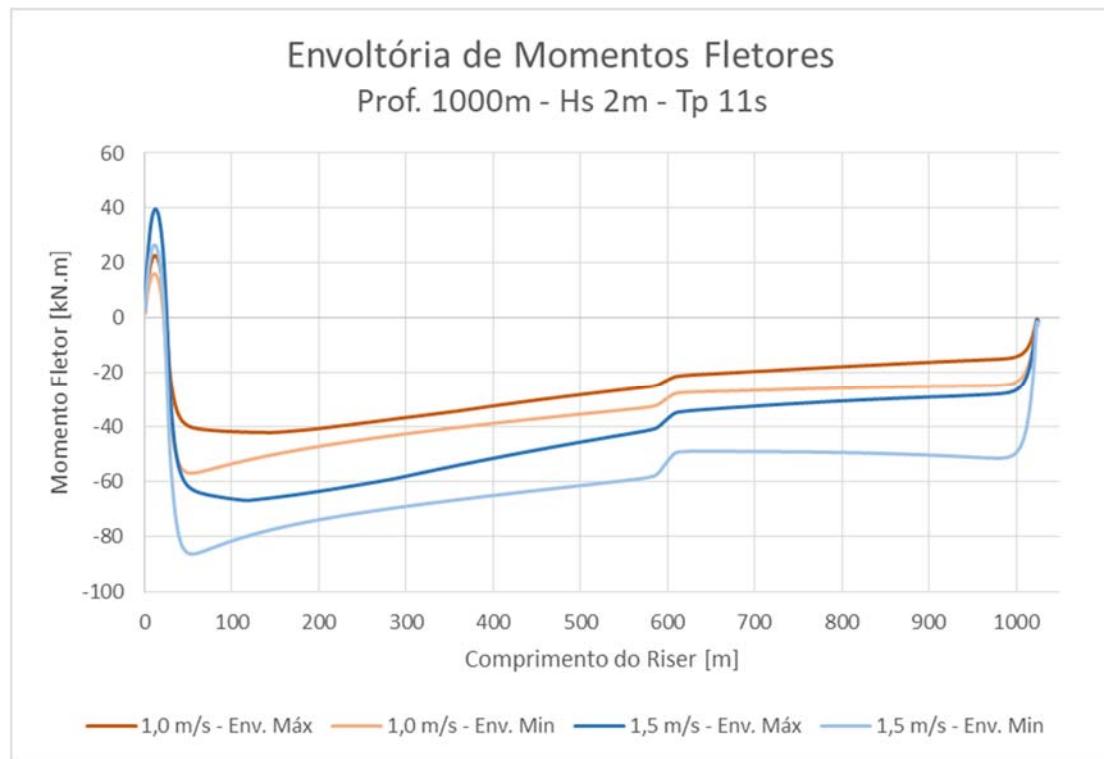


Figura C.10.35 – Envoltória de momentos fletores no *riser* com profundidade de 1000m, Hs 2m e Tp 11s

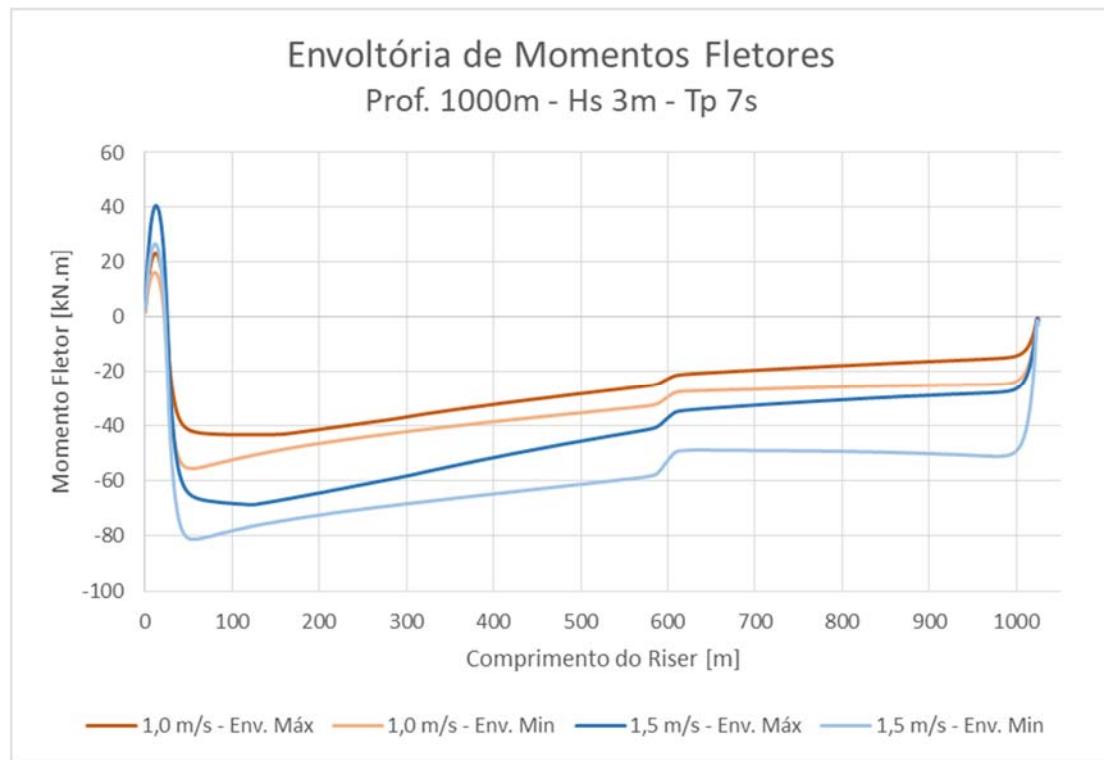


Figura C.10.36 – Envoltória de momentos fletores no *riser* com profundidade de 1000m, Hs 3m e Tp 7s

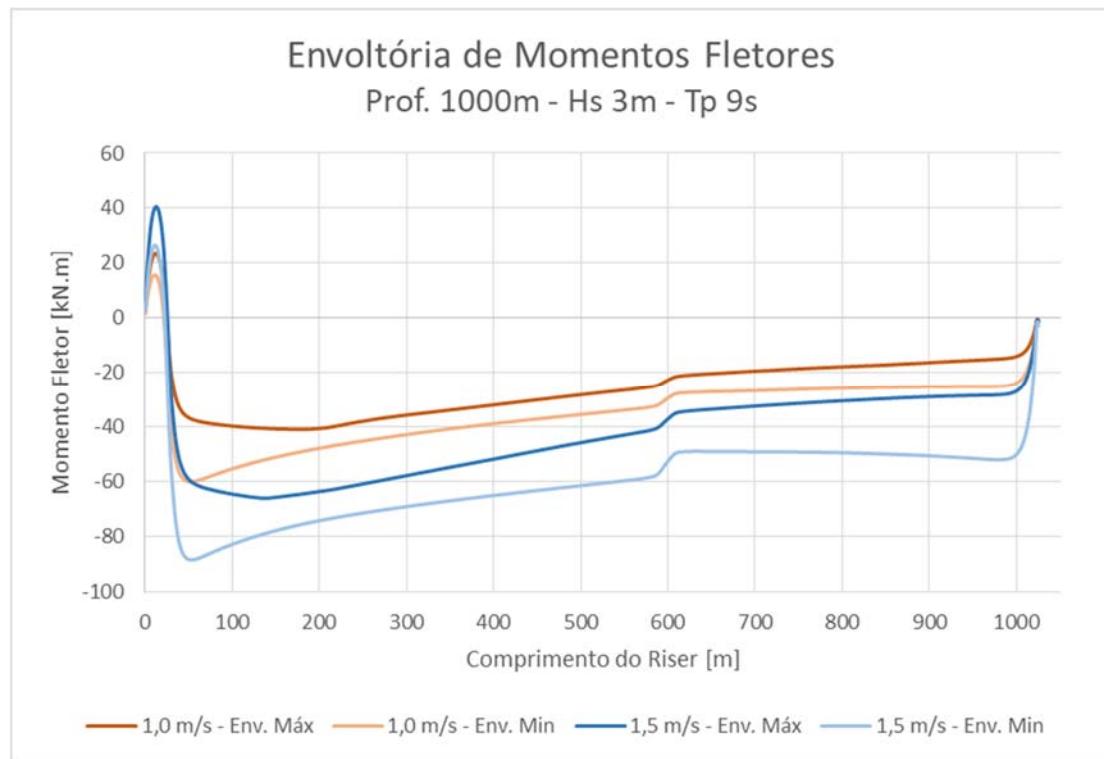


Figura C.10.37 – Envoltória de momentos fletores no *riser* com profundidade de 1000m, Hs 3m e Tp 9s

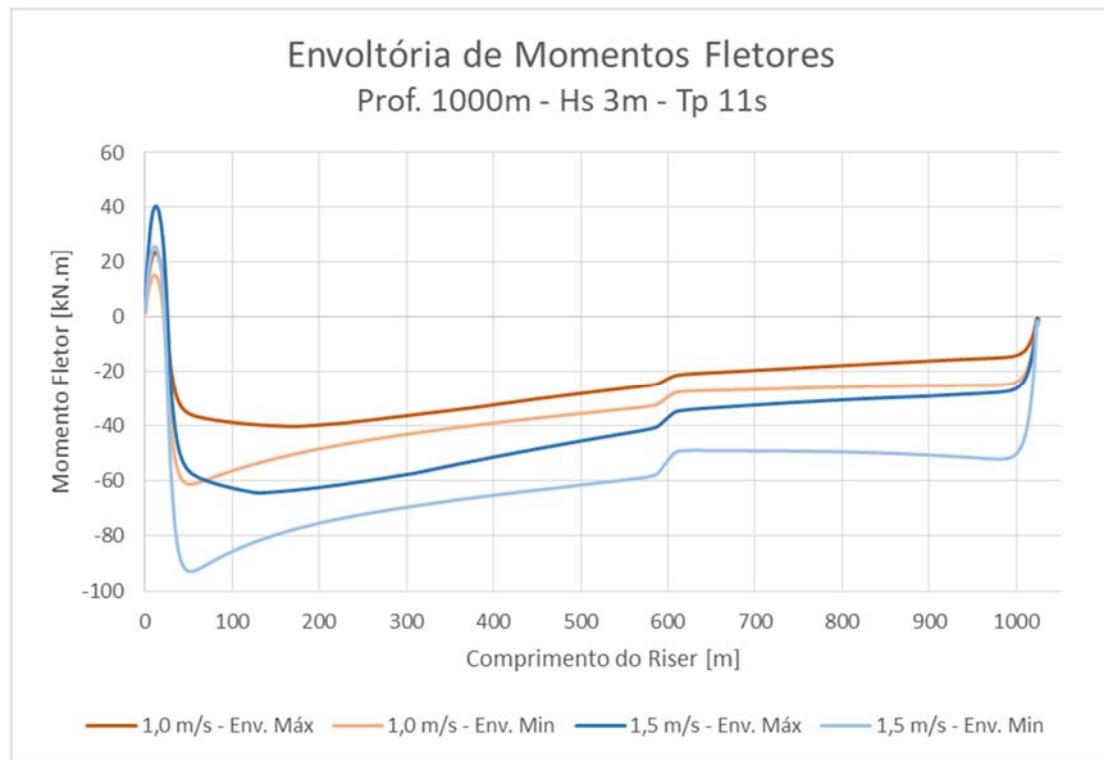


Figura C.10.38 – Envoltória de momentos fletores no *riser* com profundidade de 1000m, Hs 3m e Tp 11s

C.2 Profundidade 1500m

As Figuras C.10.39, C.10.40, C.10.41, C.10.42, C.10.43 e C.10.44 apresentam os gráficos de envoltória para as seguintes situações de estudo respectivamente: Hs de 2 metros e Tp de 7 segundos; Hs de 2 metros e Tp de 9 segundos; Hs de 2 metros e Tp de 11 segundos; Hs de 3 metros e Tp de 7 segundos; Hs de 3 metros e Tp de 9 segundos; e Hs de 3 metros e Tp de 11 segundos. Todos para a operação de transporte com profundidade de 1500 metros.

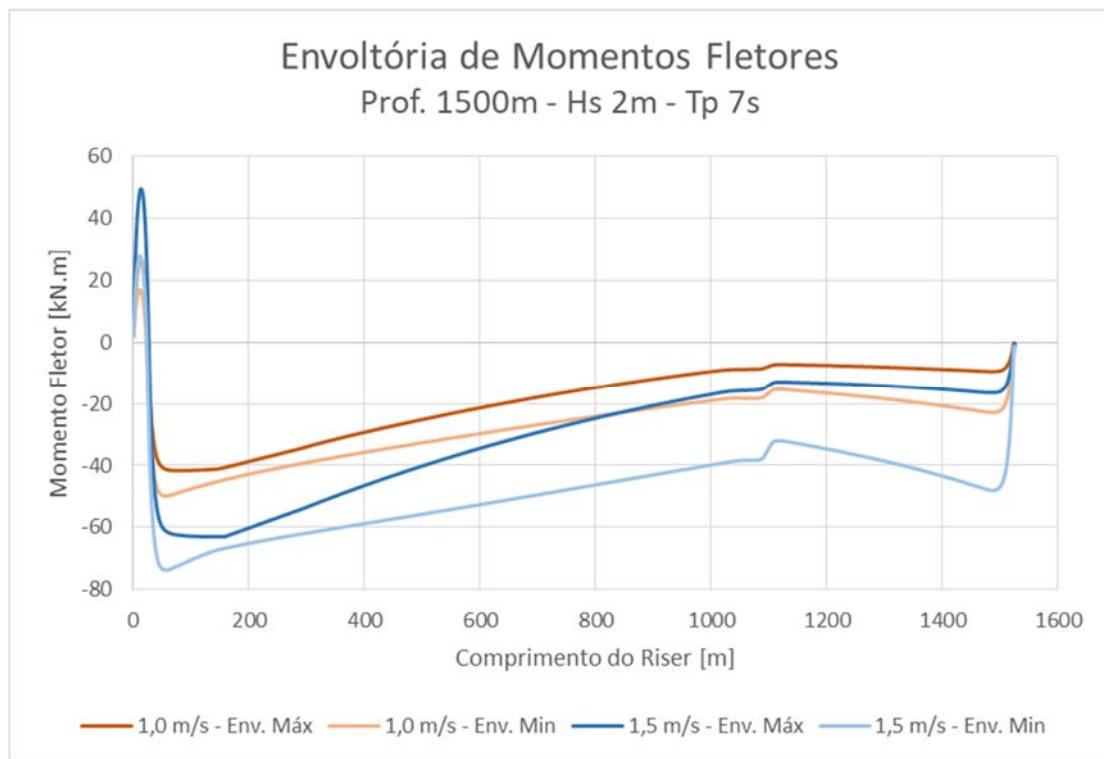


Figura C.10.39 – Envoltória de momentos fletores no *riser* com profundidade de 1500m, Hs 2m e Tp 7s

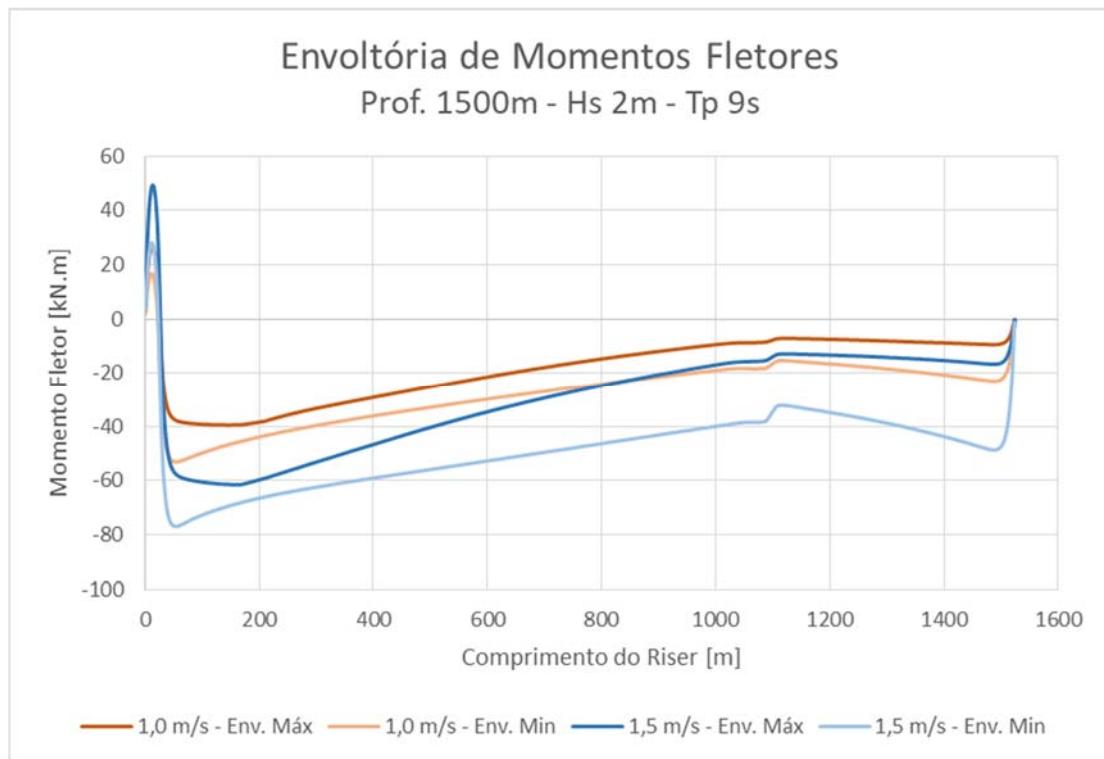


Figura C.10.40 – Envoltória de momentos fletores no *riser* com profundidade de 1500m, Hs 2m e Tp 9s

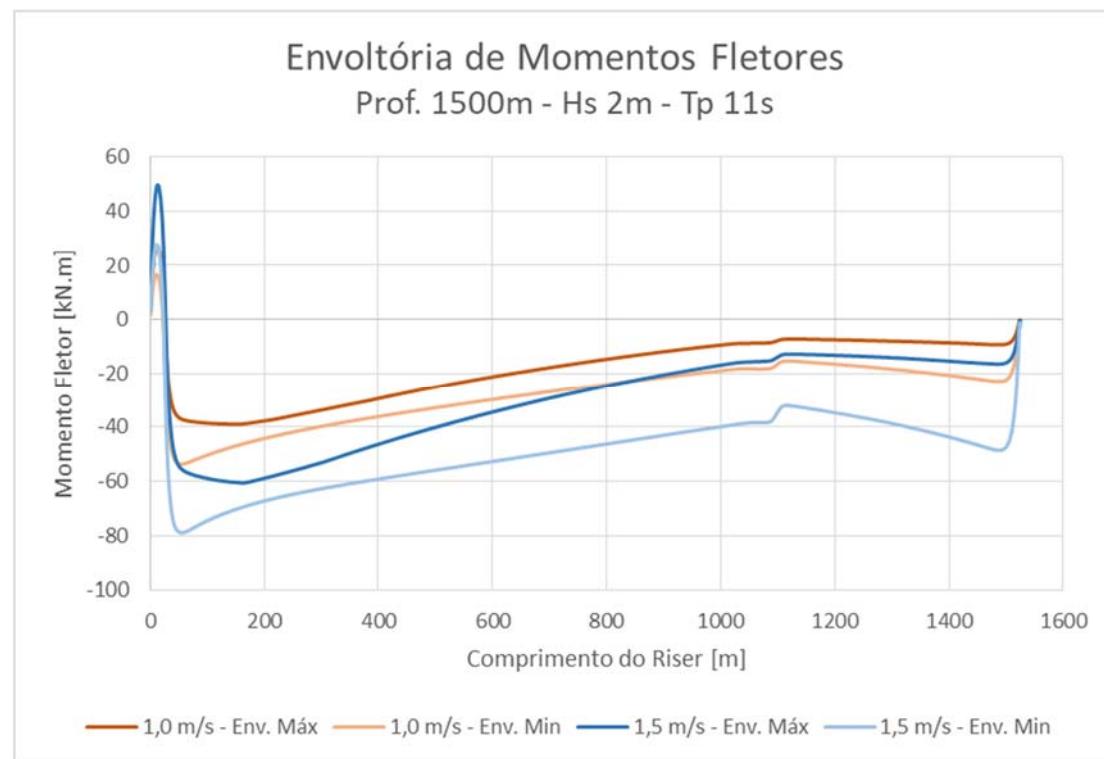


Figura C.10.41 – Envoltória de momentos fletores no *riser* com profundidade de 1500m, Hs 2m e Tp 11s

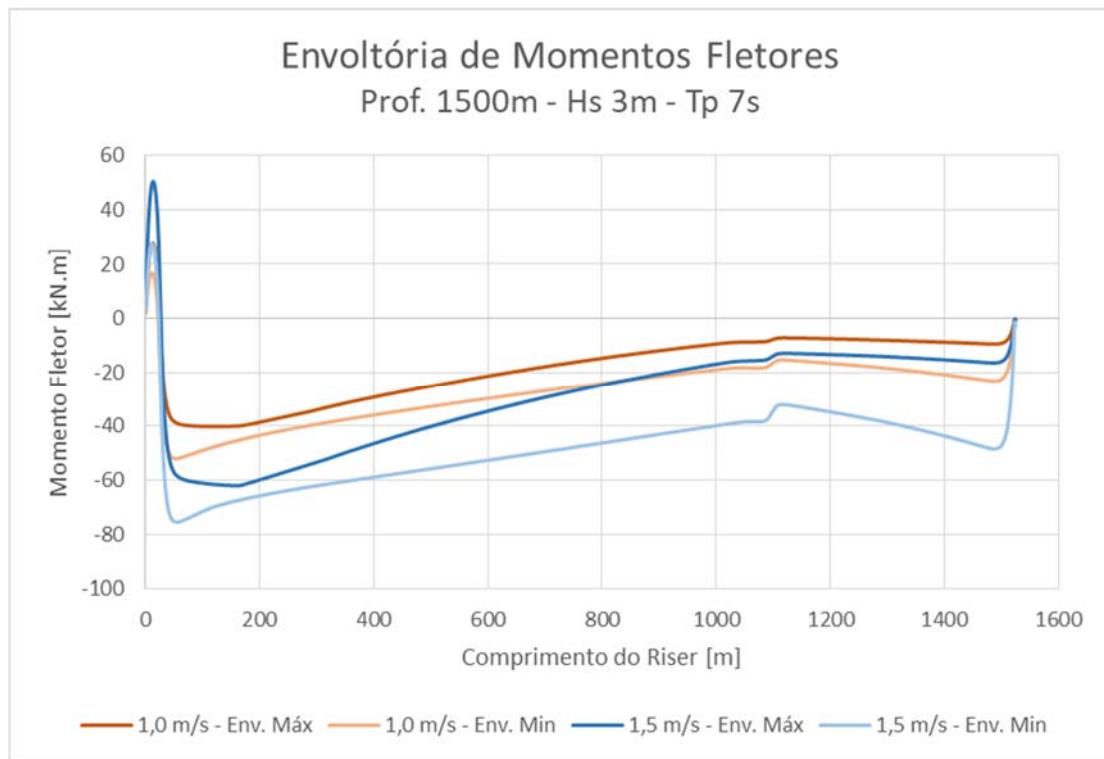


Figura C.10.42 – Envoltória de momentos fletores no *riser* com profundidade de 1500m, Hs 3m e Tp 7s

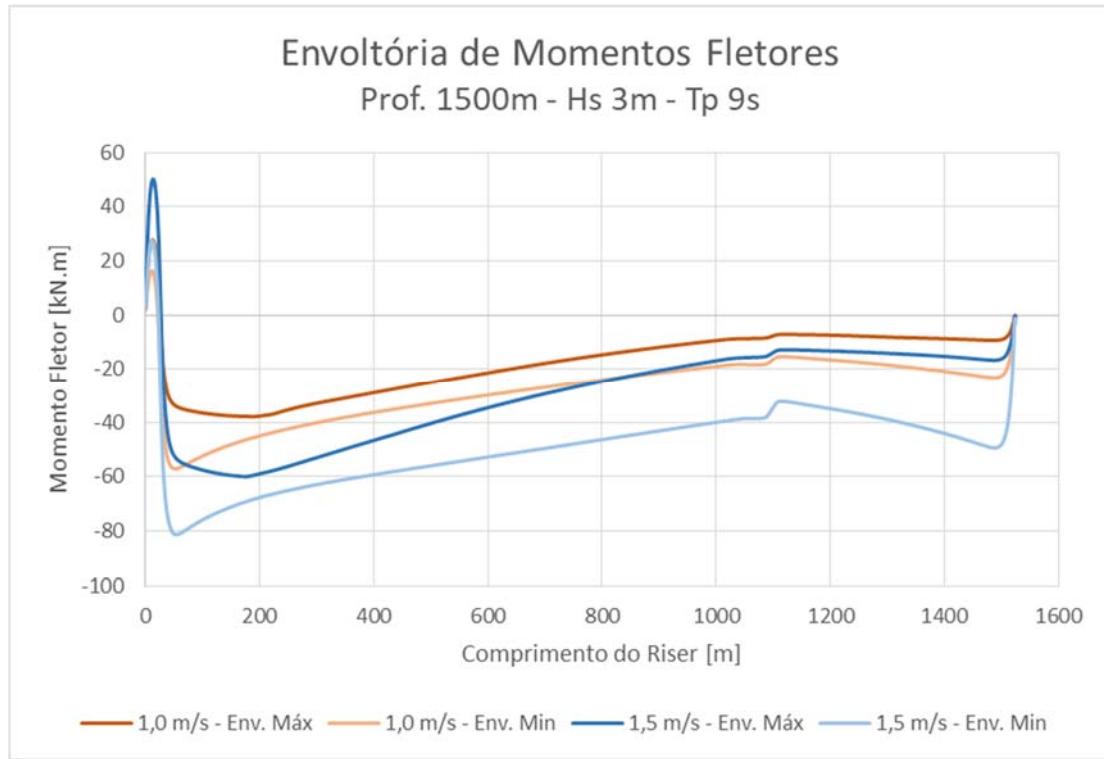


Figura C.10.43 – Envoltória de momentos fletores no *riser* com profundidade de 1500m, Hs 3m e Tp 9s

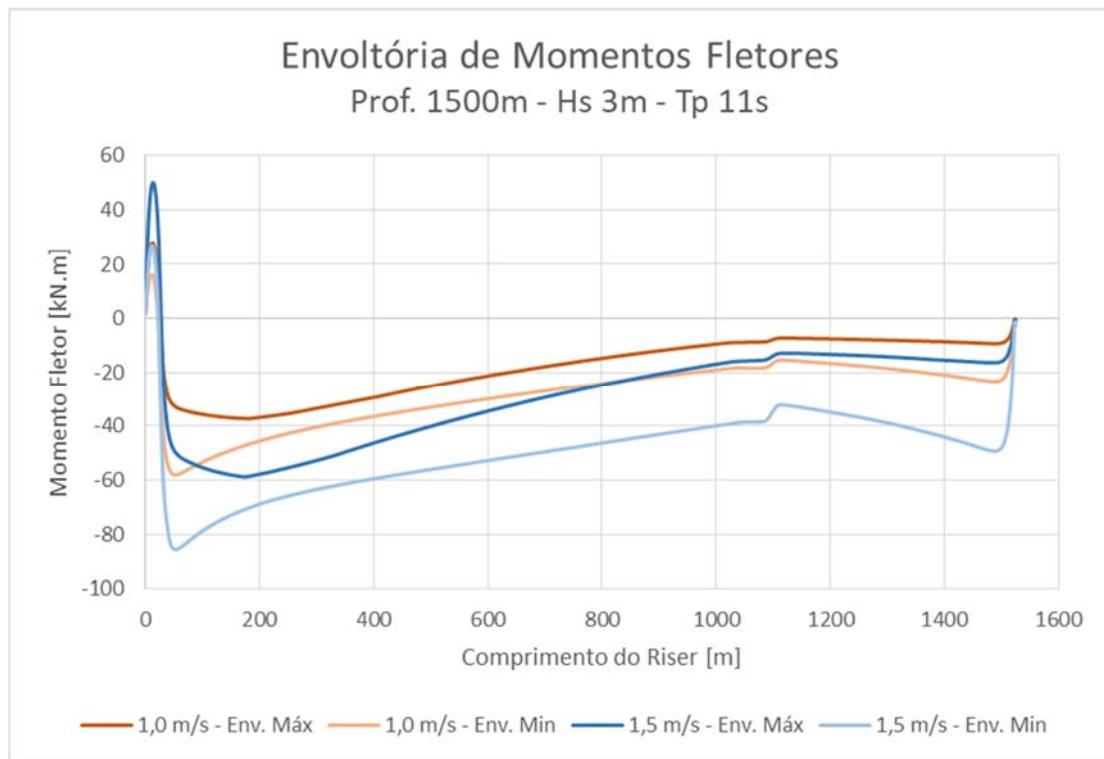


Figura C.10.44 – Envoltória de momentos fletores no *riser* com profundidade de 1500m, Hs 3m e Tp 11s

C.3 Profundidade 3000m

As Figuras C.10.45, C.10.46, C.10.47, C.10.48, C.10.49 e C.10.50 apresentam os gráficos de envoltória para as seguintes situações de estudo respectivamente: Hs de 2 metros e Tp de 7 segundos; Hs de 2 metros e Tp de 9 segundos; Hs de 2 metros e Tp de 11 segundos; Hs de 3 metros e Tp de 7 segundos; Hs de 3 metros e Tp de 9 segundos; e Hs de 3 metros e Tp de 11 segundos. Todos para a operação de transporte com profundidade de 3000 metros.

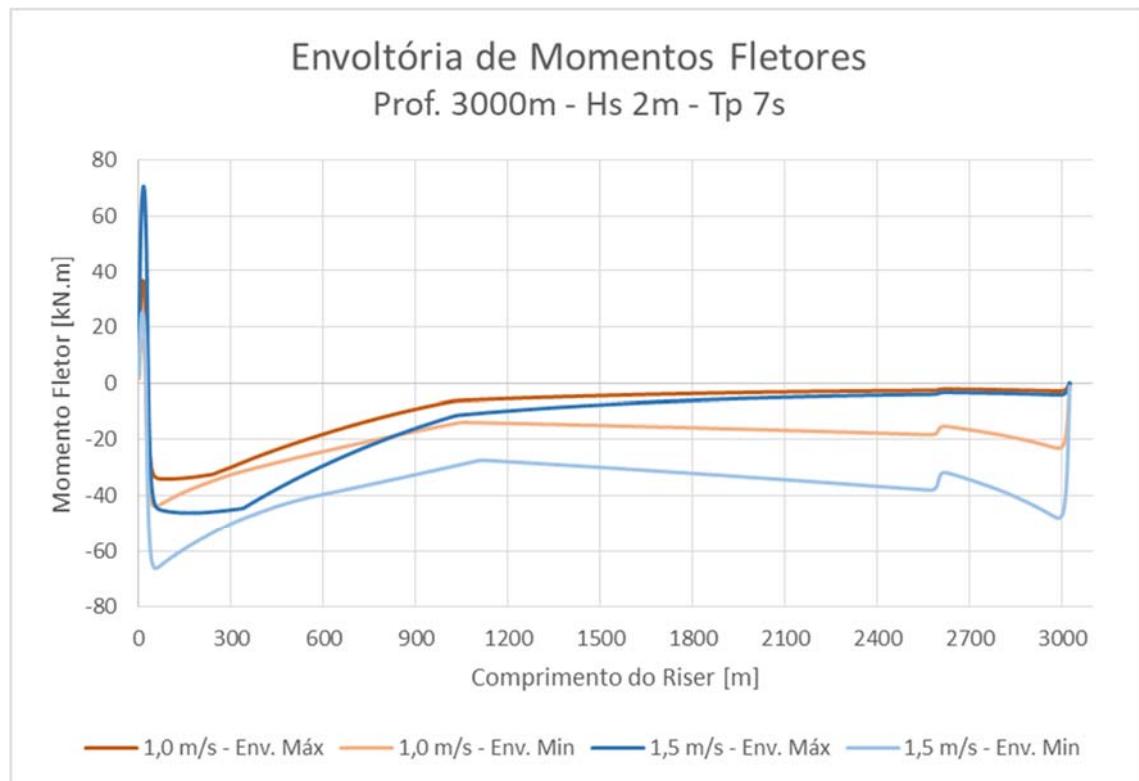


Figura C.10.45 – Envoltória de momentos fletores no *riser* com profundidade de 3000m, Hs 2m e Tp 7s

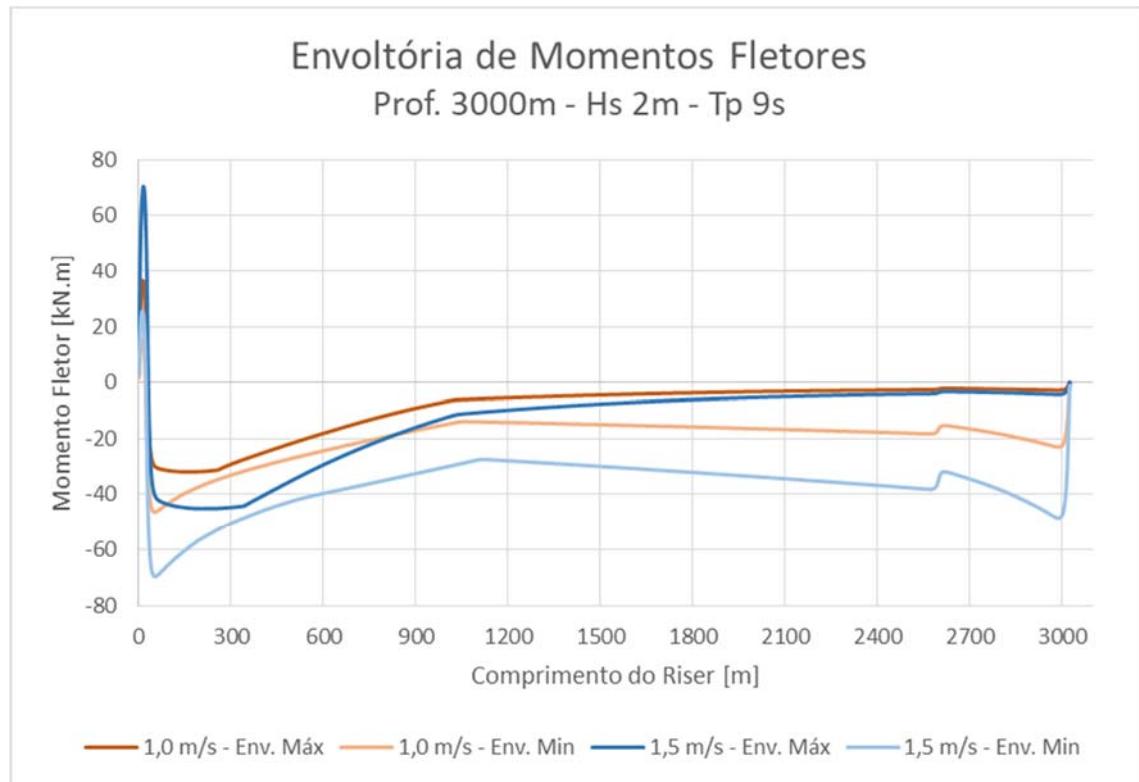


Figura C.10.46 – Envoltória de momentos fletores no *riser* com profundidade de 3000m, Hs 2m e Tp 9s

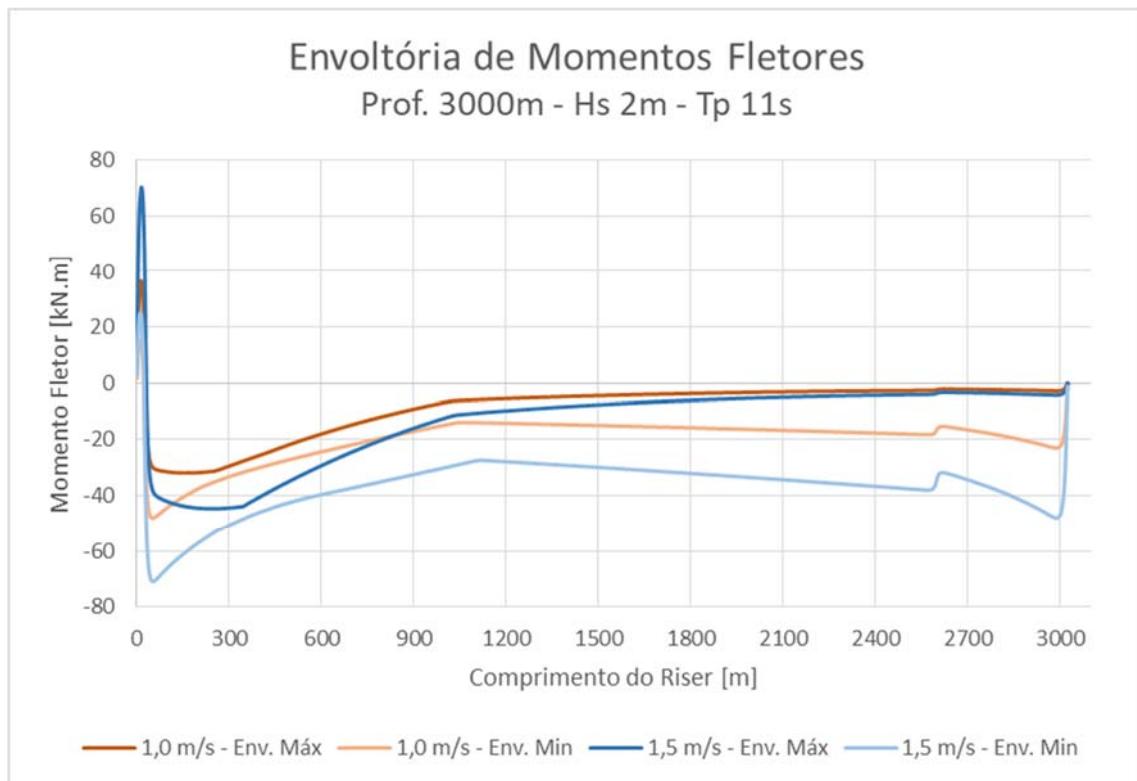


Figura C.10.47 – Envoltória de momentos fletores no *riser* com profundidade de 3000m, Hs 2m e Tp 11s

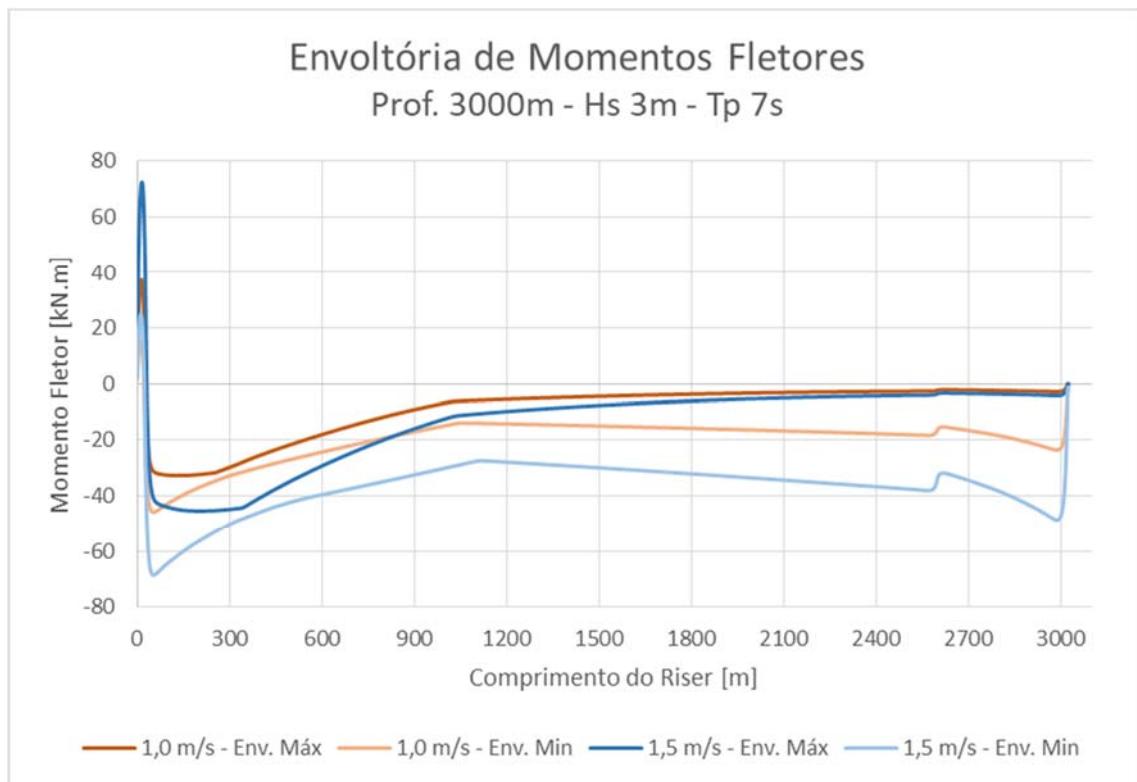


Figura C.10.48 – Envoltória de momentos fletores no *riser* com profundidade de 3000m, Hs 3m e Tp 7s

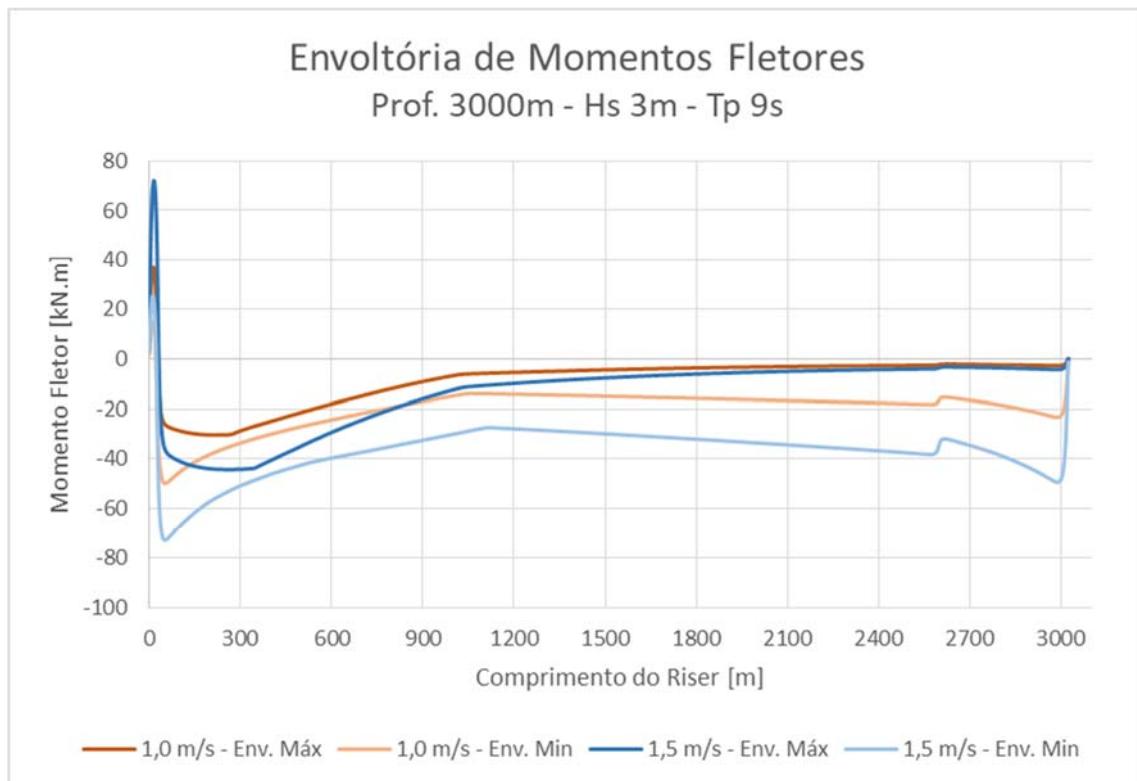


Figura C.10.49 – Envoltória de momentos fletores no riser com profundidade de 3000m, Hs 3m e Tp 9s

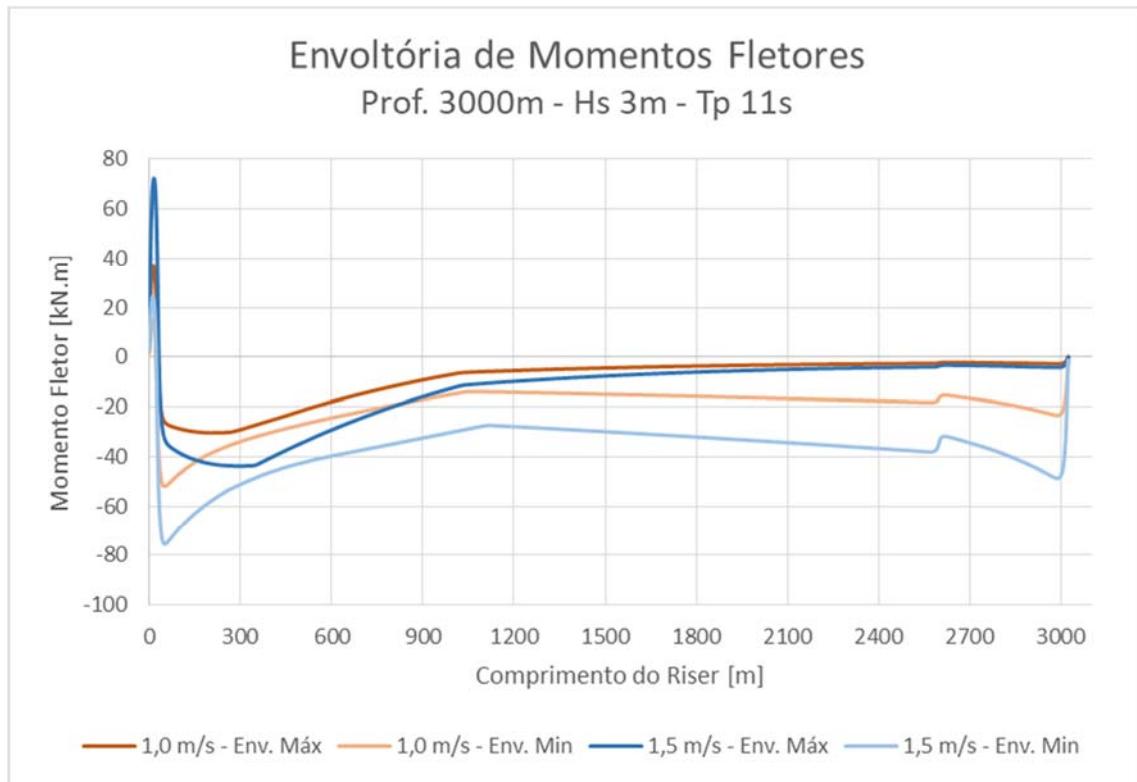


Figura C.10.50 – Envoltória de momentos fletores no riser com profundidade de 3000m, Hs 3m e Tp 11s